



ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΥΓΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (Shape Memory Alloys SMA)

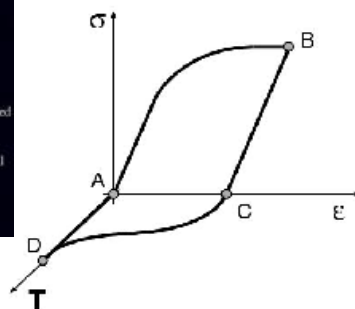
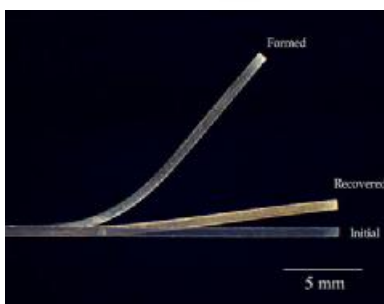
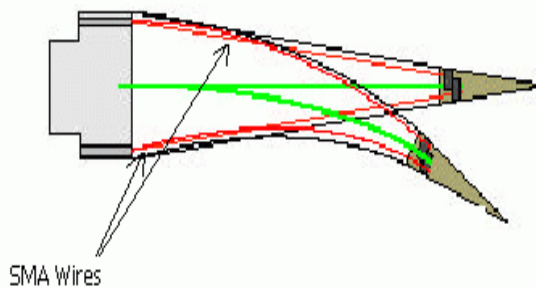


Figure 1. Effect of temperature on the form. At the end of the process of forming a wire (ABC) at temperature  $T_1$ , the material presents residual deformation (CD) as the process temperature remains in stable condition (CDA).

Figure 1. Shape-memory effect. At the end of a mechanical loading-unloading path (ABC) performed at constant temperature, the material presents residual deformation (AC). The residual strain may be recovered through a thermal cycle (CDA).

Πτυχιακή εργασία

Σπουδαστές

Τζουβελέκης Νικόλαος

Βιδούρας Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής

Κόκκινος Αναστάσιος

**ΑΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ**  
**ΣΧΗΜΑΤΟΣ**

**(Shape Memory Alloys SMA)**

**Πτυχιακή εργασία**

**Σπουδαστές**

Τζουβελέκης Νικόλαος ΑΜ:4662

Βιδούρας Γεώργιος ΑΜ:4729

**Επιβλέπων Καθηγητής**

Κόκκινος Αναστάσιος

**ΠΑΤΡΑ 2011**

Η παρούσα μελέτη που παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες αποτελεί τη πτυχιακή μας εργασία ως φοιτητές του τμήματος Μηχανολόγων της Σχολής τεχνολογικών εφαρμογών που ανατέθηκε από τον καθηγητή κύριο Κόκκινο Αναστάσιο επιστημονικό συνεργάτη του τμήματος Μηχανολογίας του ΤΕΙ Πάτρας.

Σε όλη αυτή την προσπάθεια υπήρξε σημαντική καθοδήγηση και πλήρη παροχή βοήθειας από τον κύριο Κόκκινο Αναστάσιο , για όλη αυτή τη μελέτη καθώς και για το σύνολο των γνώσεων που μας μετέδωσε του ανήκουν οι θερμές μας ευχαριστίες.

Τέλος ευχαριστούμε τους ανθρώπους που μας στήριξαν και μας συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια ηθικά και υλικά αφιερώνοντας τους την πτυχιακή μας εργασία.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	1
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	2
1. ΥΛΙΚΑ ΓΕΝΙΚΑ	7
1.1. ΔΟΜΗ	7
1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	7
2. ΚΡΑΜΑΤΑ	9
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ	9
2.2 ΓΕΝΙΚΑ	9
2.3 ΕΙΔΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ	11
3. ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ	11
3.1 ΔΟΜΗ	14
3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	15
3.3 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΩΝ ΕΞΥΠΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	19
1. Μεταβολή ιδιότητας	20
2. Ανταλλαγή ενέργειας	21
3. Αναστρεψιμότητα/κατευθυντήρια γραμμή	21
4. Μέγεθος/θέση	22
4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ : ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)</b>	25
1. ΙΣΤΟΡΙΑ	27
2. ΔΟΜΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ	28
3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ	29
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝ ΘΕΡΜΩ ΚΑΙ ΕΝ ΨΥΧΡΩ	36
5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	38

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ</b>	<b>45</b>
1. ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)	46
2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ( <i>NiTi</i> )	52
2.1 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	56
2.1.1 ΨΕΥΔΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ( <i>Pseudoelasticity</i> )	58
2.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	59
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ Nitinol	62
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	65
4. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ</b>	<b>69</b>
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	70
1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ	72
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ	75
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	84
4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΚΛΑΔΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	86
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>90</b>
<b>ΒΙΟΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.</b>

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία, γίνεται μια μελέτη των υλικών με μνήμη σχήματος. Τα υλικά αυτά δεν είναι πολύ διαδεδομένα στο ευρύ κοινό έως σήμερα, όμως λόγω των ιδιαίτερα σημαντικών φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους, είναι σίγουρο ότι θα απασχολήσουν αρκετούς επιστημονικούς κλάδους μέσα στα επόμενα χρόνια. Υλικά λοιπόν με μνήμη σχήματος είναι τα κράματα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα έπειτα από κάποια παραμόρφωση προερχόμενη από την άσκηση ενός φορτίου. Αν και μία μεγάλη κατηγορία κραμάτων παρουσιάζει το φαινόμενο μνήμης σχήματος, μόνο εκείνα που μπορούν να ανακτήσουν το σχήμα τους μετά την άσκηση φορτίου ή πίεσης είναι εμπορικού ενδιαφέροντος.

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία στοχεύει στο να δώσει στον αναγνώστη αρχικά κάποιες βασικές γνώσεις για τα υλικά και τα κράματα γενικά, ουσιαστικότερα όμως αναφέρεται στα κράματα με μνήμη σχήματος, τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κραμάτων αυτών, τους τρόπους παρασκευής και κατεργασίας τους, καθώς επίσης και κάποιες από τις πολυάριθμες εφαρμογές τους που είναι γνωστές έως σήμερα.

Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο Α γίνεται μία εισαγωγή στην ιστορική αναδρομή των υλικών, των κραμάτων, καθώς επίσης και μία αναφορά για τους τύπους, τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των ευφυών συστημάτων. Στο κεφάλαιο Β γίνεται αναφορά των υλικών με μνήμη σχήματος, τους τρόπους παρασκευής και κατεργασίας τους, μελέτη της κρυσταλλικής δομής τους και εξήγηση περί του φαινομένου της μνήμης σχήματος. Στο κεφάλαιο Γ παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων με μνήμη σχήματος, η θερμομηχανική

συμπεριφορά των κραμάτων, το φαινόμενο της ψευδοελαστικότητας, καθώς και η σημασία της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς τα κράματα αυτά. Τέλος, στο κεφάλαιο Δ, γίνεται μία παρουσίαση των εφαρμογών των κραμάτων με μνήμη σχήματος καθώς και της βιοσυμβατότητας των υλικών αυτών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ



## ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η τεχνολογία και η ανάπτυξη της , είναι από τα συνθήματα «πρώτης γραμμής» στην εποχή μας και σε αυτή την κατεύθυνση τα υλικά και η επιστήμη των υλικών είναι καθοριστικής σημασίας . Άλλωστε η σημασία των υλικών μπορεί να καταδειχθεί και μόνο από το γεγονός ότι οι πρώτες ιστορικές περιόδους της ανθρωπότητας χαρακτηρίζονται ως λίθινη εποχή, ως εποχή του χαλκού και ως εποχή του σιδήρου. Όταν, σύμφωνα με τον μύθο, ο Προμηθέας παρέδωσε στους μακρινούς προγόνους μας τη φωτιά, κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί ότι η θερμική ενέργεια που εκλύει η φωτιά θα έδινε τέτοια ώθηση όπως φαίνεται από τη χρησιμοποίηση της στη σύγχρονη τεχνολογία .

Πάντως για πολλούς ακόμη αιώνες η επιλογή της πέτρας, του ξύλου και του μετάλλου ως κατασκευαστικών υλικών αφηνόταν στη διαίσθηση ή στην εμπειρία του τεχνίτη. Ο άγγλος γεωλόγος Henry Clifton Sorby, το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα, μπόρεσε να συνδέσει τη μικροδομή του χάλυβα με τις ιδιότητες που παρουσιάζει και στη συνέχεια με τη θερμική κατεργασία, δημιουργώντας έτσι το τρίγωνο «δομή - δεσμός - κατεργασία» που επηρεάζει τις ιδιότητες ενός προϊόντος και είναι το περιεχόμενο της επιστήμης των υλικών, μιας επιστήμης που ως επίσημος τίτλος εμφανίστηκε μόλις μεταξύ 1960 και 1965. Εξετάζει το υλικό από τη διαδικασία παραγωγής ως το τελικό προϊόν, μελετά τη χημική, κρυσταλλική, μοριακή και ηλεκτρονική δομή (μια και η δομή επηρεάζει τις μηχανικές, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες), παρακολουθεί τον τρόπο συμπεριφοράς σε τριβή, διάβρωση και οξείδωση, προσπαθώντας να τη βελτιώσει και τέλος συνδυάζει ή αναπτύσσει υλικά κατάλληλα για κάθε εφαρμογή της σημερινής ιδιαίτερα σύνθετης τεχνολογίας. Ως σταθμοί στην ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθούν η χρήση των ακτίνων X για το διαχωρισμό των φάσεων ενός υλικού, καθώς και η συμβολή, στη δεκαετία του '30, της

Κβαντομηχανικής στην εξήγηση ιδιοτήτων όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οπτική διαπερατότητα και η ανάπτυξη της ηλεκτρονικής θεωρίας, που οδήγησε στην κατασκευή του τρανζίστορ το 1947 και στην άνθηση των ημιαγωγών, οι οποίοι μετέτρεψαν τη βιομηχανική κοινωνία σε κοινωνία της πληροφορικής.

Η εποχή μας, και ίσως τα χρόνια που έρχονται, αποτελούν την εποχή των υλικών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των βραβείων Νόμπελ στη Φυσική και στη Χημεία έχει τα τελευταία χρόνια σχέση με τα υλικά. Στην τρομερή σημερινή ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών, συνέβαλαν η δυνατότητα παρατηρήσεων σε επίπεδο ατόμων, με τη βοήθεια π.χ. του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου υψηλής διακριτότητας (HREM) και η κατασκευή και συνεχής βελτίωση υπερυπολογιστών που επιτρέπουν μοντελοποίηση εκατοντάδων ή και χιλιάδων ατόμων, προσεγγίζοντας έτσι πολύ καλύτερα τη συμπεριφορά των υλικών.

Με αυτή τη θυελλώδη πραγματικά ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών τα όρια ανάμεσα στη βασική έρευνα, στην ανάπτυξη και στην εφαρμογή γίνονται δυσδιάκριτα, ενώ το χρονικό διάστημα μεταξύ βασικής έρευνας για ένα νέο υλικό και της βιομηχανικής παραγωγής του συνεχώς μικραίνει. Έτσι, π.χ. το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης αναφέρθηκε το 1988 και το 1994 λειτούργησαν οι πρώτοι αισθητήρες με βαλβίδες spin (βαλβίδες περιστροφής που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα μαγνητικά υλικά με τη δυνατότητα να εναλλάσσουν την ηλεκτρική τους αντίσταση).

Παρ' όλο που φαίνεται παράξενο, εδώ και πολλές χιλιάδες χρόνια οι βασικές κατηγορίες των υλικών έχουν αλλάξει ελάχιστα. Έτσι από το 6000 π.Χ. ανιχνεύεται μεταλλουργία χαλκού και χρυσού, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι ως τα μέσα του 17ου αιώνα ξέραμε μόνο 12 από τα συνολικά 86 σήμερα γνωστά μεταλλικά στοιχεία. Τα **μέταλλα** και τα **κράματα** τους είναι βαριά, κρυσταλλικά υλικά, με χαρακτηριστική (μεταλλική) λάμψη, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, πολύ καλή μηχανική αντοχή σε συνδυασμό με

ικανότητα να δέχονται σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Ο χαλκός, ο χρυσός, το αλουμίνιο και ο σίδηρος με τα κράματα του, τους χάλυβες, μπορούν να θεωρηθούν οι πιο διαδεδομένοι αντιπρόσωποι της κατηγορίας. Ακόμη, ήδη από τη νεολιθική εποχή, η τέχνη της αγγειοπλαστικής είχε κάνει την εμφάνιση της και ο πηλός, βασικός αντιπρόσωπος των κεραμικών, χρησιμοποιείται για αντικείμενα χρήσιμα στο μαγείρεμα και στην αποθήκευση της τροφής. Τα **κεραμικά** είναι ανόργανα κρυσταλλικά υλικά, συνήθως ένωση μετάλλου με αμέταλλο, που παράγονται ή χρησιμοποιούνται σε μεγάλες θερμοκρασίες, μια και έχουν συνήθως υψηλό σημείο τήξης, σχετικά μικρό βάρος και είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού, με αυξημένη σκληρότητα (το νιτρώδες του βορίου είναι το ίδιο σκληρό με το διαμάντι) αλλά μειωμένη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις. Χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι είναι, π.χ., οι φερτές (οξειδία του σιδήρου με μαγνητικές ιδιότητες και εφαρμογές σε κυκλώματα UHF και VHF), τα πυριτικά (άργιλος, άμμος, τσιμέντα) και τα οξειδία, τα καρβίδια και τα νιτρώδη. Τα **γυαλιά**, που επίσης ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, είναι άμορφα υλικά τα οποία ήταν επίσης γνωστά στην πρώτη αιγυπτιακή δυναστεία, ενώ σπουδαία κέντρα της υαλουργίας υπήρξαν η Σιδώνα, η Τύρος, η Αλεξάνδρεια και η Ρώμη. Μια μεγάλη κατηγορία υλικών τεχνολογίας, τα **πολυμερή**, έχουν και αυτά την προϊστορία τους, μια και το ξύλο, το μαλλί, οι φυτικές ίνες και το δέρμα, ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος. Τέλος, το μείγμα λάσπης-άχυρου με το οποίο κατασκεύαζε τις καλύβες του μπορεί να θεωρηθεί πρόδρομος του οπλισμένου σκυροδέματος. Βέβαια κανείς δεν μπορεί να ισχυρισθεί ότι τα χιλιάδες προϊόντα της σημερινής εποχής μπορούν να περιγραφούν μόνο με τις τέσσερις αυτές κατηγορίες. Γιατί οι ιδιότητες που ως πριν από ελάχιστες δεκαετίες ακολουθούσαν την κάθε κατηγορία, ότι π.χ. τα μέταλλα έχουν συμμετρία, τα πολυμερή είναι μονωτικά και οι κρύσταλλοι είναι στερεά σώματα, έχουν παύσει να ισχύουν, μια και έχουμε πια άμορφα μέταλλα, αγωγίμα πλαστικά και υγρούς

κρυστάλλους. Πολύ δε περισσότερο η μικροηλεκτρονική μαζί με τη βιοτεχνολογία επιτρέπει πλέον κατασκευές εξαρτημάτων ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων, ακόμη και με τοποθέτηση ατόμων σε κατάλληλες θέσεις.

Ως γενική εισαγωγή θα μπορούσε κανείς, με λίγα λόγια, να πει ότι σήμερα ψάχνουμε για κράματα ή πλαστικά που θα ελαττώσουν το βάρος και το κόστος των μεταφορών χωρίς κάποια μείωση της αντοχής (ειδική αντοχή), κεραμικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες που θα αυξήσουν την απόδοση και τον χρόνο ζωής των μηχανών, υλικά για αεροδιαστημική με καλή αντοχή σε αυξημένες θερμοκρασίες και καλή αντίσταση σε διάβρωση, οξείδωση και ερπυσμό (Ερπυσμός λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Το φαινόμενο εκδηλώνεται σε ψηλές θερμοκρασίες και όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για παρατεταμένο χρόνο. Στον ερπυσμό η παραμόρφωση δίνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο επιβολής της τάσης, το μέγεθος της τάσης και τη θερμοκρασία,  $\epsilon = f(t, \sigma, T)$ , και ακόμη υλικά για γρηγορότερους και μεγαλύτερης χωρητικότητας ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Και ας μην ξεχνούμε τις οπτικές ίνες και τους laser ημιαγωγούς, που αντικαθιστούν στις επικοινωνίες τα χάλκινα σύρματα και τα μικροκύματα. Η μεγάλη ταχύτητα και ποσότητα πληροφορίας με τα μέσα αυτά μείωσε δραματικά το κόστος. Και βέβαια υλικά ανθεκτικά σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και ισχυρές ακτινοβολίες θα χρειαστούν για την κατασκευή του πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης, που θα συμβάλει στη λύση του ενεργειακού προβλήματος καθώς και περιβαλλοντικών και άλλων σχετικών θεμάτων του πλανήτη μας. Ας δούμε όμως λίγο καλύτερα μερικά από αυτά.

Τα **άμορφα μέταλλα** σχηματίζονται ψύχοντας το τηγμένο μέταλλο σε εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες, ξεπερνώντας κατά πολύ τους 1.000 °C το

δευτερόλεπτο. Έτσι δεν προλαβαίνουν να σχηματιστούν πυρήνες για να αναπτυχθεί ο κρύσταλλος. Έχουν εξαιρετική αντίσταση σε χημική διάβρωση και ιδιαίτερα αυξημένη μηχανική αντοχή σε πλαστικές παραμορφώσεις. Τα εξ αυτών σιδηρομαγνητικά έχουν μικρές απώλειες στα δινορεύματα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται, π.χ., σε μετασχηματιστές.

Οι **υγροί κρύσταλλοι** είναι κάτι μεταξύ υγρού και κρυσταλλικού στερεού, με κοινό χαρακτηριστικό σχεδόν κυλινδρικά μόρια, που συνδέονται ασθενικά μεταξύ τους. Υπάρχει μια πολύ τοπικού χαρακτήρα παράλληλη τοποθέτηση των μορίων, που μπορεί να επεκταθεί με εφαρμογή, π.χ., ενός ηλεκτρικού πεδίου και να λειτουργήσει σαν ένας διακόπτης φωτός.

Αν και οι υγροί κρύσταλλοι εξετάζονται από το 1920, μόλις στις αρχές της δεκαετίας του '80 παρουσιάστηκε η πρώτη εφαρμογή σε οθόνη, ενώ οι γνωστές σε όλους μας επίπεδες οθόνες έφθασαν στο εμπόριο σε λογικές τιμές την τελευταία δεκαετία. Η μικρότερη απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας, το μικρότερο βάρος και το λεπτότερο πάχος οθόνης έδωσαν τη δυνατότητα κατασκευής φορητών διατάξεων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τους φορητούς Η/Υ.

Βεβαίως, αυτή η πληθώρα των νέων υλικών και των ποικίλων προϊόντων της, έχει δημιουργήσει αρκετά σοβαρά προβλήματα στο κοινωνικό σύνολο, με πρώτιστο και βασικό την κάθε μορφής «ρύπανση». Ευτυχώς, παράλληλα με τη δημιουργία νέων, φιλικών προς το περιβάλλον, υλικών άρχισε να προχωρεί και η τεχνολογία αντιμετώπισης των προβλημάτων. Έτσι, π.χ. στο θέμα της ανακύκλωσης με διάφορες τεχνικές μπορούμε να ανακυκλώσουμε σοβαρό ποσοστό χαρτιού, πλαστικού και αλουμινίου ή άλλων μετάλλων. Παραμένει βέβαια το θέμα των **πυρηνικών** και των **τοξικών αποβλήτων**, που είναι τα σοβαρότερα, μια και έχουν άμεση επίδραση στην κοινωνία μας.

# 1. ΥΛΙΚΑ ΓΕΝΙΚΑ

## 1.1. ΔΟΜΗ

Η δομή ενός υλικού συνήθως σχετίζεται με την οργάνωση των εσωτερικών συστατικών του. Η υποατομική δομή περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια στα επιμέρους άτομα και τις αλληλεπιδράσεις με τον πυρήνα τους. Σε ατομικό επίπεδο, η έννοια της δομής περιλαμβάνει την οργάνωση ατόμων ή μορίων σε σχέση με άλλα άτομα ή μόρια. Η επόμενη ευρύτερη κατηγορία δομών, που περιλαμβάνει μεγάλες ομάδες κανονικά συσσωρευμένων ατόμων, ονομάζεται μικροσκοπική, και υποδηλώνει εκείνη τη δομή που μπορεί να παρατηρηθεί απ' ευθείας μόνο με τη χρήση μικροσκοπίου. Τέλος, δομικά στοιχεία τα οποία μπορούν να γίνουν αντιληπτά με γυμνό οφθαλμό ονομάζονται μακροσκοπικά.

## 1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όλα τα υλικά κατά τη χρήση τους εκτίθενται σε εξωτερικά ερεθίσματα, τα οποία προκαλούν κάποιου είδους απόκριση. Η ιδιότητα είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του υλικού, που εκφράζει το είδος και το μέγεθος της απόκρισής του σε κάποιο συγκεκριμένο ερέθισμα. Γενικά οι ορισμοί των ιδιοτήτων δίνονται ανεξάρτητα από το σχήμα και το μέγεθος του υλικού. Ουσιαστικά όλες οι σημαντικές ιδιότητες των στερεών υλικών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε έξι διαφορετικές κατηγορίες: μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, μαγνητικές, οπτικές και ιδιότητες φθοράς. Για κάθε μία υπάρχει ένα διαφορετικό είδος ερεθίσματος ικανό να προκαλέσει διαφορετικές αποκρίσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες συσχετίζουν την παραμόρφωση με ένα ασκούμενο φορτίο ή δύναμη. Σαν παραδείγματα αναφέρονται το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή.

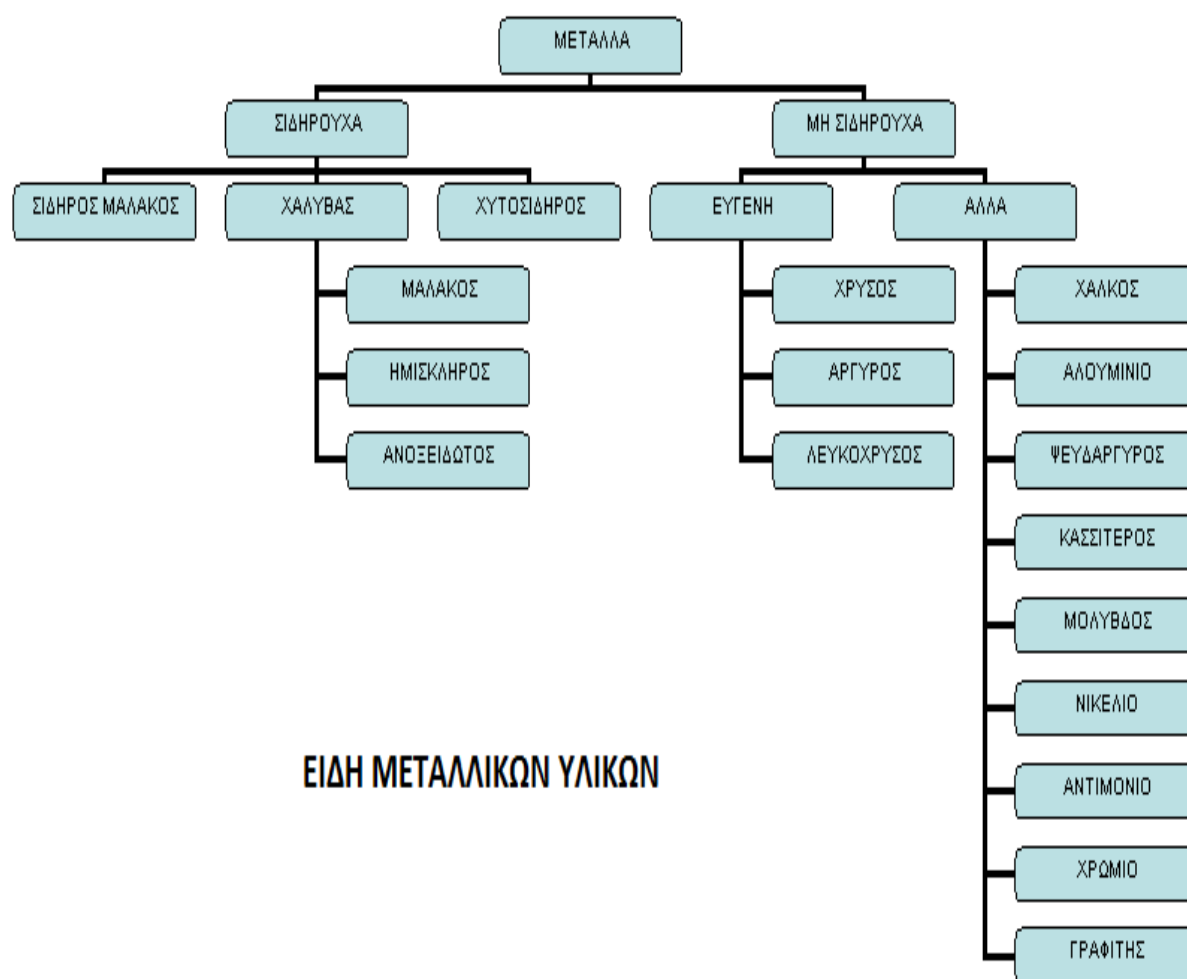
Στις ηλεκτρικές ιδιότητες, όπως είναι η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά, το ερέθισμα είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Η θερμική συμπεριφορά των στερεών μπορεί να παρουσιαστεί βάσει της θερμοχωρητικότητας και της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας.

Οι μαγνητικές ιδιότητες δείχνουν την απόκριση ενός υλικού στην εφαρμογή μαγνητικού πεδίου.

Για τις οπτικές ιδιότητες, το ερέθισμα είναι η ηλεκτρομαγνητική (ή φωτεινή) ακτινοβολία. Ο δείκτης διάθλασης και η ανακλαστικότητα είναι αντιπροσωπευτικές οπτικές ιδιότητες.

Τέλος, τα χαρακτηριστικά της φθοράς υποδηλώνουν τη χημική δραστηριότητα των υλικών.



Σχήμα Α.1: Είδη μεταλλικών υλικών



## 2. ΚΡΑΜΑΤΑ

### 2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ

Η κατασκευή κραμάτων εμφανίζεται από την εποχή της εμφάνισης των μετάλλων εξ'ανάγκης, αφού αυτά τα πρωτογενή αυτούσια υλικά δεν ανταποκρίνονταν πάντα στις ανάγκες των ανθρώπων εκείνης της εποχής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την την Εποχή του Χαλκού αποτελεί το κρατέρωμα ή μπρούντζος (κράμα χαλκού με κασσίτερο).

Τα πρώτα κράματα που κατασκευάστηκαν, ήταν ασφαλώς περιορισμένα. Με τη ραγδαία όμως εξέλιξη της Χημείας, η κατασκευή αυτών προόδευσε τόσο ώστε να αποτελεί σήμερα σπουδαίο κλάδο της βιομηχανίας. Παράλληλα με την πρόοδο των εφαρμογών της θερμοδυναμικής, έγιναν γνωστές οι ιδιότητες των μετάλλων, ενώ εξίσου μεγάλη ώθηση στη κατασκευή κραμάτων έδωσαν η εξέλιξη της κρυσταλλογραφίας, της μικροσκοπίας, της φασματοσκοπίας κ.ά.

### 2.2 ΓΕΝΙΚΑ

Τα κράματα μετάλλων δημιουργούνται προκειμένου να συνδυαστούν ιδιότητες των βασικών συστατικών σε ένα νέο υλικό. Έτσι, για παράδειγμα, ο χάλυβας (κράμα σιδήρου με άνθρακα) είναι πιο σκληρός και ανθεκτικός από το σίδηρο, ένα από τα βασικά συστατικά του. Βασικός λόγος παραγωγής κραμάτων είναι η βελτίωση της σκληρότητας, της αντοχής, του βάρους, της αντίστασης στη διάβρωση κ.λπ. των καθαρών (πρωτογενών) μετάλλων.

Ένα χαρακτηριστικό των κραμάτων, σε αντίθεση με τα πρωτογενή



μέταλλα, είναι ότι δεν έχουν καθορισμένο σημείο τήξης. Σε αυτά υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών, μέσα στο οποίο τα κράματα βρίσκονται μεταξύ στερεάς και υγρής κατάστασης.

Συνηθισμένες εφαρμογές κραμάτων συναντάμε στα πολύτιμα μέταλλα, στις κατασκευές, στις οικοδομές, κ.λπ.

Η κατασκευή κραμάτων γίνεται συνήθως με τήξη των μετάλλων που τα συνθέτουν. Υφίστανται όμως και άλλες μέθοδοι όπως η ηλεκτρόλυση.

Όταν το κράμα είναι «ομοιογενές» μπορεί να είναι:

-Στερεό διάλυμα: Σ' αυτή την περίπτωση σχηματίζονται μικτοί κρύσταλλοι με την παρεμβολή ατόμων του ενός μετάλλου, στα διάκενα του κρυσταλλικού πλέγματος του άλλου μετάλλου ή και με την υποκατάσταση ορισμένων ατόμων του ενός μετάλλου με άτομα του άλλου.

-Διαμεταλλική ένωση: Σ' αυτή τη περίπτωση σχηματίζονται κρύσταλλοι χημικών ενώσεων, που σχηματίζουν μεταξύ τους τα μέταλλα. Στις ενώσεις αυτές τα μέταλλα δεν ακολουθούν τους συνήθεις νόμους σθένους.

-Στερεή διαμεταλλική ένωση: Είναι ο συνδυασμός των δύο προηγουμένων, όταν διαπιστώνεται περίσσεια του ενός εκ των συνιστώντων στο κράμα μετάλλων.

Όταν όμως το κράμα είναι «ετερογενές» τότε παρουσιάζει χωριστές φάσεις που μπορεί να είναι:

-Από καθαρά μέταλλα.

-Από μία ή περισσότερες διαμεταλλικές ενώσεις

-Από διαλύματα μετάλλων ή ενώσεων αυτών, εντός των μετάλλων.

## 2.3 ΕΙΔΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

Εκτός από την παραπάνω διάκριση των κραμάτων σε «ομοιογενή» ή «ετερογενή», αυτά χαρακτηρίζονται επίσης και ανάλογα με τον αριθμό των μετάλλων που τα συνθέτουν σε «διμερή», «τριμερή» ή «πολυμερή». Άλλη διάκριση είναι τα «εύτηκτα» (που χαρακτηρίζονται εκείνα στα οποία η αναλογία των μετάλλων που τα συνθέτουν είναι τέτοια ώστε να παρουσιάζουν το χαμηλότερο δυνατό σημείο τήξης, από κάθε άλλη αναλογία) καθώς και τα «υπερελαφρά κράματα» (που είναι κράματα μαγνησίου με άργιλο, ψευδάργυρο και άλλα μέταλλα). Ειδικότερα, τα κράματα του υδραργύρου ονομάζονται αμαλγάματα.

## 3. ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ

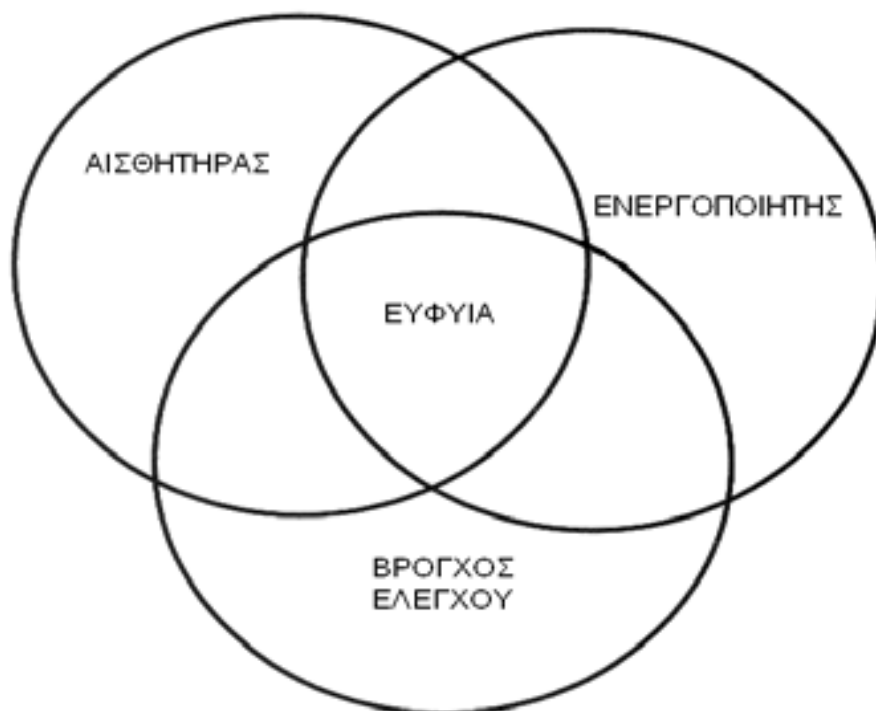
Η ανάπτυξη έξυπνων υλικών, ή καλύτερα ευφυών συστημάτων, βασίζεται στην αξιοποίηση των λειτουργικών ιδιοτήτων μιας σειράς υλικών με κυριότερους εκπροσώπους τα υλικά με μνήμη σχήματος. Το επιστημονικό και τεχνολογικό πεδίο των «έξυπνων υλικών» επιχειρεί να αναπτύξει συστήματα υλικών, των οποίων η επιτυχία δε θα βασίζεται στην εκπλήρωση πολύ υψηλών και σταθερών προδιαγραφών, αλλά στη δυνατότητα ελεγχόμενης μεταβολής της συμπεριφοράς τους.

Η ιστορία των υλικών είναι παράλληλη με την ύπαρξη και την πορεία του ανθρώπου στον κόσμο. Τα υλικά έχουν τεράστια επιρροή στον πολιτισμό και η πρόοδος στην επιστήμη των υλικών, ενδυναμώνει την οικονομία και καθορίζει το βιοτικό επίπεδο που μπορεί να απολαμβάνει η κοινωνία.

Στις μέρες μας αναπτύχθηκε μία νέα κατηγορία υλικών τα λεγόμενα «λειτουργικά», «αυτοπροσαρμοζόμενα» ή «ευφυή» υλικά. Στα υλικά αυτά,

μεγαλύτερη σημασία έχουν οι λειτουργίες/ενέργειες που μπορούν να εκτελέσουν, παρά οι ονομαστικές τιμές κάποιων φυσικών ιδιοτήτων ή χαρακτηριστικών τους (όπως το μέτρο ελαστικότητας, η ειδική αντίσταση κτλ) . Η συγχώνευση των επιτευγμάτων της τεχνολογίας των υλικών , οδήγησε πρόσφατα στην ανάπτυξη των ευφυών υλικών ή συστημάτων. Ως ευφυή υλικά αναφέρονται συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων κ.α.) με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, εξαιτίας μιας διέγερσης . Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο βρόγχο ελέγχου (σχήμα Α.2). Έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν «ευφυώς» συγκεκριμένες λειτουργίες , αποκρινόμενα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Με τους αισθητήρες αισθάνονται αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον (π.χ. επιβαλλόμενη τάση ή αλλαγή θερμοκρασίας) ή στη δομή τους (π.χ. ανάπτυξη ατελειών ή μεταβολή της κρυσταλλικής δομής) και αποκρίνονται σε αυτές με τους ενεργοποιητές , αλλάζοντας κάποια ιδιότητά τους προς ορισμένη κατεύθυνση (π.χ. δυσκαμψία, σχήμα, ικανότητα απόσβεσης). Εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των ευφυών υλικών μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές που να αξιοποιούνται στα λειτουργικά και δομικά τους όρια χωρίς τον κίνδυνο να τα ξεπεράσουν. Επιπλέον, θα πληροφορούν τους χρήστες τους , για όλη την ιστορία λειτουργίας τους, όπως για τη δημιουργία αστοχιών, το βαθμό ανάπτυξής τους και τα σημεία που συμβαίνουν, ενώ ταυτόχρονα θα έχουν τη δυνατότητα να αντιδράσουν σε επικίνδυνες για αυτά συνθήκες, όπως υπερβολικές δονήσεις, ή να αυτοεπιδιορθωθούν. Ένα τέλειο ευφύες σύστημα είναι αυτό που η πηγή της απαραίτητης ενέργειας (η κινούσα δύναμη), για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα, είναι ενσωματωμένη στο ίδιο σύστημα και οι λειτουργίες του εκτελούνται από τα ίδια τα δομικά του στοιχεία. Μπορούμε να προσομοιάσουμε τα ευφυή συστήματα με βιολογικά. Οι αισθητήρες

λειτουργούν σαν το νευρικό σύστημα, οι ενεργοποιητές σαν το μυϊκό και ο βρόγχος ελέγχου σαν τον εγκέφαλο ενός οργανισμού που ελέγχει το όλο σύστημα. Στη βιβλιογραφία , συστήματα που είναι σε θέση να εκτελούν λειτουργίες αναφέρονται με διάφορους όρους όπως «έξυπνο», «ευφυές», «αναπροσαρμοζόμενο» και «σοφό» σύστημα που ακόμα δεν έχουν διευκρινιστεί πλήρως. Γενικά , αναπροσαρμοζόμενο αναφέρεται το σύστημα που αισθάνεται ερεθίσματα από το περιβάλλον του, έξυπνο αυτό που αντιδρά στα ερεθίσματα με συγκεκριμένο τρόπο, ευφυές αυτό που η απαραίτητη ενέργεια για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα ,είναι ενσωματωμένη στο σύνθετο και σοφό αυτό που μπορεί με την πάροδο του χρόνου να αποφασίζει τις αντιδράσεις του.



*Σχήμα Α.2 : «Έξυπνο» σύστημα. Το σημείο τομής των τριών κύκλων ορίζει την ύπαρξη των ευφρών υλικών*

### 3.1 ΔΟΜΗ

Το έξυπνο υλικό μπορεί να υπάρξει σε δύο φάσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες, οι φάσεις αυτές ονομάζονται : Ωστενίτης (Austenite), ο οποίος εμφανίζεται στην υψηλή θερμοκρασία, και μαρτενσίτης (Martensite), ο οποίος εμφανίζεται στη χαμηλή θερμοκρασία.

Όταν οι εξωτερικές καταστάσεις θερμοκρασίας ή πίεσης αλλάξουν, αυτές οι δύο φάσεις θα μετασχηματιστούν από τη μία φάση σε άλλη και αντίστροφα, ανάλογα με το ποια αλλαγή εμφανίζεται. Το έξυπνο υλικό εκθέτει πολλές ειδικές ιδιότητες κατά τη διάρκεια των μετασχηματισμών μεταξύ αυτών των δύο φάσεων, όπως το φαινόμενο μνήμης σχήματος ή η υπερελαστικότητα ή η διπλής κατεύθυνσης επίδραση μνήμης σχήματος.

Ο τομέας των έξυπνων υλικών και των δομών αναπτύσσεται γρήγορα με τεχνολογικές καινοτομίες στα υλικά εφαρμοσμένης μηχανικής, τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές και την επεξεργασία εικόνας. Η έξυπνάδα τους περιγράφεται από την προσαρμοστικότητα, την αντίληψη, τη μνήμη, και τις πολλαπλές λειτουργίες των υλικών ή των κατασκευών. Αυτά τα χαρακτηριστικά παρέχουν τις πολυάριθμες πιθανές εφαρμογές για αυτά τα υλικά και κατασκευές σε διάφορους τομείς όπως αεροδιαστημική, κατασκευαστικά, αστικά συστήματα υποδομής, και βιομηχανία. Με την αλλαγή των ιδιοτήτων τους, τα έξυπνα υλικά μπορούν να ανιχνεύσουν τα ελαττώματα και τις ρωγμές και επομένως είναι χρήσιμα ως διαγνωστικά εργαλεία. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ενεργοποιηθεί το έξυπνο υλικό που ενσωματώνεται μέσα στην κατασκευή με έναν κατάλληλο τρόπο και να διορθωθεί το σφάλμα.

## 3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι αισθητήρες μπορεί να είναι τοποθετημένοι είτε στην επιφάνεια του σύνθετου, είτε ενσωματωμένοι στο υλικό και μπορούν να είναι πρόσθετα στοιχεία ή δομικά στοιχεία του σύνθετου συστήματος. Η λειτουργία της αίσθησης επιτελείται από ένα λειτουργικό υλικό το οποίο έχει την ικανότητα, για παράδειγμα, να μετράει την ένταση της διέγερσης μέσω ενός φαινομένου ηλεκτρισμού, θερμότητας ή ακτινοβολίας. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι χημικό ή να σχετίζεται με εφαρμογή τάσης ή παραμόρφωσης.

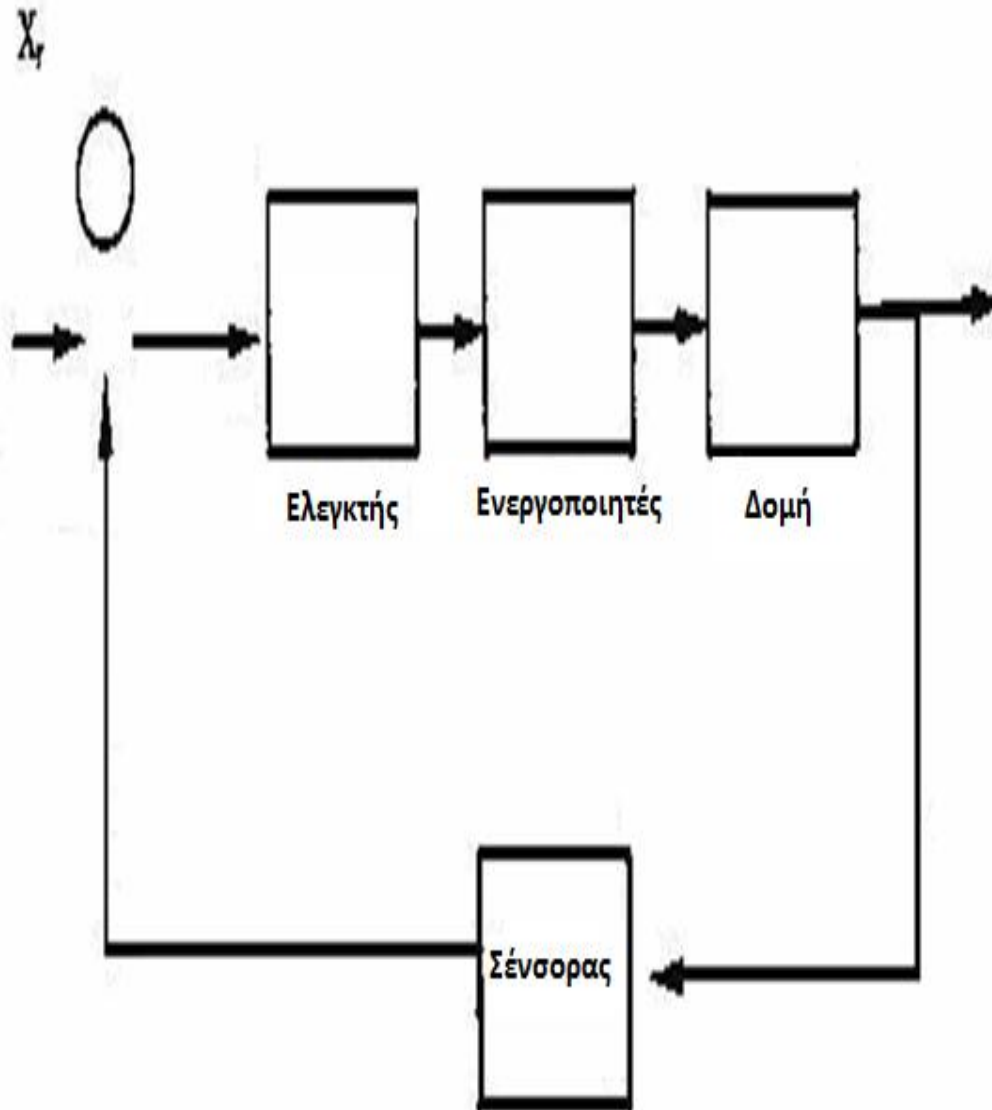
Ως αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι οπτικές ίνες, τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA), τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και οι σκεδαστές Raman. Οι οπτικές ίνες ενσωματώθηκαν στα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας την δεκαετία του 1970 όταν χρησιμοποιήθηκαν, για πρώτη φορά, στις τηλεπικοινωνίες για τη μετάδοση πληροφοριών. Οι ιδιότητές τους δεν υποβαθμίζονται από τη διαδικασία παρασκευής του σύνθετου και είναι ικανές να αντέχουν μεγάλες παραμορφώσεις. Προσφέρουν έτσι τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης της δομής του σύνθετου σε όλα τα στάδια της ζωής του. Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αισθητήρες θερμοκρασίας, μηχανικής παραμόρφωσης και τάσης. Στις ημέρες μας οι οπτικές ίνες μπορούν να φέρουν αισθητήρες Fabry - Perot και φράγματα Bragg (Bragg gratings), με αποτέλεσμα να είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες στα ευφυή σύνθετα υλικά. Τα τελευταία χρόνια γίνονται έρευνες για τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών και κραμάτων μνήμης σχήματος σε εφαρμογές που οι οπτικές ίνες κρίνονται ακατάλληλες.

Οι ενεργοποιητές βρίσκονται και αυτοί είτε στην επιφάνεια του σύνθετου, είτε ενσωματωμένοι στο υλικό αποτελώντας πρόσθετα ή δομικά στοιχεία του συστήματος. Παίρνουν εντολή από το βρόγχο ελέγχου και ανάλογα με τις

λειτουργικές τους ικανότητες αλλάζουν κάποια ιδιότητα του ευφυούς υλικού. Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τέτοιων υλικών από τη βιομηχανία και το στρατό. Συνήθως ως ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται τα κράματα μνήμης σχήματος, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα μαγνητοδιαγνωστικά, τα ηλεκτροροεδιαγνωστικά υλικά και τα ηλεκτροροεολογικά αιώρηματα. Τα υλικά αυτά ανάλογα από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και τον τρόπο παρασκευής της «ευφυούς» δομής τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αισθητήρες/ενεργοποιητές αλλά και ως δομικά στοιχεία.

Στις σύνθετες δομές που περιέχουν αισθητήρες και ενεργοποιητές, τα σήματα λαμβάνονται από τους αισθητήρες, εξηγούνται από ελεγκτές που βασίζονται σε μικροεπεξεργαστές και οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και θέτουν σε κίνηση τους ενεργοποιητές μεταβάλλοντας την απόκριση του υλικού. Στις ημέρες μας έχουν επιτευχθεί δύο είδη ελέγχου, ο έλεγχος σχήματος και ο έλεγχος δόνησης. Ο έλεγχος σχήματος (σχήμα Α.3) αναγνωρίζεται ως ουσιώδες μέσο για τον αποτελεσματικό χειρισμό μιας ευρείας κατηγορίας από εύκαμπτες δομές, όπως αναπτυσσόμενες κεραιές, παραμορφωμένους καθρέφτες και «έξυπνες» πτέρυγες αεροσκαφών ή σκαφών θαλάσσης. Έμφαση δίνεται στη χρησιμοποίηση των μοναδικών χαρακτηριστικών των κραμάτων με μνήμη σχήματος και των πιεζοηλεκτρικών υλικών που μπορούν να απελευθερώσουν την απαραίτητη ενέργεια για τον έλεγχο σχήματος. Ο έλεγχος σχήματος στοχεύει στη μεταβολή και ή στη διατήρηση του σχήματος κρίσιμων κατασκευών, με έναν ελεγχόμενο τρόπο. Ο ενεργητικός έλεγχος που προκύπτει, αντισταθμίζει τις αλλαγές σχήματος ή τις παραμορφώσεις, ως αποτέλεσμα της επίδρασης εξωτερικών διαταραχών. Η ανίχνευση του επιθυμητού σχήματος επιτυγχάνεται διαμέσου της χρήσης επιλεγμένων ζευγών αισθητήρων/ενεργοποιητών, οι οποίοι είναι συνήθως ενσωματωμένοι στο σκελετό της σύνθετης κατασκευής. Η ανάκτηση του σχήματος μιας πόρτας αυτοκινήτου με κοίλωμα είναι ένα παράδειγμα στατικού ελέγχου σχήματος,

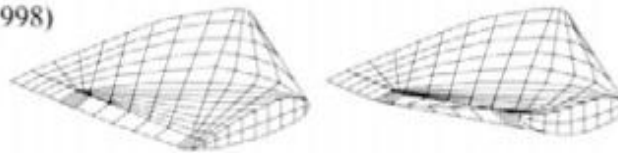
ενώ ο έλεγχος των παραμορφωμένων επιφανειών ενός καθρέφτη είναι ένα παράδειγμα δυναμικού ελέγχου σχήματος.



Σχήμα Α.3 : Διάγραμμα ελέγχου



(Varadarajan et al. 1998)



Undeflected

Deflected

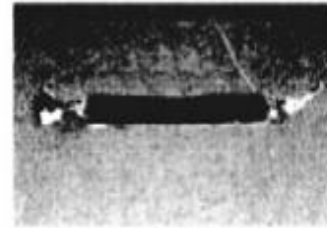
(a) - Σύνθετα κράμματα μνήμης σχήματος (Maclean et al. 1993)



Πριν τη μεταμόρφωση

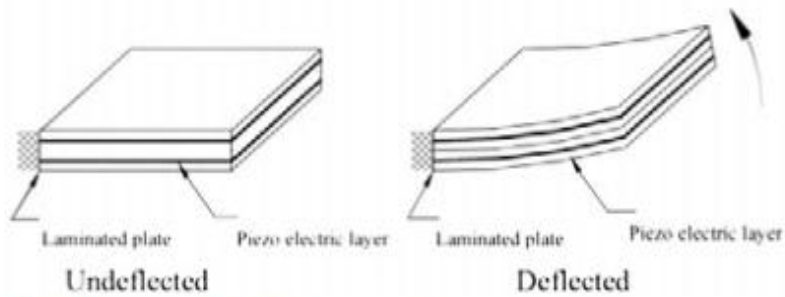


Κατά την μεταμόρφωση

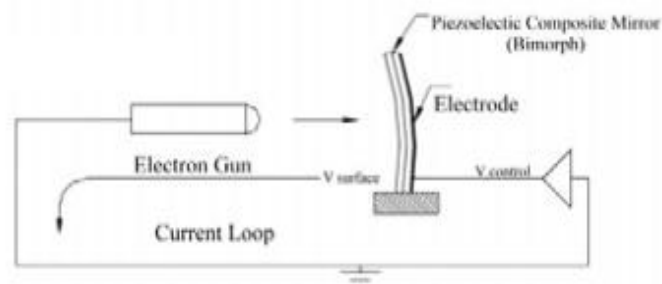


Μετα την μεταμόρφωση

(b) - Σύνθετα πολυμερή μνήμης σχήματος (Baz 1998)



(c)- Πιεζοηλεκτρικά σύνθετα με απανωτές στρώσεις (Varadarajan et al. 1998)



(d) - Ηλεκτροστατικά/πιεζομετρικά σύνθετα (Martin et al. 1998)

**Σχήμα Α.4:** Τυπικά είδη ενεργοποιητών «έξυπνου» ελέγχου σχήματος

### 3.3 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### Θεμελιώδη χαρακτηριστικά

Αυτό το κεφάλαιο, καταρχάς, αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν τα έξυπνα υλικά από τα υπόλοιπα ευφυή υλικά, και συστηματικά μελετά πολλά από αυτά που χρησιμοποιούνται ευρέως. Ξεκινάμε σημειώνοντας ότι τα πέντε θεμελιώδη χαρακτηριστικά , που ορίζονται σαν ενδεικτικά διαχωρισμού ενός έξυπνου υλικού από τα πιο παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική ,ήταν , η παροδικότητα, η επιλεκτικότητα, η αμεσότητα, η αυτό-δραστηριοποίηση και η ευθύτητα. Αν εφαρμόσουμε αυτά τα χαρακτηριστικά στην διάταξη αυτών των υλικών τότε μπορούμε να τα ομαδοποιήσουμε σε:

1. Δυνατότητα μεταβολής ιδιότητας
2. Δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας
3. Αναστρεψιμότητα
4. Διακριτό μέγεθος/θέση

## 1. Μεταβολή ιδιότητας

Αυτά τα υλικά υφίστανται μια μεταβολή στην ιδιότητα ή στις ιδιότητες – χημική, θερμική, μηχανική, μαγνητική, οπτική ή ηλεκτρική – ανταποκρινόμενα στη μεταβολή των συνθηκών τους περιβάλλοντος χώρου του υλικού. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος μπορεί να είναι οι υπάρχουσες ή μπορεί να παραχθούν μέσω ενεργειακής εισροής. Σ’ αυτήν την τάξη συμπεριλαμβάνονται τα υλικά που αλλάζουν χρώμα, όπως τα θερμοχρωμικά, ηλεκτροχρωμικά, φωτοχρωμικά, κ.λπ. στα οποία η εσωτερική ή η εξωτερική επιφάνεια μετατρέπεται μέσω μιας περιβαλλοντικής αλλαγής (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία επιφάνειας) ή μιας εισροής ενέργειας στο υλικό (εναλλασσόμενο ρεύμα, τάση). Αμερικανοί ερευνητές δημιούργησαν στερεά πλαστικά που αλλάζουν χρώμα, όταν βρεθούν υπό καθεστώς μηχανικής πίεσης. Η ανακάλυψη μπορεί να οδηγήσει σε μια νέα γενιά «έξυπνων» πλαστικών, τα οποία θα δίνουν χρωματικό σήμα, όταν είναι έτοιμα να σπάσουν ή θα πυροδοτούν μια χημική αντίδραση αυτομάτως, η οποία θα τους επιτρέπει να σκληραίνουν ξανά μόνα τους στο σημείο που υφίσταται τον μεγαλύτερο κίνδυνο. Τα πλαστικά αυτά έρχονται να προστεθούν σε μια σειρά “έξυπνων” υλικών, τα οποία αντιλαμβάνονται τις αλλαγές του περιβάλλοντος και αντιδρούν ανάλογα. Ήδη οι επιστήμονες έχουν δημιουργήσει αυτό-διορθώμενα πλαστικά, τα οποία φροντίζουν να θεραπεύσουν τυχόν ρωγμές τους, απελευθερώνοντας αυτομάτως έναν καταλύτη, ο οποίος οδηγεί σε αναμόρφωση του πλαστικού, ώστε να κλείσει τη σχισμή. Τέτοια πολυμερή πλαστικά που αλλάζουν χρώμα, στο μέλλον θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επικαλύψεις, από γέφυρες μέχρι και φτερά αεροπλάνων, προειδοποιώντας έγκαιρα τους μηχανικούς σε περίπτωση που ζωτικές δομές βρίσκονται κοντά στο όριο να σπάσουν. Όταν υλικά όπως τα μέταλλα και το μπετόν αρχίζουν να κάμπτονται και να υπόκεινται σε πολύ μεγάλες τάσεις, εμφανίζουν ορατές ρωγμές, οπότε προειδοποιούν τους

μηχανικούς. Το ίδιο δεν συμβαίνει όμως με τα πλαστικά, γι' αυτό άλλωστε η νέα ανακάλυψη αναμένεται να συγκεντρώσει μεγάλο ενδιαφέρον.

## **2. Ανταλλαγή ενέργειας**

Τα υλικά ανταλλαγής ενέργειας μεταβάλλουν την εισροή ενέργειας σε μια άλλη μορφή προκειμένου να παραχθεί ενέργεια σύμφωνα με τον Πρώτο Νόμο της Θερμοδυναμικής( με βάση τον Πρώτο Θερμοδυναμικό Νόμο το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας και του έργου που είτε παράγεται είτε δαπανάται από ένα σύστημα ισούται με το πόσο θερμότητας που εκλύεται ή απορροφάται από το σύστημα αυτό. Δηλαδή:  $Q = \Delta U + W$ .

Παρόλο που η αποτελεσματικότητα της μετατροπής της ενέργειας για τα έξυπνα υλικά όπως τα φωτοβολταϊκά και τα θερμοηλεκτρικά είναι παραδοσιακά πολύ μικρότερη για τις περισσότερες συμβατικές τεχνολογίες, η χρησιμότητα της ενέργειας τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Για παράδειγμα, η άμεση σχέση μεταξύ της εισροής ενέργειας και της παραγωγής ενέργειας καθιστά πολλά από τα έξυπνα υλικά ανταλλαγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των πιεζοηλεκτρικών, πυροηλεκτρικών και φωτοβολταϊκών ως εξαιρετους περιβαλλοντικούς αισθητήρες.

## **3. Αναστρεψιμότητα/κατευθυντήρια γραμμή**

Πολλά από τα υλικά στις δύο παραπάνω τάξεις παρουσιάζουν επίσης είτε το χαρακτηριστικό της αναστρεψιμότητας ή της δι-κατευθυντήριας γραμμής. Πολλά από τα υλικά που μετατρέπουν ηλεκτρισμό μπορούν να αντιστρέψουν τις

μορφές εισροής και παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, πολλά πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα με εφαρμογή πίεσης ή μπορούν να παραμορφωθούν με εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος

#### **4. Μέγεθος/θέση**

Ανεξάρτητα από την τάξη του έξυπνου υλικού, ένα από τα πιο θεμελιώδη χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιεί από τα παραδοσιακά υλικά είναι το διακριτό τους μέγεθος και η δράση του υλικού. Ένα συστατικό ή στοιχείο που περιλαμβάνει ένα έξυπνο υλικό, δε θα είναι μόνο πολύ μικρότερο από μια παρόμοια κατασκευή που είναι φτιαγμένη από πιο παραδοσιακά υλικά, αλλά θα έχει μικρότερες απαιτήσεις για υποστήριξη υποδομής. Το συστατικό που προκύπτει μπορεί μετά να τοποθετηθεί στην πιο αποτελεσματική θέση. Το μικρότερο μέγεθος σε συνδυασμό με την ευθύτητα της μεταβολής ιδιότητας ή της ανταλλαγής ενέργειας εξυπηρετεί αυτά τα υλικά ώστε να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σαν αισθητήρες.

#### **4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ : ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ**

Η τεχνολογική επικράτηση σύνθετων υλικών με ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές σχετίζεται τόσο με τις λειτουργίες που εκτελούν όσο και με τη σταθερότητα της δομής του σύνθετου, που πιθανόν να μειώνεται σημαντικά από την παρουσία προσμίξεων, οι οποίες είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε διάμετρο από ενισχυτικά μέσα όπως οι ίνες άνθρακα, οι

αραμιδικές ίνες, ή οι ίνες γυαλιού που έχουν τυπικές διαμέτρους ~ 8-16  $\mu\text{m}$ . Όταν αισθητήρες απτικών ινών, με διάμετρο 100-300  $\mu\text{m}$ , είναι ενσωματωμένοι σε φύλλα σύνθετου υλικού υπάρχει μια αναπόφευκτη διάρρηξη των ινών ενίσχυσης κοντά στην οπτική ίνα. Η φύση αυτής της διάρρηξης εξαρτάται από τη διάμετρο του ενσωματωμένου αισθητήρα και τον προσανατολισμό της οπτικής ίνας όσον αφορά τις γειτονικές πτυχές ενίσχυσης. Παραδείγματος χάριν, ίνες αίσθησης που βρίσκονται παράλληλα στη τοπική ενίσχυση προκαλούν μια ελάχιστη διάρρηξη με διάμετρο λιγότερο από το μισό πάχος των πτυχών.

Ίνες ενίσχυσης που βρίσκονται ορθογώνια στους αισθητήρες είναι τοπικά παραμορφωμένες. Προκειμένου να είναι αποδεκτός ο αισθητήρας ινών πρέπει:

- (I) να παράγει μια ελάχιστη διαταραχή που να κατανέμεται στις ίνες ενίσχυσης
- (II) να μη μειώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου
- (III) να μην υποστεί βλάβη από τη διαδικασία ενσωμάτωσης, έτσι ώστε η τεχνική αίσθησης να μη μπορεί να εφαρμοστεί και
- (IV) να περιλαμβάνει κατάλληλα μέσα για να εισάγει και να εξάγει το φως του λέιζερ στο σύστημα, μέσω σπειροειδών συνδέσμων ή συνδέσεων. Τέτοια συστήματα πρέπει να είναι συμβατά με την διαδικασία κατασκευής.

Πολλοί παράγοντες πρέπει να ερευνηθούν πλήρως πριν η τεχνολογία αίσθησης εφαρμοστεί σε πραγματικές δομές (π.χ. αεροσκάφη ή διαστημικές κατασκευές). Τέτοιοι είναι, το πως η ίνα επηρεάζει τα χαρακτηριστικά σταθερότητας του σύνθετου, τότε οι αισθητήρες είναι ανθεκτικοί στο περιβάλλον του σύνθετου υλικού, η καλύτερη θέση των αισθητήρων στο σύνθετο, πώς να διαφοροποιήσουμε σημαντικές μεταβλητές, πώς να σχεδιάζουμε αξιόπιστα σχέδια σύνδεσης και μικρογραφημένα συστήματα.

Πολλοί από τους ανωτέρω παράγοντες είναι εξίσου σημαντικοί όσον αφορά την ενεργοποίηση. Η ανάπτυξη των ενεργοποιητών είναι σε λιγότερο προχωρημένο επίπεδο από την ανάπτυξη των αισθητήρων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β

---

### ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ(SMA)



## ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ(SMA)

Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) αποτελούν μια ομάδα μεταλλικών υλικών με τη δυνατότητα να ανακτηθεί ένα προηγουμένως καθορισμένο μήκος ή μια μορφή όταν υποβάλλεται σε ένα κατάλληλο θερμομηχανικό φορτίο . Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, υπάρχει ένα μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον για τη χρήση των SMA σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές.

Αν και μια σχετικά μεγάλη κατηγορία των κραμάτων παρουσιάζει το φαινόμενο μνήμης σχήματος, μόνο εκείνα που μπορούν να ανακτήσουν το σχήμα τους μετά από μια παραμόρφωση προερχόμενη από άσκηση πίεσης είναι εμπορικού ενδιαφέροντος. Ιδιαίτερα σημαντικά μεταξύ αυτών είναι τα κράματα βασισμένα στο *Ni-Ti* και στο *Cu*, όπως το *Cu-\*ZN-\*Al* και το *Cu - Al-Ni*. Τα κράματα αυτά πολύ συχνά χρησιμοποιούνται στις εμπορικές εφαρμογές επειδή συνδυάζουν τις καλές μηχανικές ιδιότητες με τη μνήμη σχήματος.

Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) είναι μέταλλα που «θυμούνται» τις αρχικές μορφές τους. Τα SMA είναι χρήσιμα για εφαρμογές στους ενεργοποιητές που είναι υλικά που αλλάζουν σχήμα, ακαμψία, θέση, φυσική συχνότητα, και άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ή τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι πιθανές χρήσεις των SMA ειδικά ως ενεργοποιητές έχουν διευρύνει το φάσμα πολλών επιστημονικών τομέων. Οι διαφορετικές εφαρμογές για αυτά τα μέταλλα τα έχουν καταστήσει όλο και περισσότερο σημαντικά και γνωστά στον κόσμο.

## 1. ΙΣΤΟΡΙΑ

Οι αξιοπρόσεκτες ιδιότητες των SMA ήταν γνωστές από τη δεκαετία του '30. Το 1932, ο *Chang* και ο *Read* σημείωσαν την αντιστρεψιμότητα του κράματος *Au-Cd* όχι μόνο από τις μεταλλογραφικές παρατηρήσεις, αλλά και από την παρατήρηση των αλλαγών στην ειδική αντίσταση. Το 1938, ο *Greninger* και ο *Mooradian* παρατήρησαν την επίδραση μνήμης σχήματος στα κράματα *Cu-Zn* και *Cu-Sn*.

Εντούτοις, ήταν μόνο στη δεκαετία του '60 που τα SMA προσέλκυσαν κάποιο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Το 1962, ο *Buehler* και οι συνάδελφοι του, του αμερικανικού ναυτικού πυροβολικού εργαστηρίου (*U.S. Naval Ordnance Laboratory*), ανακάλυψαν την επίδραση μνήμης σχήματος σε ένα κράμα *Ni-Ti* το οποίο άρχισε να μαθαίνεται ως *Nitinol*, ως αναφορά στα αρχικά του εργαστηρίου. Η πραγματική ανακάλυψη της μνήμης σχήματος του *Nitinol* έγινε τυχαία. Σε μια συνεδρίαση της εργαστηριακής διαχείρισης, ένα σύρμα *Nitinol* παρουσιάστηκε και κάμφθηκε από την αρχική του μορφή πολλές φορές. Ένας από τους ανθρώπους παρόντες, ο *Δρ Δαβίδ S. Muzzey*, το θέρμανε με τον αναπτήρα του και το σύρμα τεντώθηκε πίσω στην αρχική μορφή του. Ο *Raychem* ανέπτυξε την πρώτη βιομηχανική εφαρμογή των SMA για την αεροναυτική βιομηχανία κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '60. Το 1975, ο *Andreasen*, του πανεπιστημίου του *Iowa*, έκανε το πρώτο μόσχευμα μιας υπερελαστικής ορθοδοντικής συσκευής.

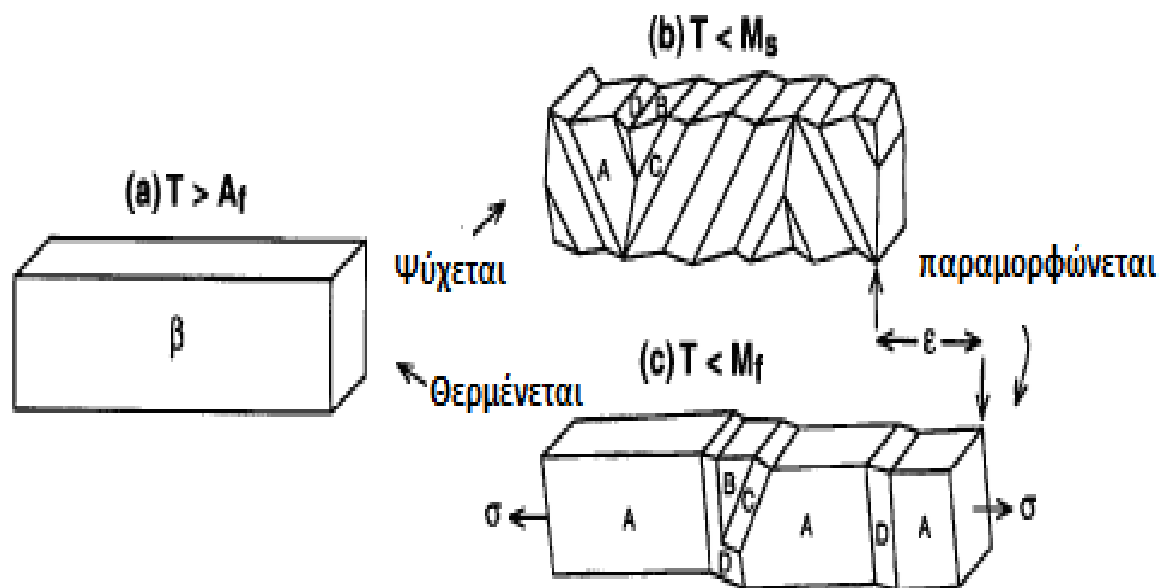
Τα κράματα νικελίου-τιτανίου έχουν βρεθεί να είναι τα πιο χρήσιμα όλων των SMA. Άλλα κράματα μνήμης σχήματος, περιλαμβάνουν το χαλκό-άργιλο-νικέλιο, το χαλκό-ψευδάργυρο-άργιλο, και τα κράματα μαγγανίου-πυριτίου-σιδήρου.

Σήμερα, αυτές οι εφαρμογές αναπτύσσονται στους διαφορετικούς τομείς της επιστήμης και της εφαρμοσμένης μηχανικής.

## 2. ΔΟΜΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

Ακριβώς τι έκανε αυτά τα μέταλλα «να θυμούνται» τις αρχικές μορφές τους, ήταν η ερώτηση μετά από την ανακάλυψη της επίδρασης μνήμη σχήματος. Ο Δρ Frederick E. WANG, ένας εμπειρογνώμονας στη φυσική κρυστάλλου, επισήμανε τις δομικές αλλαγές στο ατομικό επίπεδο που συνέβαλε στις μοναδικές ιδιότητες που έχουν αυτά τα μέταλλα.

Διαπίστωσε ότι το *Nitinol* παρουσίαζε αλλαγές φάσης ενώ ήταν ακόμα στερεό. Αυτές οι αλλαγές φάσης, γνωστές ως μαρτενσίτης και ωστενίτης, «περιλαμβάνουν την αναδιοργάνωση της θέσης των μορίων μέσα στη δομή κρυστάλλου του στερεού» Σχήμα B.1. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, το *Nitinol* είναι στη φάση μαρτενσίτη. Η θερμοκρασία μετάβασης ποικίλλει για τις διαφορετικές συνθέσεις κραμμάτων από περίπου  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε  $166\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στη φάση του μαρτενσίτη, το *Nitinol* μπορεί να καμφθεί σε διάφορες μορφές. Για να καθορίσει τη «γονική μορφή» (όπως ονομάζεται), το μέταλλο πρέπει να διατηρηθεί σε θέση και να θερμανθεί σε περίπου  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι υψηλές θερμοκρασίες «προκαλούν τα άτομα να τακτοποιηθούν στη πιο πιθανή συμπαγέστερη και κανονική μορφή» με συνέπεια μια άκαμπτη κυβική ρύθμιση γνωστή ως φάση ωστενίτη. Επάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης, το *Nitinol* επανέρχεται από το μαρτενσίτη στη φάση του ωστενίτη, που τον αλλάζει πίσω στη γονική μορφή του. Αυτός ο κύκλος μπορεί να επαναληφτεί εκατομμύρια φορές για κάποια κράματα.



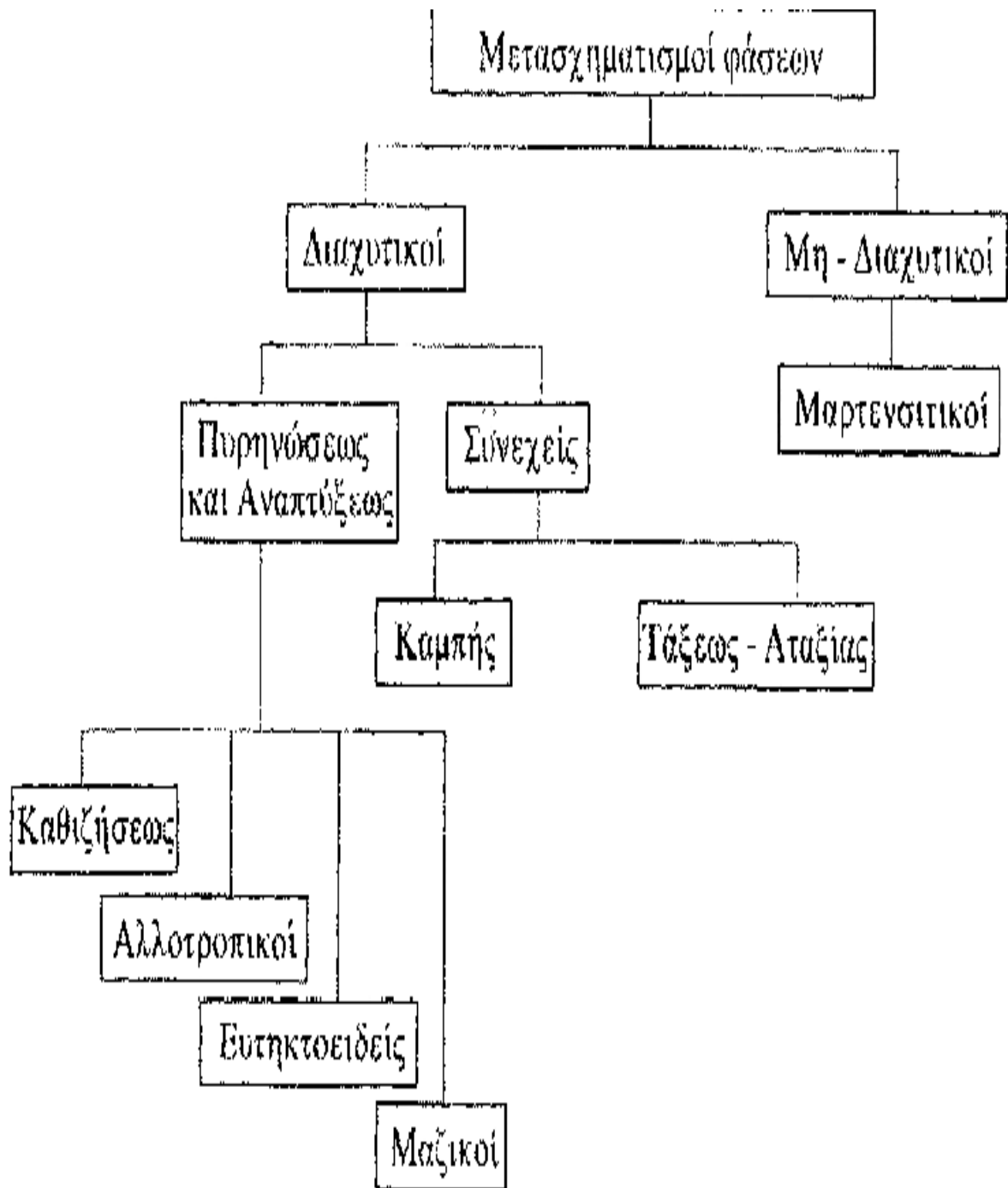
**Σχήμα Β.1 :** (α) Δοκιμαστικό κρύσταλλο φάσης. (β) Αυτοπροσαρμογή των διδυμών , A, B, C, και D, μετά από ψύξη και το μετασχηματισμό του μαρτενσίτη. (γ) Το A γίνεται κυρίαρχο όταν εφαρμόζεται η πίεση. Επάνω στη θέρμανση, το υλικό επανέρχεται στη δοκιμαστική φάση και ανεκτά την αρχική μορφή του.

### 3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ

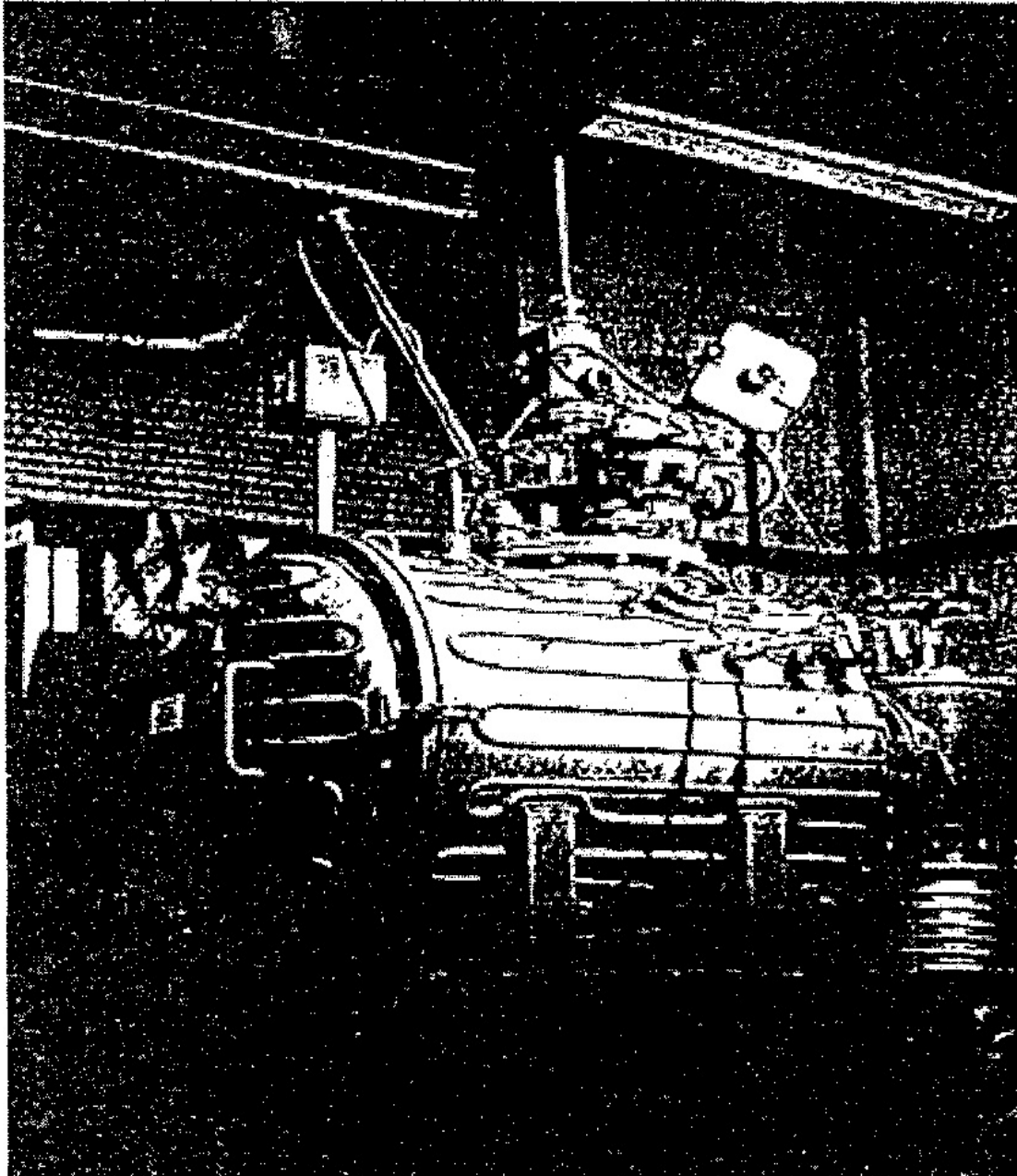
Τα SMA είναι κράματα των οποίων οι ιδιότητες οφείλονται στο μετασχηματισμό φάσης. Είναι λοιπόν αναγκαίο να αναφερθούν κάποια γενικά στοιχεία που αφορούν το μετασχηματισμό φάσης γενικά για όλα τα μέταλλα και ειδικά για τα SMA.

Οι μετασχηματισμοί φάσεων παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη Φυσική Μεταλλουργία, καθώς το σύνολο σχεδόν των βιομηχανικών κραμάτων υφίστανται θερμικές κατεργασίες για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Η θερμική κατεργασία επιφέρει μεταβολή της δομής των κραμάτων είτε μέσω της αποκαταστάσεως και ανακρυσταλλώσεως, είτε μέσω μετασχηματισμού των φάσεων. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μετασχηματισμού φάσεων.

Μία απόπειρα ταξινόμησης τους, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα Β. 1-2. Η πλειονότητα των μετασχηματισμών φάσεων στερεάς κατάστασης πραγματοποιείται με μετακίνηση ατόμων, η οποία ενεργοποιείται θερμικά, δηλαδή με διάχυση. Άλλοι μετασχηματισμοί δεν απαιτούν διαχυτική μετακίνηση ατόμων. Τους μετασχηματισμούς φάσεων διακρίνουμε κατ' αρχήν σε διαχυτικούς (diffusive) και μη διαχυτικούς (non-diffusive). Το πιο χαρακτηριστικό μη διαχυτικών μετασχηματισμών αποτελούν οι μαρτενσιτικοί μετασχηματισμοί, (martensitic transformations) κατά τους οποίους δε συμβαίνει μετακίνηση ατόμων μεγαλύτερη από μία ενδοατομική απόσταση, ενώ τα άτομα διατηρούν την αρχική τους θέση μεταξύ των γειτονικών ατόμων. Στην προκειμένη περίπτωση ο μαρτενσιτικός κρύσταλλος δημιουργείται με παραμόρφωση του μητρικού κρυστάλλου.



Σχήμα Β. 1-2 : Ταξινόμηση των μετασχηματισμών φάσεων.



*Σχήμα Β.2 : Μηχανή παρασκευής SMA και έλεγχου σύστασης και θερμοκρασίας για κράματα Ni-Ti*

Ο κυριότερος τρόπος παραγωγής των SMA είναι η διαδικασία της θερμής διέλασης με πυρροσυσσωμάτωση. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η τήξη των μετάλλων μπορεί να διαφέρει, όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος χύτευσης, ή η μέθοδος που χρησιμοποιεί είτε δέσμη ηλεκτρονίων (electron

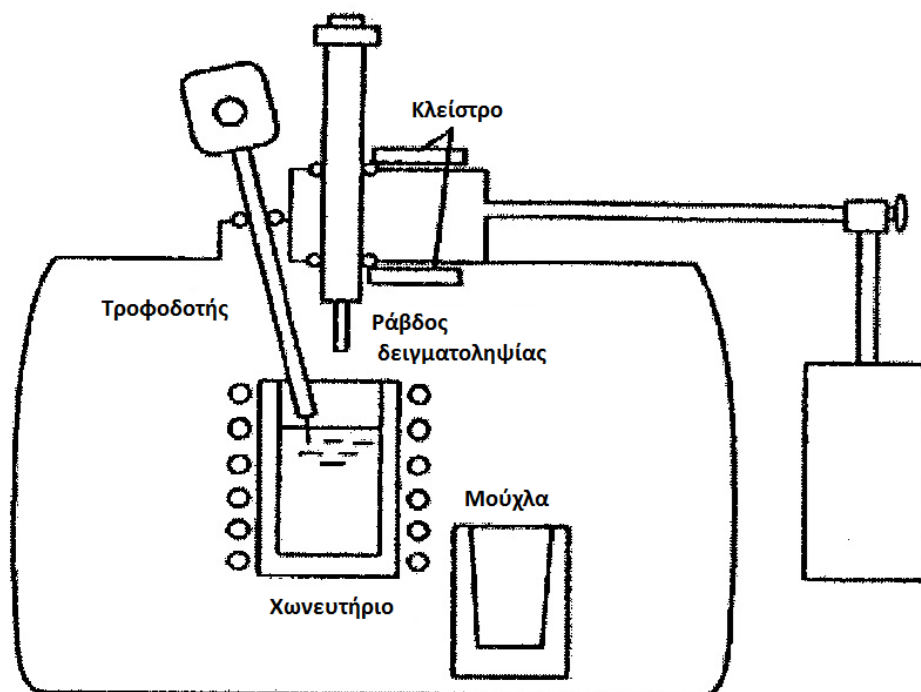
beam melting), είτε ηλεκτρικό τόξο τήξεως (electron arc melting), είτε τόξο πλάσματος (plasma arc melting).

Κατά τη μέθοδο της χύτευσης, για την παρασκευή του κράματος π.χ. νικελίου-τιτανίου, το κράμα τήκεται σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα σε χυτήρια. Εφαρμόζεται μια θερμοκρασία εισαγωγής υψηλής συχνότητας (high frequency induction melting) προκειμένου να επιτευχθεί τήξη των στοιχείων του κράματος. Η τήξη του τιτανίου γίνεται παρουσία ευγενών αερίων μιας και το χυτό τιτάνιο αντιδρά ισχυρά με το οξυγόνο.

Το πρώτο πλεονέκτημα της μεθόδου χύτευσης είναι η ομοιογένεια της χημικής σύστασης. Το προτεινόμενο υλικό που δρα ως καταλύτης είναι ο γραφίτης ή το οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ). Η αλουμίνα και το μαγνήσιο δεν είναι κατάλληλα καταλυτικά υλικά, διότι το οξυγόνο που περιέχουν μολύνει το λιωμένο κράμα. Στην περίπτωση του γραφίτη ως καταλύτη, το οξυγόνο που περιέχεται θεωρείται αμελητέο, αλλά η ποσότητα του άνθρακα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη. Η αναλογία άνθρακα στο λιωμένο κράμα νικελίου-τιτανίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία τήξης. Αν η θερμοκρασία τήξης υπερβαίνει τους  $1996^{\circ}\text{C}$ , η χρησιμοποίηση του γραφίτη ως καταλύτη είναι ανέφικτη. Από την άλλη όμως, το σημείο τήξης του στοιχειομετρικού κράματος νικελίου-τιτανίου είναι περίπου  $1783^{\circ}\text{C}$ , οπότε η διαδικασία χύτευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικά χαμηλές θερμοκρασίες. Άλλο ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορεί να ελεγχθεί η χημική σύσταση του κράματος. Αν για παράδειγμα η διαδικασία γίνει προσεκτικά, η θερμοκρασία  $M_s$  (θερμοκρασία αρχής μαρτενσιτικής φάσης) της ράβδου μπορεί να ελεγχθεί με απόκλιση  $\pm 278^{\circ}\text{C}$ . Για να επιτευχθεί περαιτέρω έλεγχος, έχει κατασκευασθεί ένας κλίβανος όπως δείχνει το σχήμα Β.3, ο οποίος ελέγχει τη σύσταση κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Όπως παρατηρείται το λιωμένο κράμα λαμβάνεται υπό κενό σε θερμοκρασία  $A_f$  (θερμοκρασία τέλους ωστενιτικής φάσης), ενώ κατόπιν



ένα στοιχείο του κράματος προστίθεται έτσι ώστε να προσαρμοστεί η θερμοκρασία στο επιθυμητό  $A_f$  σημείο.



Σχήμα

*B.3 : Μηχανή Έλεγχου σύστασης και θερμοκρασίας κατά την παρασκευή κραμάτων Ni-Ti με μνήμη σχήματος*

Η μέθοδος τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων αξιοποιεί μια δέσμη υψηλής ενέργειας, ως πηγή θέρμανσης. Τα ακατέργαστα μέταλλα λιώνουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας της δέσμης ηλεκτρονίων και κατόπιν πέφτουν σε μήτρα που περιέχει χαλκό ο οποίος έχει ψυχθεί με κυκλοφορία νερού. Το μείγμα σταθεροποιείται ξεκινώντας από το κατώτερο μέρος του καλουπιού και τραβιέται έξω από τον πυθμένα του καλουπιού. Με τη μέθοδο αυτή όμως σχηματίζονται πολλές ακαθαρσίες εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται προκειμένου να τηχθούν τα μέταλλα. Επίσης, η ομοιογένεια της σύστασης στη ράβδο θεωρείται ανεπαρκής, γιατί το κράμα στερεοποιείται μόνο σε μια διεύθυνση κατά μήκος του πυθμένα του καλουπιού. Εξάλλου το γεγονός ότι ένα μέρος των μετάλλων εξατμίζεται λόγω της θέρμανσης σε

υψηλή θερμοκρασία, περιπλέκει τον έλεγχο της σύστασης. Με βάση τα παραπάνω ελαττώματα, η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται για την παρασκευή κραμάτων με μνήμη σχήματος (SMA's) Ni-Ti Νικελίου-Τιτανίου, τα οποία δεν απαιτούν ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας μετασχηματισμού (transformation temperature).

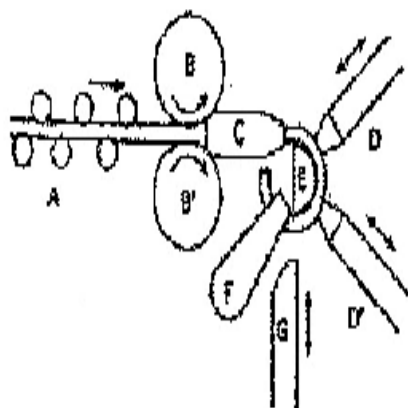
Η μέθοδος τήξεως με τόξο αργκόν (argon arc melting) ταξινομείται σε δυο κατηγορίες (τύπους) ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης. Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιεί μη καταναλώσιμο ηλεκτρόδιο, ενώ ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί καταναλώσιμο ηλεκτρόδιο που περιέχει τα υλικά που θα τηχθούν. Η πρώτη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε εργαστήρια γιατί είναι εφαρμόσιμη σε πολλά είδη κραμάτων. Στη μέθοδο αυτή ακατέργαστα μέταλλα τοποθετούνται σε χάλκινο καλούπι και ακτινοβολούνται από τόξο αργκόν μέσω ενός ηλεκτροδίου κατασκευασμένου από ράβδο βολφραμίου. Όταν το κράμα τηχθεί, το σχήμα του μοιάζει με «κουμπί» εξαιτίας της επιφανειακής τάσης. Το στερεοποιημένο «κουμπί» τήκεται επαναλαμβανόμενα, μέχρις ότου αποκτήσει ομοιογένεια σύστασης. Στη δεύτερη μέθοδο, μέσα σε φούρνο τοποθετείται ένα ηλεκτρόδιο που περιέχει τα ακατέργαστα υλικά. Το ηλεκτρόδιο έχει δυο ρόλους, αρχικά να λειτουργήσει ως πηγή θερμότητας και έπειτα ως πηγή υλικού. Το ηλεκτρόδιο θερμαίνεται από το τόξο αργκόν (argon arc) και το τηγμένο κράμα πέφτει στο καλούπι και διαμορφώνεται ως κυλινδρική ράβδος. Η παραγωγικότητα της δεύτερης μεθόδου σε σχέση με την πρώτη, είναι σαφώς μεγαλύτερη.

Τέλος, η τήξη με τη μέθοδο του πλάσματος, χρησιμοποιεί μια ηλεκτρική δέσμη (electron beam) χαμηλής ταχύτητας που αποφορτίζεται από μια οπή καθόδου πλάσματος (hollow plasma cathode). Συγκρίνοντας με τη μέθοδο της δυνατής ακτινοβολήσης από μια ηλεκτρική δέσμη υψηλής τάσης ή ενός τόξου αργκόν, η ηλεκτρική ακτινοβολήση από την κάθοδο του πλάσματος θεωρείται πιο ήπια μέθοδος. Είναι επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος με την έννοια ότι

χάνεται μόνο μικρή ποσότητα του κράματος. Η διανομή της σύστασης στη ράβδο είναι ομοιόμορφη, παρά τη χρησιμοποίηση νερού που κυκλοφορεί και ψύχει το καλούπι. Η μέθοδος με πλάσμα (plasma) χρησιμοποιεί μια ηλεκτρική δέσμη χαμηλής ταχύτητας, η οποία εκφορτώνεται από την κάθοδο πλάσματος. Σε σύγκριση με τη μέθοδο της δυνατής ακτινοβολήσης από μια ηλεκτρική δέσμη δυνατής τάσης, ή ενός τόξου αργκόν, η ηλεκτρική ακτινοβολήση από την κάθοδο του πλάσματος είναι ηπιότερη. Έτσι, ως αποτέλεσμα θα έχει χαμηλό ποσοστό απωλειών από το κάθε στοιχείο του κράματος. Η διανομή της σύστασης είναι ομοιόμορφη εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιείται καλούπι που ψύχεται με νερό.

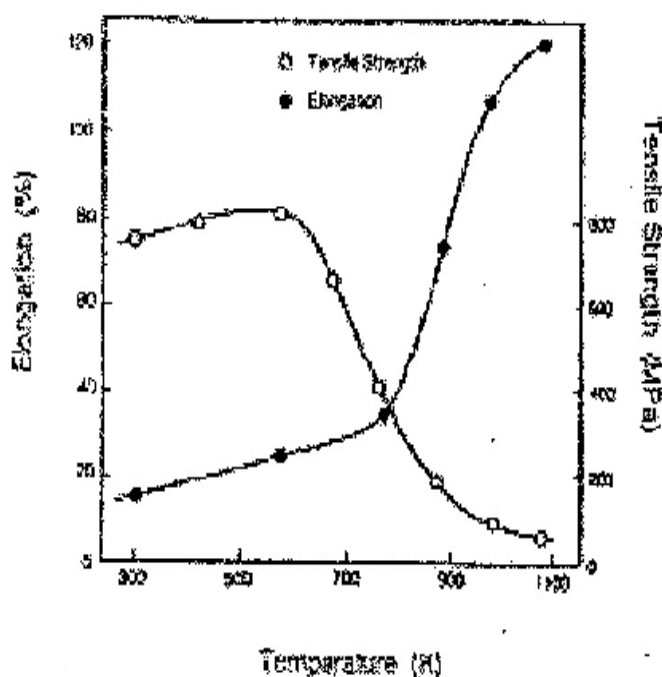
#### 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝ ΘΕΡΜΩ ΚΑΙ ΕΝ ΨΥΧΡΩ

Μετά τη δημιουργία του κράματος ξεκινά η διαμόρφωσή του αφού πάρει το τελικό σχήμα συνήθως ράβδου ή καλωδίου. Αφού απομακρυνθεί η επιφανειακή στρώση, η ράβδος σφυρηλατείται και τυλίγεται μέσα σε μια άλλη ράβδο ή σε πλάκα με κατάλληλο σχήμα.



*Σχήμα Β.4 : Διεργασία κατασκευής κυλινδρικής ράβδου με τη μέθοδο του πλάσματος*

Τα προϊόντα με μορφή ράβδου ή καλωδίου σχηματίζονται με μηχανική κατεργασία, χρησιμοποιώντας κυλιόμενη ράβδο, η οποία έχει ένα ζευγάρι αυλακωτούς κυλίνδρους, όπως δείχνει το *σχήμα Β.4*. Για καλύτερη ομοιομορφία του κράματος κατά τη διαμόρφωση γίνεται απότομη τήξη και στερεοποίηση, όταν η ράβδος ή το καλώδιο περνά μέσα από ένα «δαχτυλίδι», ενώ η διαμόρφωση εν θερμώ γίνεται μέχρι τη διάμετρο των 6mm. Για να κατασκευαστούν καλώδια μικρότερης διαμέτρου, γίνεται διέλαση εν ψυχρώ. Η παρακάτω εικόνα (*σχήμα β.5*) δείχνει την εφελκυστική αντοχή σε συνάρτηση με την επιμήκυνση των κραμάτων Ni-Ti σε υψηλές θερμοκρασίες. Η εφελκυστική αντοχή ξεκινά να μειώνεται στους 873°C ανάλογα με τη σύσταση του κράματος. Συγκρίνοντας με τη διαμόρφωση εν θερμώ, η διαμόρφωση εν ψυχρώ είναι πολύ πιο δύσκολη. Φυσικά, η δυσκολία επεξεργασίας οφείλεται σε ένα μεγάλο ποσοστό στη σύσταση του κράματος. Για παράδειγμα, όσο αυξάνουμε το Ni (νικέλιο) στη σύσταση τόσο δυσκολότερη γίνεται η διαμόρφωση του κράματος. Πιο συγκεκριμένα, η ικανότητα διαμόρφωσης γίνεται δύσκολη όταν το Ni υπερβαίνει το 51% στη σύσταση του κράματος. Το κράμα διαμορφώνεται εύκολα πάνω από τους 1073 °C. Αν και η ικανότητα επεξεργασίας του κράματος Ni-Ti είναι μεγαλύτερη σε υψηλές θερμοκρασίες, η επιφάνεια του κράματος είναι ανομοιογενή με μεγάλη τραχύτητα, εξαιτίας της οξείδωσης. Έτσι, η προτεινόμενη θερμοκρασία θέρμανσης για διαμόρφωση εν θερμώ, είναι περίπου 1346°C.

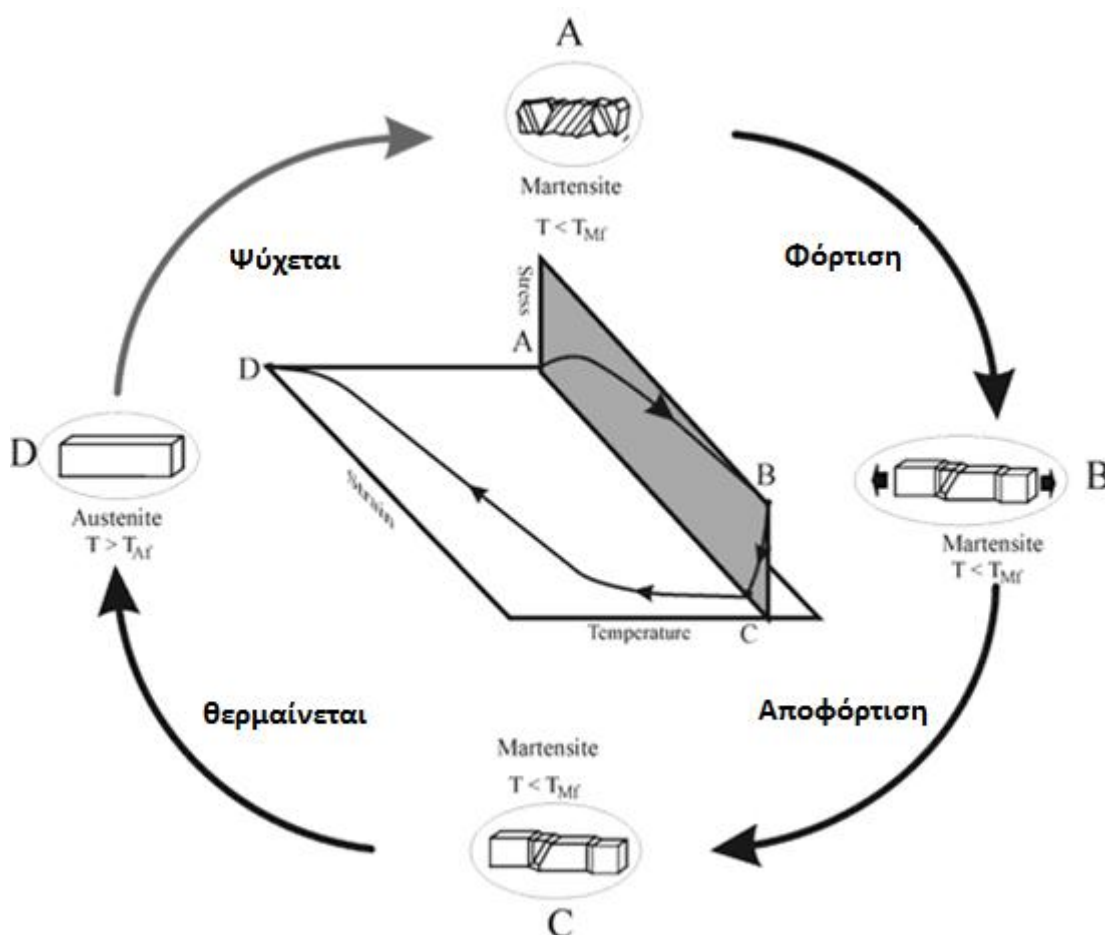


*Σχήμα Β.5 :* Εφελκυστική αντοχή κραμάτων Ni-Ti σε συνάρτηση με την επιμήκυνση σε υψηλές θερμοκρασίες

## 5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

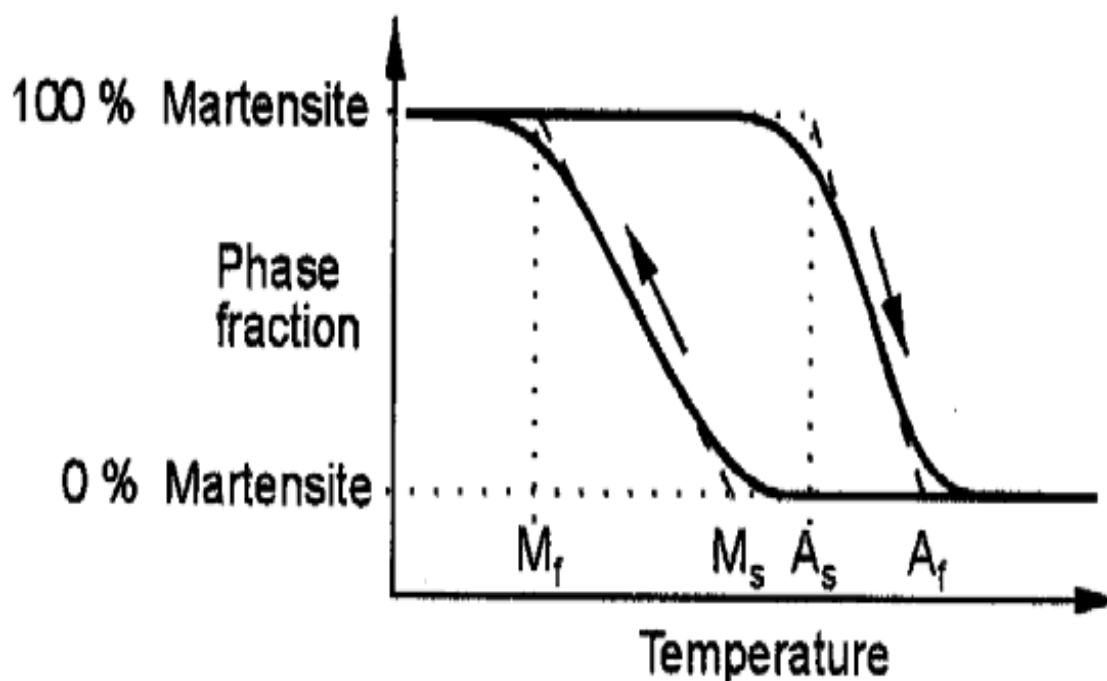
Το φαινόμενο μνήμης σχήματος (shape memory effect) έγκειται στη δυνατότητα ενός κράματος να ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις μέσα από έναν κύκλο που περιλαμβάνει ψύξη-παραμόρφωση-θέρμανση με την ταυτόχρονη παραγωγή μηχανικού έργου. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος (SME) βασίζεται σε έναν αντιστρεπτό κρυσταλλογραφικό μετασχηματισμό μεταξύ δυο φάσεων και τα κράματα που το εμφανίζουν βρίσκονται, ανάλογα με τη θερμοκρασία, είτε σε ωστενιτική κρυσταλλική κατάσταση σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε σε μαρτενσιτική σε χαμηλές θερμοκρασίες. Με ψύξη μεταπίπτουν από μια σχετικά υψηλής τάξης κρυσταλλογραφική κατάσταση (ωστενιτική), σε μια χαμηλότερης τάξης κρυσταλλογραφική κατάσταση τη μαρτενσιτική, ενώ με θέρμανση

μεταπίπτουν από τη μαρτενιτική στην ωστενιτική αφού προηγουμένως έχει προηγηθεί παραμόρφωση του υλικού. Όπως ήδη αναφέρθηκε για τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες χρησιμοποιούμε τους εξής συμβολισμούς:  $T_{As}$ ,  $T_{Af}$ ,  $T_{Ms}$  και  $T_{Mf}$ . Με s και f συμβολίζουμε την αρχή και το τέλος του κάθε μετασχηματισμού αντίστοιχα και με A τον ωστενίτη και M τον μαρτενσίτη. Ισχύει  $T_{Af} > T_{As} > T_0 > T_{Ms} > T_{Mf}$ , όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία στην οποία οι δύο φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία. Οι τιμές αυτών των θερμοκρασιών μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με τη σύσταση των κραμάτων και τη διαδικασία παρασκευής τους.



Σχήμα Β.6 : Φαινόμενο Μνήμης Σχήματος (SMA)

Η εξέλιξη των μετασχηματισμών ελέγχεται από τη διαφορά των ελεύθερων ενεργειών μαρτενσίτη και ωστενίτη. Έτσι, η όλη διεργασία εξαρτάται από τη μεταβολή στη χημική, στην επιφανειακή και στην ελαστική συνιστώσα της ελεύθερης ενέργειας, που επάγεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η ελαστική συνεισφορά και η παρουσία δυνάμεων τριβής μεταξύ των κινούμενων διεπιφανειών, καθώς και η δημιουργία ατελειών, είναι οι κύριοι λόγοι για την εμφάνιση καμπύλης υστέρησης μεταξύ του ευθέως και του αντιστρόφου μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η υστέρηση που παρατηρείται στα κράματα SMA παρουσιάζει δύο βασικά χαρακτηριστικά: (α) θεωρείται στατική, δηλαδή μεταξύ κάποιων ορίων είναι ανεξάρτητη του ρυθμού μεταβολής της παραμέτρου που ελέγχει το μετασχηματισμό (θερμοκρασίας ή τάσης) και (β) επιδεικνύει συνολική μνήμη, δηλαδή ο μετασχηματιζόμενος όγκος για μία συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας ή τάσης καθορίζεται από τη διαδρομή που ακολουθήθηκε.

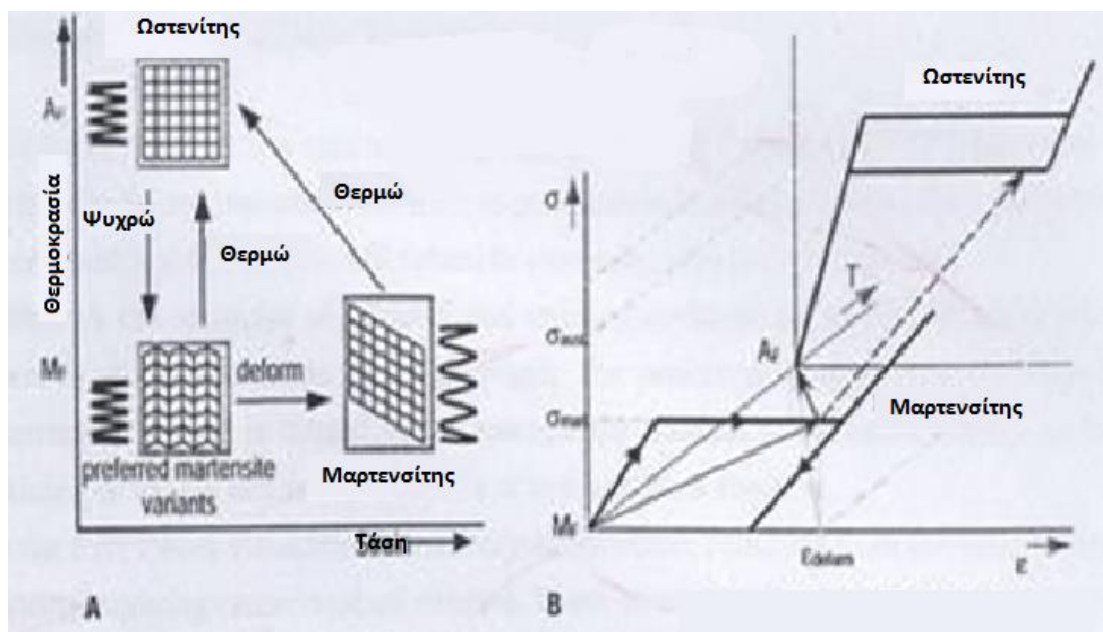


*Σχήμα Β.7 : Χαρακτηριστικός βρόγχος υστέρησης των μετασχηματισμών*

Τα κράματα SMA έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούνται ως πηγές ανάπτυξης μηχανικών τάσεων. Έτσι αν εμποδίσουμε π.χ. ένα δοκίμιο SMA με τη μορφή λεπτού σύρματος, που βρίσκεται στη μαρτενσιτική κατάσταση και έχει παραμορφωθεί μόνιμα να ανακτήσει το αρχικό του μήκος, τότε αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις που μπορούν να φτάσουν ως τα  $700-800 \text{ MPa}$  [Kelly, 2000]. Οι τάσεις αυτές ασκούνται στο υλικό, που παρεμποδίζει την ανάκτηση του σχήματος και θεωρούνται πολύ υψηλές, ειδικά αν συγκριθούν με την τάση διαρροής στη μαρτενσιτική φάση που είναι ίση περίπου με  $80 \text{ MPa}$  [Kelly, 2000]. Για τα σύνθετα υλικά με προτανυσμένα κράματα με μνήμη σχήματος, η μήτρα του συστήματος παίζει το ρόλο του υλικού που παρεμποδίζει την ανάκτηση του αρχικού σχήματος των SMA κατά τη θέρμανσή τους. Μελέτες έχουν δείξει πως ο βαθμός προτάνυσης των κραμάτων με μνήμη σχήματος (SMA) σχετίζεται με το επίπεδο των αναπτυσσόμενων τάσεων.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι δυνατόν να λάβει χώρα και με επιβολή τάσης σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $TMs$ . Ο μαρτενσίτης που σχηματίζεται με τον τρόπο αυτό αποκαλείται *SIM (Stress Induced Martensite)* και η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υπερελαστικών (*superelastic*) υλικών. Κατά το φαινόμενο μνήμης σχήματος δύο Κατευθύνσεων (*Two Way Shape Memory Effect, TWSME*), το κράμα μεταβάλλει το σχήμα του, κυκλικά, μόνο με αλλαγή της θερμοκρασίας, χωρίς ενδιάμεση παραμόρφωση. Το υλικό που αρχικά βρίσκεται σε ωστενιτική κρυσταλλογραφική κατάσταση, ψύχεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη της  $TM_f$  οπότε μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Στη θερμοκρασία αυτή παραμορφώνεται το SMA. Κατά την παραμόρφωση του υλικού, αυτό εκπαιδεύεται κατάλληλα έτσι ώστε μετά την παραμόρφωση να «θυμάται» το σχήμα του και στην μαρτενσιτική κατάσταση, οπότε η αλλαγή του σχήματος να συμβαίνει μόνο με μεταβολή της θερμοκρασίας.





*Σχήμα Β.8 : (Α) Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της μνήμης σχήματος σε μικροσκοπική (σε επίπεδο κρυστάλλου) και μακροσκοπική κλίμακα (ελατήριο)*

## Τρόποι εκπαίδευσης κραμάτων με μνήμη σχήματος

- Μέθοδος  $1_{\eta}$ : Θέρμανση και ψύξη υπό σταθερή τάση

Το δοκίμιο παραμορφώνεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από  $M_F$ . Διατηρώντας την τάση σταθερή το δοκίμιο θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από την  $A_F$  και ψύχεται ξανά σε θερμοκρασία χαμηλότερη από της  $M_F$ . Ο κύκλος επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.

- Μέθοδος  $2_{\eta}$ : Θέρμανση και ψύξη του δοκιμίου υπό σταθερή Παραμόρφωση

Το δοκίμιο παραμορφώνεται σε θερμοκρασία  $A_F$  έως το τέλος του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης. Στη συνέχεια κρατώντας σταθερή την παραμόρφωση το δοκίμιο ψύχεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την  $M_F$  και

θερμαίνεται ξανά σε θερμοκρασία υψηλότερη από την  $A_F$ . Ο κύκλος επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.

- *Μέθοδος 3<sub>η</sub>: Ψύξη, παραμόρφωση στη μαρτενσιτική φάση και στη συνέχεια θέρμανση*

Το δοκίμιο παραμορφώνεται έως το ανακτώμενο όριο παραμόρφωσης σε θερμοκρασία χαμηλότερη της  $M_F$ . Στη συνέχεια απομακρύνεται και το δοκίμιο σταθεροποιείται και θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από την  $A_F$  και στη συνέχεια ψύχεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την  $M_F$ . Ο κύκλος επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.

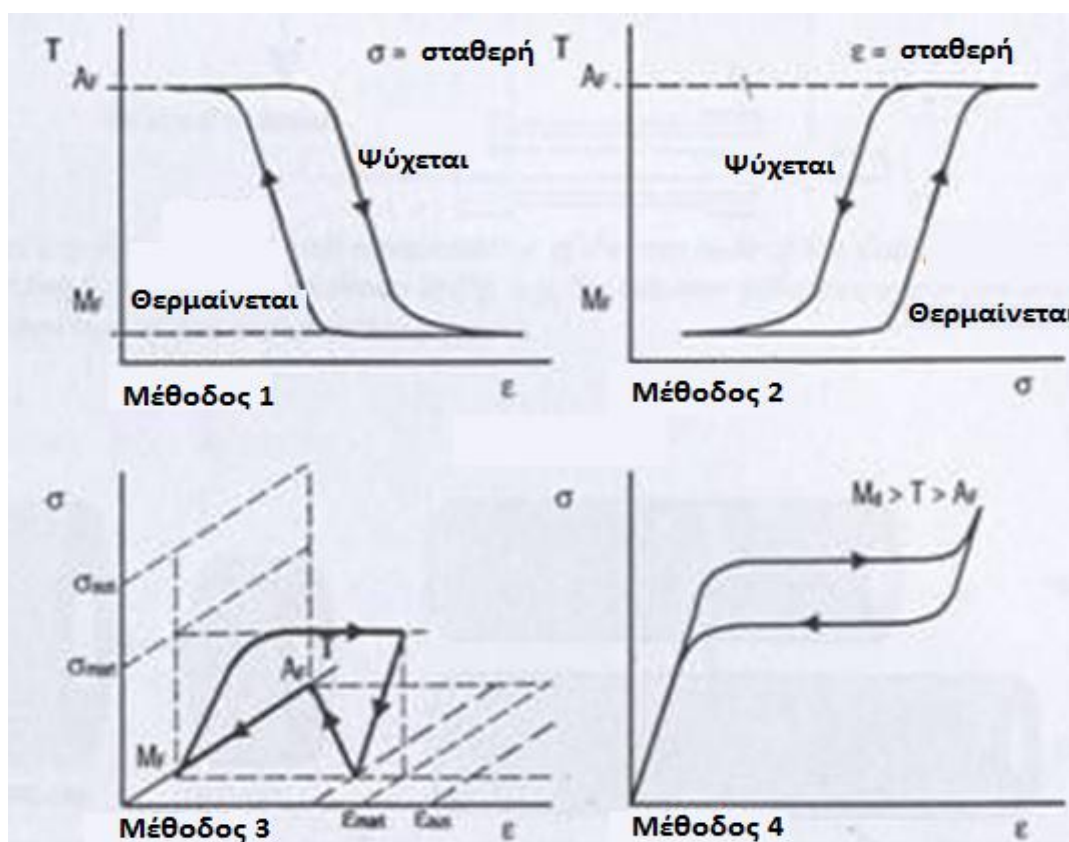
- *Μέθοδος 4<sub>η</sub>: Ψευδό – Ελαστικός κύκλος*

Το δοκίμιο διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία μεταξύ των  $A_F$  και  $M_d$ . Στη συνέχεια το δοκίμιο παραμορφώνεται έως το ανακτώμενο όριο παραμόρφωσης ώστε να δημιουργηθεί λόγω επιβολής τάσης μαρτενσίτης. Έπειτα άρτε η επιβολή φορτίου και το δοκίμιο επιστρέφει σε ωστενίτη. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται αρκετές φορές.

Αν και η αμφίδρομη και χωρίς ανάγκη εξωτερικού αιτίου για την επιστροφή στο αρχικό του σχήμα συμπεριφορά με μνήμη σχήματος, όπως και οι μέθοδοι εκπαίδευσης είναι γνωστές εδώ και ένα μεγάλο χρονικό διάστημα υπάρχουν ακόμα πολλές συζητήσεις για το τελικό αποτέλεσμα: τόσο η χωροταξική τοποθέτηση όσο και ο προσανατολισμός που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι αποτέλεσμα των παραμενουσών τάσεων λόγω της εκπαίδευσης του ή λόγω του ότι παραμένουν κρύσταλλοι σε μαρτενσιτική φάση σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία  $A_F$ .

Με βάση την πρώτη θεωρία οι καταναγκασμοί στο κρυσταλλικό πλέγμα είναι αποτέλεσμα της θερμό-μηχανικής εκπαίδευσης ως αποτέλεσμα των παραμενουσών τάσεων. Αυτές οι τάσεις αύξησης των ατόμων σε ορισμένες περιοχές και η προτιμώσα αύξηση των κρυστάλλων ποικίλει. Επειδή η χαλάρωση είναι αποτέλεσμα της αλλαγής του σχήματος, οι τάσεις μειώνονται παρά πολύ γρήγορα. Η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των κρυστάλλων που έχουν μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτες κατά τη διάρκεια της ψύξης, θα συνεχιστεί χωρίς την παρουσία τάσης.

Η δεύτερη θεωρία, αξιώνει ότι υπάρχουν παραμένοντα μαρτενσιτικά άτομα, που παραμένουν μέσα σε ωστενιτικούς κρυστάλλους. Οι τάσεις λόγω της εκπαίδευσης, επιτρέπουν σε αυτές τις μαρτενσιτικές παραλλαγές να υπάρχουν σε θερμοκρασίες υψηλότερες από την  $A_F$ . Κατά τη διάρκεια της ψύξης, αυτές οι μαρτενσιτικές παραλλαγές αυξάνονται κατά τη διαμόρφωση των νέων μαρτενσιτικών παραλλαγών.



Σχήμα Β.9 : Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων μεθόδων εκπαίδευσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ

---

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (SMA)

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα μελετήσουμε τις ιδιότητες που είναι χαρακτηριστικές των υλικών με μνήμη σχήματος (SMA). Αρχίζουμε με την εξέταση των μεταλλουργικών ιδιοτήτων από μικροσκοπικό επίπεδο, για να εξηγηθεί πώς οι αλλαγές φάσης που παρατηρούμε μικροσκοπικά επιφέρουν την επίδραση μνήμης σχήματος που παρατηρούμε μακροσκοπικά. Εξηγούμε έπειτα τις χαρακτηριστικές παραμέτρους που έχουν επιπτώσεις στη φυσική απόδοση του κράματος, όπως η πίεση, η τάση, και η ανόπτηση.

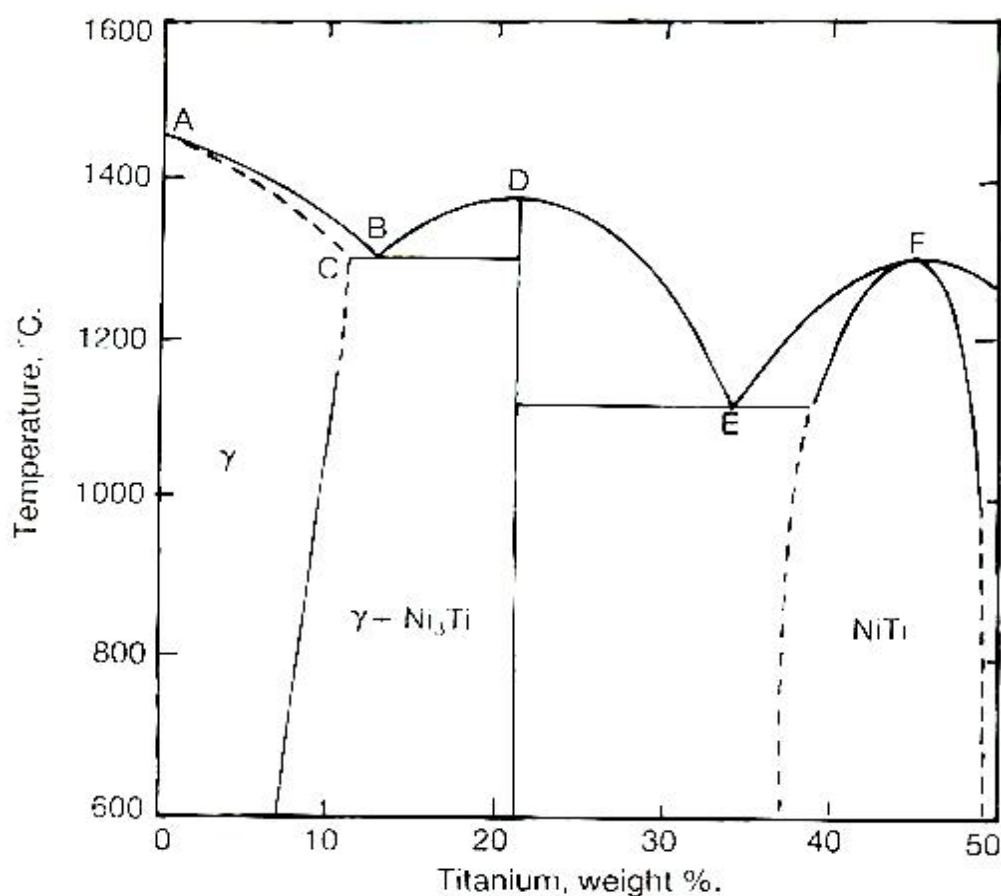
Δύο κύρια χαρακτηριστικά προσδιορίζουν τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA), φαινόμενο μνήμης σχήματος και ψευδοελαστικότητα. Με την εκπαίδευση των SMA σε μια δεδομένη θερμοκρασία, μπορούν να απομνημονεύσουν μια συγκεκριμένη διαμόρφωση, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω της αλλαγής θερμοκρασίας ή μέσω του εξωτερικά εφαρμοσμένου φορτίου. Μπορούν μετά από άσκηση μεγάλης τάσης, να υποστούν μόνιμη πλαστική παραμόρφωση, και να ανακτήσουν το αρχικό μήκος τους μετά από θέρμανση.

### 1. ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

Ένας μετασχηματισμός αντιστρέψιμης στερεάς φάσης γνωστός ως μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από τα κράματα μνήμης σχήματος. Όταν τα άτομα νικελίου και τιτανίου είναι παρόντα στο κράμα, σε μια δεδομένη αναλογία, το υλικό διαμορφώνει μια δομή

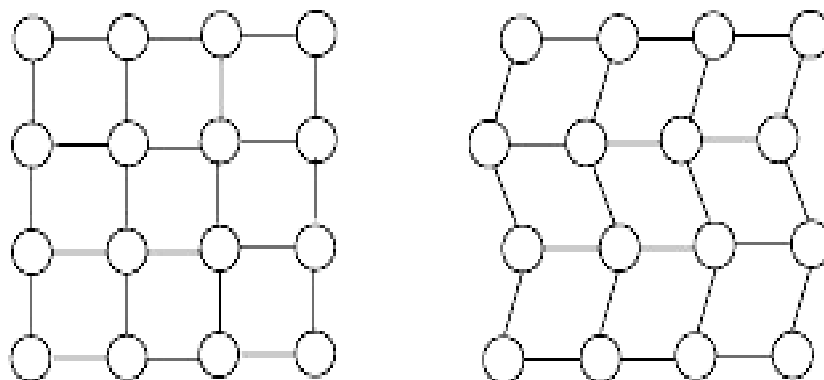
κρυστάλλου, η οποία είναι σε θέση να τεθεί σε αλλαγή από μια μορφή δομής κρυστάλλου σε άλλη.

Το 1965, ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας δόθηκε στους μεταλλουργούς Buehler και Ουίλι για την ανάπτυξη της σειράς κραμάτων *NiTi*. *55-Nitinol* ήταν το όνομα που δόθηκε στο κράμα. Τα 55 αναφέρονται στη σύνθεση ποσοστού νικελίου στο κράμα. Το χαρακτηριστικό κράμα τιτανίου νικελίου περιέχει το νικέλιο από 49 έως 57 τοις εκατό. Η σύνθεση του *Nitinol*, όπως φαίνεται στο διάγραμμα νικέλιο-τιτάνιο *σχήμα Γ.1*, έχει μια σύνθεση τιτανίου που ποικίλλει από 0 σε 50%, αλλά η ιδανική σύνθεση *Nitinol* μπορεί μόνο να ποικίλει μεταξύ 38% και 50% σε βάρος. Μόνο αυτή η σύνθεση *Nitinol* κατέχει τα χαρακτηριστικά μνήμης σχήματος.



*Σχήμα Γ.1 : Διάγραμμα φάσης νικελίου-τιτανίου*

Η μετάβαση από μια μορφή κρυσταλλικής δομής σε άλλη δημιουργεί ένα μηχανισμό με τον οποίο η αλλαγή σχήματος εμφανίζεται στα SMA. Αυτή η αλλαγή περιλαμβάνει τη μετάβαση από μια μονοκλινική μορφή κρυστάλλου (μαρτενσίτης) σε μια κυβική μορφή κρυστάλλου (ωστενίτης) *σχήμα Γ.2*. Η φάση του ωστενίτη είναι σταθερή σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ο μαρτενσίτης είναι σταθερός στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα παρακάτω διαγράμματα είναι δισδιάστατες αντιπροσωπεύσεις των δομών κρυστάλλου ωστενίτη και μαρτενσίτη.



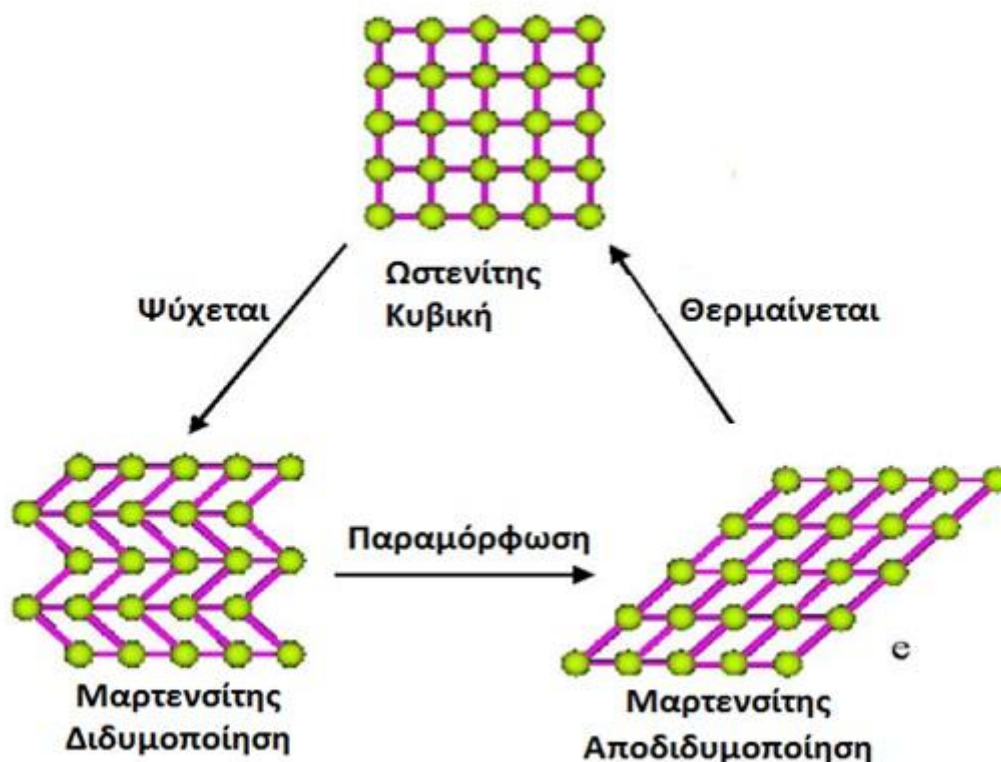
*Σχήμα Γ.2*

*(a): Κυβική δομή του Ωστενίτη*

*(b) Δομή πλέγματος μαρτενσίτη. Εμφάνιση Διδυμιών*

Στη φάση του μαρτενσίτη, τα άτομα προσανατολίζονται στις σειρές που είναι δημιουργημένες αριστερά ή δεξιά. Οι διδυμίες μαρτενσίτη, είναι σε θέση να κατευθύνουν τον προσανατολισμό τους, σε μια απλή διαχωριστική κίνηση, σε αντίθετη κλίση, που δημιουργεί μια συνεταιριστική μετακίνηση των μεμονωμένων διδυμιών. Αυτό οδηγεί σε μια μεγάλη γενική παραμόρφωση.

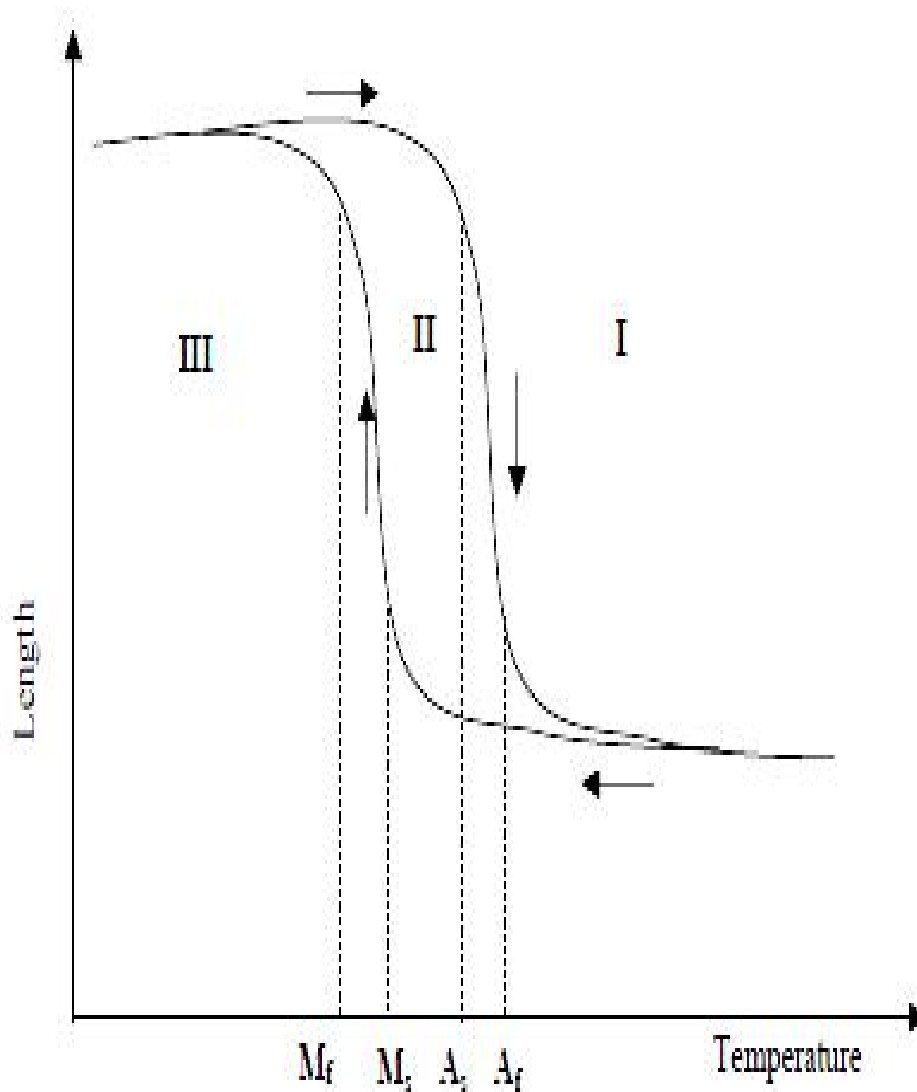
Η θέρμανση ενός παραμορφωμένου SMA αναγκάζει τα άτομα να αναδιαμορφωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε το δικτυωτό πλέγμα του μαρτενσίτη να αρχίσει να ανακτά τη μορφή του. Το *σχήμα Γ.3* παρουσιάζει αυτήν τη διαδικασία μνήμης σχήματος. Στα συνηθισμένα μέταλλα, η παραμόρφωση που εμφανίζεται γίνεται με μετακίνηση των ατόμων σε μια απροσδιόριστη νέα θέση κρυστάλλου με συνέπεια την μη αντιστρεψιμότητα της παραμόρφωσης, άρα και την μόνιμη ζημιά/αλλαγή στην κρυσταλλική δομή. Αντίθετα από τα κανονικά μέταλλα, η δυνατότητα για «επιστρέψιμη» (μνήμη σχήματος) παραμόρφωση στην κρυσταλλική δομή των SMA, πραγματοποιείται μέσω παρουσίας διδυμιών, οι οποίες δεν προκαλούν μόνιμη ζημιά στην κρυσταλλική δομή. Στη φάση του μαρτενσίτη οι διδυμίες μπορούν να ανακτήσουν σε κάποιο βαθμό την αρχική κρυσταλλική τους δομή *σχήμα Γ.3*. Για να εμφανιστεί μία πλήρης αποκατάσταση μορφής, η διαδικασία παραμόρφωσης δεν πρέπει να περιλάβει την ολίσθηση, επειδή η ολίσθηση είναι μια αμετάκλητη διαδικασία.



*Σχήμα Γ.3 : Η διαδικασία επίδρασης μνήμης σχήματος*

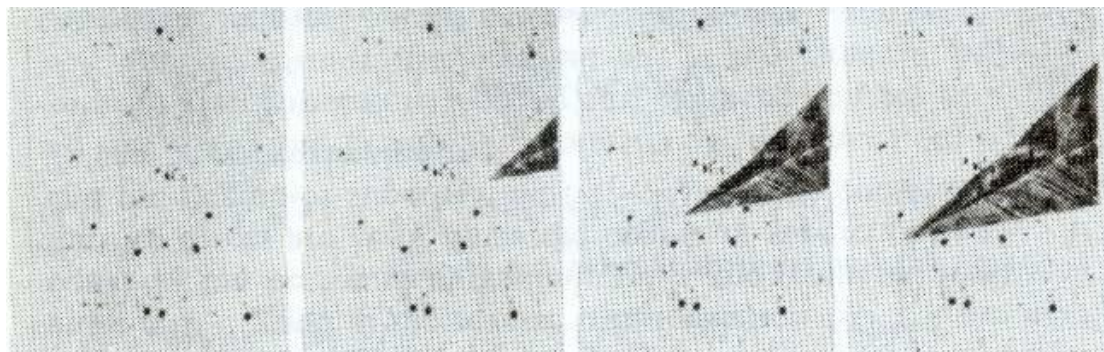


Όταν ένα SMA είναι στη φάση του ωστενίτη, παρουσιάζει μια ιδιαίτερα ελαστική συμπεριφορά. Αυτό επιτρέπει στο υλικό να παραμορφωθεί μέχρι 7% και έπειτα να ανακτήσει πλήρως την προκύπτουσα τάση αφαιρώντας το φορτίο. Αυτή η συμπεριφορά είναι γνωστή ως ψευδοελαστική συμπεριφορά ή ψευδοελαστικότητα. Η παραμόρφωση ενός ψευδοελαστικού υλικού οδηγεί στο σχηματισμό ενός κρυστάλλου μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης που διαμορφώνεται σε αυτόν τον μετασχηματισμό καλείται μαρτενσίτης λόγω τάσης ενεργοποίησης (*stress-induced*). Ακόμα κι αν η ψευδοελαστικότητα είναι σημαντικό χαρακτηριστικό των SMA, τυπικές εφαρμογές αυτών των υλικών απαιτούν τη χρήση της επίδρασης μνήμης σχήματος, η οποία είναι ένα αποτέλεσμα που προκαλείται από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού. Η τιμή αυτής της θερμοκρασίας μετασχηματισμού εξαρτάται από τη σύνθεση του κράματος. Στην πραγματικότητα, αυτή η θερμοκρασία είναι προσαρμοσμένη από  $1000^{\circ}\text{C}$ . Ο θερμικά-προκληθείς μετασχηματισμός των SMA εμφανίζεται σε τρία στάδια. Η θέρμανση ενός δείγματος κραμάτων μνήμης σχήματος προκαλεί το μετασχηματισμό της χαμηλής θερμοκρασίας φάσης (iii) στην ενδιάμεση φάση (ii), έπειτα στην υψηλής θερμοκρασίας φάση (i). Όπως καταδεικνύεται στο *σχήμα Γ.4*, "η θερμοκρασία μετασχηματισμού" δεν υπάρχει σαν μια ενιαία θερμοκρασία, αλλά σαν ένα σύνολο θερμοκρασιών, οι οποίες καλούνται χαρακτηριστικές θερμοκρασίες.



*Σχήμα Γ.4 : Χαρακτηριστική πίεση μετασχηματισμού εναντίον της καμπύλης θερμοκρασίας.  $M_f$ ,  $M_s$ ,  $A_s$  και  $A_f$  σημαίνουν 'τέλος μαρτενσίτη', αρχή μαρτενσίτη' και αντίστοιχα οι θερμοκρασίες για των ωστενίτη*

Το σχήμα Γ.5 παρουσιάζει μία ενδιαφέρουσα όψη ενός κρυστάλλου που υποβάλλεται σε φυσική αλλαγή λόγω ψύξης σε μικροσκοπικό επίπεδο.



*Σχήμα Γ.5: Οπτικά μικρογραφήματα της αύξησης ενός κρυστάλλου SMA λόγω της ψύξης*

Το επόμενο σημείο χαρακτηριστικής θερμοκρασίας μετασχηματισμού είναι η έναρξη της φάσης του ωστενίτη και το τέλος της φάσης αυτής,  $A_s$  και  $A_f$  αντίστοιχα. Η φάση του ωστενίτη αρχίζει καθώς ένα SMA θερμαίνεται περίπου στην  $A_s$ . Μια άκαμπτη, σκληρή, (πρόσωπο-κεντροθετημένη) κυβική δομή κρυστάλλου αρχίζει, και ο μετασχηματισμός είναι πλήρης στη θερμοκρασία  $A_f$ . Όταν ένα δείγμα SMA θερμαίνεται πέρα από τα  $A_f$ , θα οδηγηθεί σε μια πλήρη ατομική αποκατάσταση. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την επίδραση μνήμης σχήματος. Μια πλήρης αποκατάσταση μορφής λέγεται ότι συμβαίνει όταν επιστρέφει ένα SMA σε μια φάση που είναι ίδια με την αρχική φάση.

## **2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ( $NiTi$ )**

Γενικά, υπάρχουν δύο βασικές μηχανικές απαιτήσεις για το υλικό και το σχεδιασμό των μηχανισμών. Οι μηχανικές ιδιότητες του  $NiTi$  εξαρτώνται από την φάση στην οποία βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Οι κοινές μηχανικές ιδιότητες του μαρτενσίτη και του ωστενίτη του  $NiTi$  παρουσιάζονται στον (πίνακα Γ.1). Το  $NiTi$  έχει την ιδιότητα να αποσβένη και να μειώνει την

δόνηση σημαντικά κάτω από το  $A_s$ . Για παράδειγμα, όταν μια μπάλα Μαρτενσίτη πέσει από ένα ύψος, αναπηδά μόνο κατά το μισό ύψος που θα αναπηδούσε μια αντίστοιχη μπάλα που θα έπεφτε εάν βρισκόταν σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία  $A_f$ . Αυτό συμβαίνει διότι όταν το NiTi βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της  $A_f$  παρουσιάζει υπερελαστικότητα. Ο χαμηλός ελαστικός συντελεστής του *NiTi* μπορεί να παρέχει οφέλη σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Το *NiTi* έχει μοναδικές όλκιμες ιδιότητες, οι οποίες συσχετίζονται επίσης με τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό του. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η ακουστική απόσβεση του, αλλάζουν ανάλογα με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Επίσης το *NiTi* είναι ένα μη μαγνητικό κράμα.

*Πίνακας Γ.1: Κοινές μηχανικές ιδιότητες του NiTi*

	Austenite	Martensite
Μέγιστη δύναμη αντοχής (Mpa)	800-1500	103-1100
Απόδοση εφελκυστικής δύναμης	100-800	50-300 (Mpa)
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	70-110	21-69
Επιμήκυνση μεχρι την αστοχία (%)	1-20	Up to 60

Πίνακας Γ.2 : Ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής Ni-Ti

Θερμοκρασία που λιώνει deg.C (deg.F)	1300 (2370)
Πυκνότητα g/cu.cm (lb/cu.in.)	6,45 (0,233)
Ειδική Αντίσταση micro-ohms * cm	Ωστενίτης περίπου 100
	Μαρτενσίτης περίπου 70
Θερμική αγωγιμότητα W/cm * deg.C (BTU/ft * hr * deg.F)	Ωστενίτης 18 (10)
	Μαρτενσίτης 8,5 (4,9)
Αντοχή στη διάβρωση Παρόμοια με	<i>Ανοξείδωτα μέταλλα ή Κράματα τιτανίου</i>
Μέτρο ελαστικότητας GPa, (1,000 ksi)	Ωστενίτης περίπου 83 (12)
	Μαρτενσίτης περίπου 28 μέχρι 41 (4 μέχρι 6)
Αντοχή MPa (ksi)	Ωστενίτης 195 μέχρι 690 (28 μέχρι 100)
	Μαρτενσίτης 70 μέχρι 140 (10 μέχρι 20)
Αντοχή στον εφελκυσμό MPa (ksi)	895 (130)
Θερμοκρασία μετασχηματισμού deg.C (deg.F)	-200 μέχρι 110 (-328 μέχρι 230)
Λανθάνουσα θερμοκρασία μετασχηματισμού kJ/kg * atom (cal/g * atom)	167 (40)
Μέγιστη παραμόρφωση μνήμης σχήματος	8,5% μέγιστο

Με τη κατεργασία της βαφής και με κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, από τις οποίες μπορούμε να βελτιώσουμε την σκληρότητα του υλικού σε βαθμό έως 50%, διαμορφώνουμε έναν μαρτενσίτη ο οποίος μπορεί να δεχτεί πολύ μεγάλα φορτία χωρίς να ξεπεράσει το όριο ελαστικότητας του. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη χρησιμοποίηση αυτής της οικογένειας των κραμάτων είναι η ανάπτυξη των κατάλληλων διαδικασιών επεξεργασίας ώστε να παραγάγει τις επιθυμητές ιδιότητες.

Λόγω της ικανότητας άμεσης αντίδρασης του τιτανίου σε αυτά τα κράματα, όλη η τήξη τους πρέπει να γίνει σε μια κενή ή αδρανή ατμόσφαιρα. Οι μέθοδοι όπως *plasma-arc melting* (λιώσιμο με τόξο πλάσματος), *electron-beam melting* (λιώσιμο με δέσμη ηλεκτρονίων), και *vacuum-induction melting* είναι όλες χρησιμοποιούμενες στο εμπόριο. Αφού λειώσουν κομμάτια μάζας μετάλλου τα οποία έχουν υποστεί βαφή, οι τυποποιημένες θερμής κατεργασίας διαδικασίες όπως η σφυρηλάτηση και η εξώθηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα κράματα αντιδρούν αργά με τον αέρα, έτσι η θερμή κατεργασία στον αέρα είναι αρκετά επιτυχής. Οι περισσότερες *ψυχρής κατεργασίας* διαδικασίες μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε αυτά τα κράματα, αλλά σκληραίνουν εξαιρετικά γρήγορα, και συχνά απαιτείται ανόπτηση. Ανόπτηση ονομάζεται στη μεταλλουργία η θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή κράμα, που έχει υποστεί κάποια κατεργασία π.χ. σφυρηλάτηση ή ενδοτράχυνση, προκειμένου στη συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη να βελτιωθεί η ευκαμψία του και γίνει λιγότερο εύθραυστο.

Η επεξεργασία των κραμάτων *NiTi* μπορεί συνήθως να γίνει με προσοχή, αλλά μερικές από τις κανονικές διαδικασίες είναι δύσκολες. Η κατεργασία με στρέψη ή έλαση είναι πολύ δύσκολη εκτός αν έχουμε τα ειδικά εργαλεία και τις πρακτικές. Η ένωση, ή η συγκόλληση των κραμάτων είναι γενικά δύσκολη. Τα

υλικά αποκρίνονται καλά στη λειαντική αφαίρεση, όπως η λείανση και η κουρά-στίλβωση και μπορεί να γίνει εάν τα πάχη είναι μικρά.

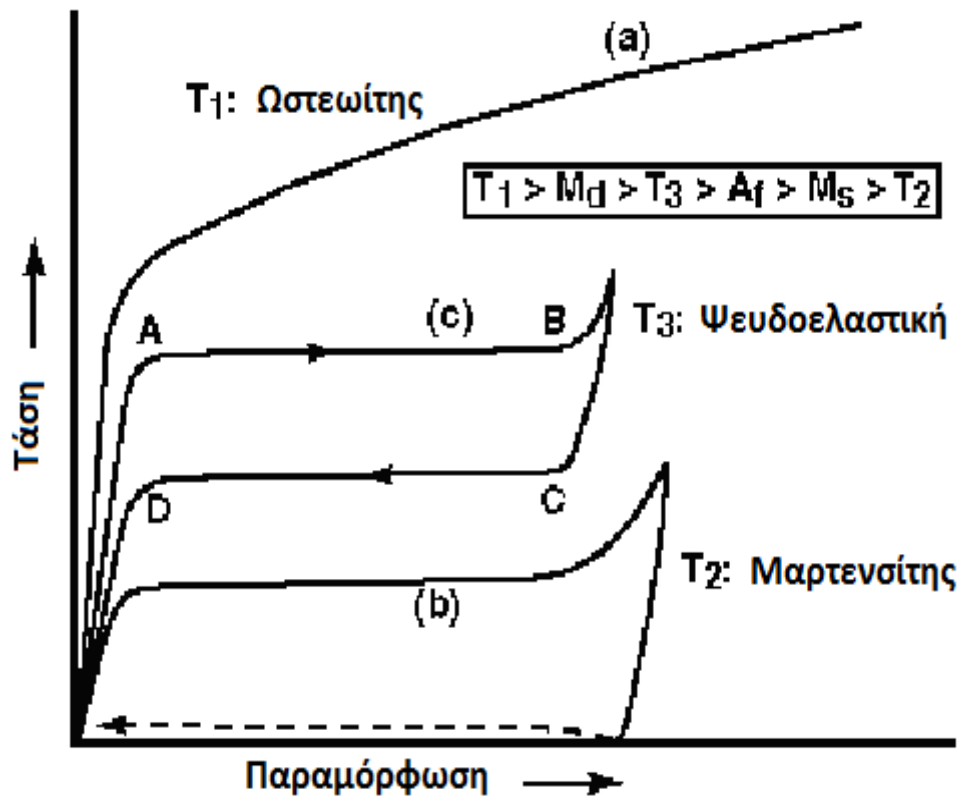
Η θερμική επεξεργασία για τη μετάδοση της επιθυμητής μνήμης σχήματος γίνεται συχνά σε 500 έως 800 βαθμούς  $C^{\circ}$  (950 έως 1450 βαθμοί  $F$ ), αλλά μπορεί να γίνει και σε πιο χαμηλή όπως 300 έως 350 βαθμούς  $C^{\circ}$  (600 έως 650 βαθμοί  $F$ ) εάν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος.

## 2.1 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Οι μηχανικές ιδιότητες των SMA ποικίλουν ανάμεσα στις θερμοκρασίες που εκτείνετε ο μετασχηματισμός τους. Αυτό μπορούμε να το δούμε και στο σχήμα Γ.7. Ο μαρτενσίτης παραμορφώνεται εύκολα σε χαμηλή τάση, ενώ ο ωστενίτης (σε υψηλή θερμοκρασία) έχει υψηλότερη αντοχή. Η διακεκομμένη γραμμή στην καμπύλη του μαρτενσίτη, δείχνει ότι επάνω στη θέρμανση, το δείγμα θυμήθηκε την αρχική μορφή του και επανήλθε σε αυτή. Καμιά τέτοια αποκατάσταση δε βρίσκεται στην φάση του ωστενίτη, επειδή καμιά αλλαγή φάσης δεν εμφανίζεται.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης φαίνεται στο σχήμα Γ.7, όπου το υλικό εξετάζεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του. Σε αυτή τη θερμοκρασία ο μαρτενσίτης παραμορφώνεται λόγω επιβολής τάσης (stress-induced). Έπειτα συνεχίζει να δέχεται ελαστική παραμόρφωση σε μικρότερο βαθμό υπό σταθερή τάση, η οποία φαίνεται από το σημείο Α έως το Β. Κατά την εκφόρτηση το υλικό επανέρχεται στην ωστενιτική φάση σε χαμηλότερη τάση, όπως φαίνεται στο 'CD', και εμφανίζεται η αποκατάσταση σχήματος, όχι κατά την εφαρμογή θερμοκρασίας αλλά κατά τη μείωση της τάσης. Αυτή η επίδραση, που αναγκάζει το υλικό να είναι εξαιρετικά ελαστικό, είναι γνωστή

ως *pseudoelasticity* (ψευδοελαστικότητα). Η ψευδοελαστικότητα είναι μη γραμμική.



*Σχήμα Γ.7: Τυπικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες σχετικά με το μετασχηματισμό, δείχνουν: (a) Ωστενίτης, (b) Μαρτενσίτης, (c) Ψευδοελαστική συμπεριφορά*

Στις περισσότερες περιπτώσεις το φαινόμενο μνήμης σχήματος είναι μιας κατεύθυνσης. Κατά την ψύξη, ένα κράμα μνήμης σχήματος δεν υποβάλλεται σε οποιαδήποτε αλλαγή σχήματος μακροσκοπικά, ακόμα κι αν η δομή αλλάζει στο μαρτενσίτη. Παραμορφώνουμε το μαρτενσίτη υπό σταθερή τάση, έπειτα θερμαίνουμε το κράμα, πάνω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού ώσπου να έρθει η αποκατάσταση σχήματος. Μόλις ψυχθεί το υλικό δεν παραμορφώνεται



αυθόρμητα, αλλά πρέπει να δεχθεί τάση σκόπιμα εάν η αποκατάσταση σχήματος επιδιώκεται πάλι.

Είναι δυνατό σε μερικά από τα κράματα μνήμης σχήματος να προκληθεί η μνήμη σχήματος διπλής κατεύθυνσης. Δηλαδή η αλλαγή σχήματος εμφανίζεται και κατά τη θέρμανση και κατά την ψύξη. Το ποσό αυτής της αλλαγής σχήματος είναι πάντα σημαντικά λιγότερο από το αποκτηθέν με τη μονόδρομη κατεύθυνση μνήμης σχήματος και πολύ λίγη τάση μπορεί να ασκηθεί από το κράμα δεδομένου ότι προσπαθεί να ανακτήσει το χαμηλής θερμοκρασίας σχήμα του.

### 2.1.1 ΨΕΥΔΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (*Pseudoelasticity*)

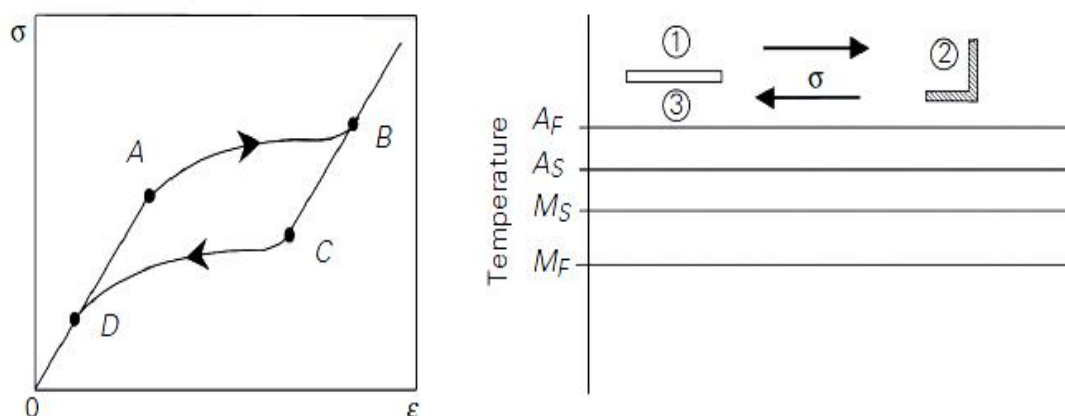
Η ψευδοελαστικότητα εμφανίζεται όποτε ένα δείγμα SMA είναι σε μια θερμοκρασία επάνω από την  $A_f$ . Κατά συνέπεια κάποιος μπορεί να εξετάσει ένα δείγμα SMA που υποβάλλεται σε μια μηχανική φόρτιση σε μια σταθερή θερμοκρασία επάνω από την  $A_f$ . Η καμπύλη ( $\sigma - \epsilon$ ) στο παρακάτω σχήμα Γ.8, αριστερή πλευρά, επεξηγεί τη μακροσκοπική συμπεριφορά του SMA, που παρουσιάζει το φαινόμενο της ψευδοελαστικότητας.

Μια μηχανική φόρτιση προκαλεί μία ελαστική αντίδραση έως ότου επιτυγχάνεται μια κρίσιμη αξία, δείχνει το  $A$ , όπου προκύπτει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός τελειώνοντας στο σημείο  $B$ . Σε αυτό το σημείο, η δομή κρυστάλλου του δείγματος αποτελείται συνολικά από μαρτενσίτη.

Για τις υψηλότερες τιμές τάσης, το SMA παρουσιάζει μια γραμμική αντίδραση. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφόρτισης, το δείγμα παρουσιάζει μια ελαστική αποκατάσταση ( $B \rightarrow C$ ). Από το σημείο  $C$  στο  $D$  παρατηρείται ο αντίστροφος μαρτενσιτικός μετασχηματισμός (*μαρτενσίτης  $\rightarrow$  ωστενίτης*). Από το σημείο  $D$  και κάτω, το δείγμα παρουσιάζει μια ελαστική

αποφόρτιση. Όταν τη διαδικασία φόρτιση-εκφόρτιση τελειώνει, το SMA δεν έχει καμία εναπομένουσα παραμόρφωση. Εντούτοις, δεδομένου ότι η πορεία του αρχικού μαρτενσιτικού μετασχηματισμού δεν συμπίπτει με την αντίστροφη πορεία μετασχηματισμού, δημιουργείται ένας βρόχος υστέρησης που οφείλεται στον ενεργειακό σκεδασμό.

Ένας άλλος τρόπος να παρατηρηθεί η ψευδοελαστική συμπεριφορά φαίνεται στη δεξιά πλευρά στο σχήμα Γ.8. Πρώτα ας εξετάσουμε ένα SMA σε μια θερμοκρασία πάνω από το  $A_f$  (1). Σε αυτή τη θερμοκρασία, υπάρχει μόνο μια φάση, δηλ., ωστενίτης. Σε μια σταθερή θερμοκρασία, μια μηχανική φόρτιση εφαρμόζεται προωθώντας την εμφάνιση του μαρτενσίτη (2). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφόρτισης, ο αντίστροφος μετασχηματισμός πραγματοποιείται (ο μαρτενσίτης  $\rightarrow$  ωστενίτης) και όταν εξαφανίζεται το φορτίο (3), το δείγμα δεν παρουσιάζει καμία εναπομένουσα τάση παραμόρφωση.



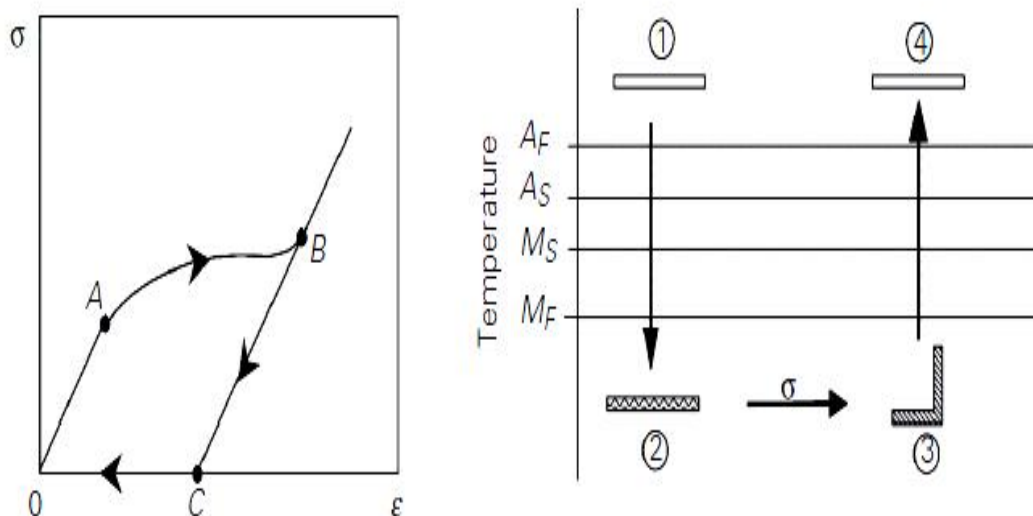
**Σχήμα Γ.8 :** Ψευδοελαστικότητα.  $A_S$ ,  $A_F$  κ  $M_S$  κ  $M_F$  = θερμοκρασία στην οποία ο σχηματισμός του ωστενίτη και του μαρτενσίτη αρχίζει και τελειώνει, αντίστοιχα.  $\sigma$ - $\epsilon$  = τάση-παραμόρφωση καμπύλη.

### 2.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Η δεύτερη θερμομηχανική συμπεριφορά που μπορεί να παρατηρηθεί σε SMA είναι η επίδραση μνήμης σχήματος. Στο σχήμα Γ.9, αριστερή πλευρά, παρουσιάζεται μία καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ενός δείγματος SMA σε μια

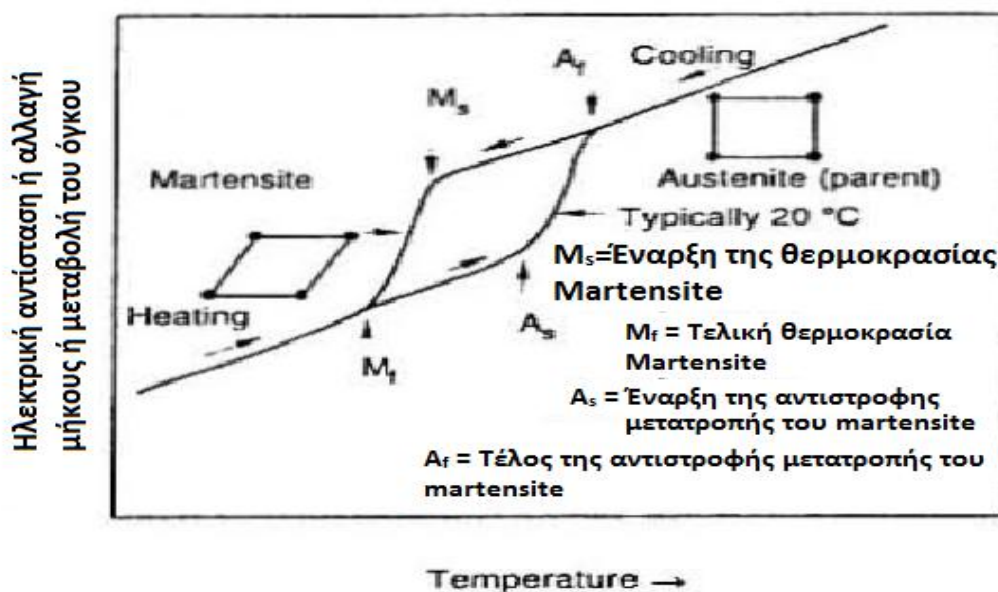
χαμηλή θερμοκρασία (μικρότερη από την  $M_F$ , η θερμοκρασία κάτω από την οποία μόνο η μαρτενσιτική φάση είναι σταθερή) όπου η επίδραση μνήμης σχήματος μπορεί να σημειωθεί. Όταν το δείγμα υποβάλλεται σε μηχανική φόρτιση, η τάση φτάνει σε μια κρίσιμη αξία, (σημείο  $A$ ), τότε ο μετασχηματισμός του μαρτενσίτη αρχίζει, τελειώνοντας στο σημείο  $B$ . Όταν η διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης τελειώσει, το δείγμα SMA παρουσιάζει ένα υπόλοιπο τάσης (σημείο  $C$ ). Αυτό το υπόλοιπο τάσης μπορεί να ανακτηθεί με τη θέρμανση, η οποία προκαλεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό φάσης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να γίνει κατανοητό από μια κίνηση του βρόγχου υστέρησης που παρουσιάζεται στη καμπύλη στο σχήμα  $\Gamma.10$ . Δεδομένου ότι η θερμοκρασία μειώνεται, ο βρόγχος υστέρησης κινείται επίσης προς τα κάτω.

Η δεξιά πλευρά στο σχήμα  $\Gamma.9$  παρουσιάζει έναν εναλλακτικό τρόπο να παρατηρηθεί η επίδραση μνήμης σχήματος. Πρώτα, το δείγμα SMA είναι σε μια θερμοκρασία επάνω από την  $A_F(1)$ . Σε αυτήν την θερμοκρασία, το δείγμα είναι στην ωστενιτική φάση. Όταν η θερμοκρασία του δείγματος SMA μειώνεται και φτάνει στη θερμοκρασία  $M_s$ , ο μετασχηματισμός φάσης αρχίζει να πραγματοποιείται και ο μαρτενσίτης αντικαθιστά τον ωστενίτη. Αυτός ο μετασχηματισμός ολοκληρώνεται όταν η θερμοκρασία των δειγμάτων είναι κάτω από την  $M_F(2)$ . Κάτω από μια σταθερή θερμοκρασία, μια μηχανική φόρτιση εφαρμόζεται (3  $\rightarrow$  4). Όταν αυτό το φορτίο εξαφανίζεται το δείγμα παρουσιάζει ένα υπόλοιπο τάσης (3). Το προηγούμενο σχήμα του δείγματος μπορεί να ανακτηθεί μέσω μιας διαδικασίας θέρμανσης (3  $\rightarrow$  4) που προκαλεί τον αντίστροφο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (μαρτενσίτη  $\rightarrow$  ωστενίτη).



Σχήμα Γ.9 : Επίδραση μνήμης σχήματος

**Επίδραση του μετασχηματισμού φάσης**

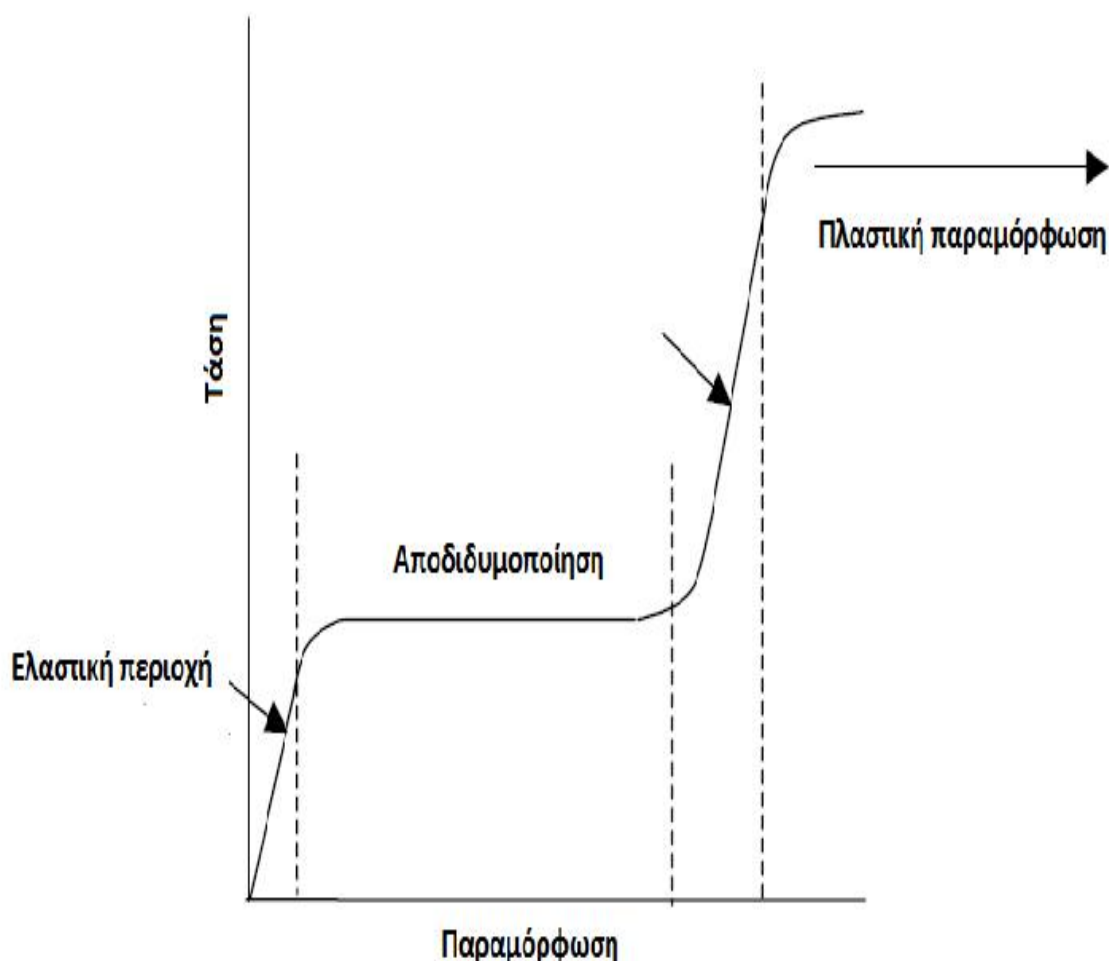


Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε μια φάση μετασχηματισμού στις φυσικές ιδιότητες του Ti-Ni. Όλες οι φυσικές ιδιότητες παρουσιάζουν ασυνέχεια, χαρακτηρίζει την αναγραφόμενη θερμοκρασία μετασχηματισμού.

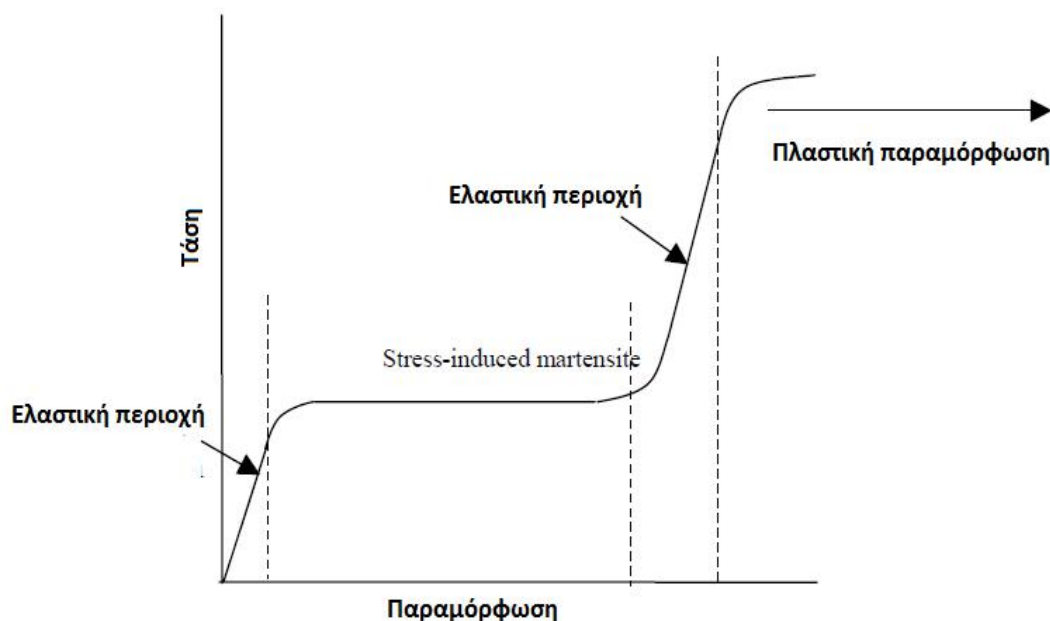
Σχήμα Γ.10 : Επίδραση μετασχηματισμού Φάσης

## 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ Nitinol

Το σχήμα Γ.11 παρουσιάζει τη συμπεριφορά καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ενός SMA στη φάση μαρτενσίτη του. Το Σχήμα Γ.12 παρουσιάζει τη συμπεριφορά όπου το SMA είναι στη φάση ωστενίτη. Αν και οι μορφές των καμπυλών είναι παρόμοιες, η κλίμακα των δύο αριθμών δεν είναι η ίδια. (Πίνακας Γ.1)



Σχήμα Γ.11: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης του μαρτενσίτη



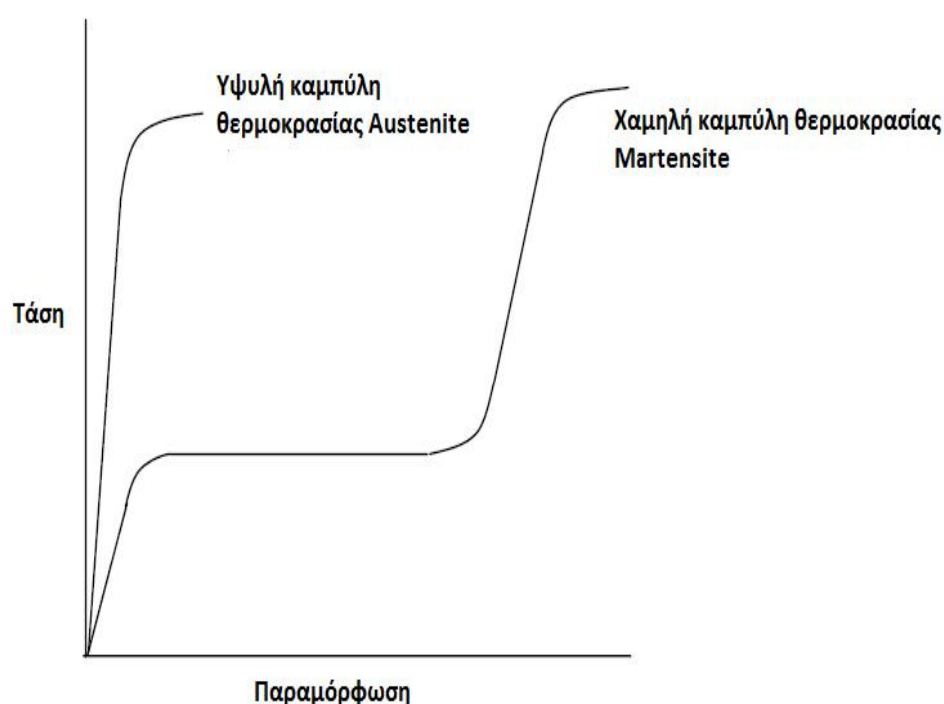
*Σχήμα Γ.12 : Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του ωστενίτη σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης του ωστενίτη*

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του μαρτενσίτη είναι ένα αποτέλεσμα μιας δοκιμής που γίνεται κάτω από την αλλαγή θερμοκρασίας του μαρτενσίτη, ενώ η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του ωστενίτη είναι ένα αποτέλεσμα μιας δοκιμής που γίνεται επάνω από την αλλαγή θερμοκρασίας του ωστενίτη.

Εξετάζοντας τη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του μαρτενσίτη στο σχήμα Γ.11, παρατηρούμε ότι αρχίζει με μία περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης. Κατά την εφαρμογή μιας τάσης μέσα σε αυτήν την περιοχή, το SMA είναι σε θέση να επανέλθει στο αρχικό μήκος του χωρίς οποιαδήποτε παραμόρφωση όταν αφαιρείται το φορτίο. Συνεχίζοντας την εφαρμογή σταθερής τάσης στη φάση του μαρτενσίτη, παρατηρείται το φαινόμενο της αποδιδυμοποίησης (detwinning). Το φαινόμενο της αποδιδυμοποίησης (Detwinning) είναι ο επαναπροσανατολισμός των διδυμιών έως ότου βρεθούν όλες στην ίδια κατεύθυνση.

Μόλις η αποδιδυμοποίηση είναι πλήρης, το υλικό περνά από ένα δεύτερο στάδιο ελαστικής παραμόρφωσης. Μέσα και κάτω από αυτήν την περιοχή, όλη η τάση μπορεί να ανακτηθεί. Οποιαδήποτε τάση που εφαρμόζεται πέρα από αυτήν την περιοχή θα παραμορφώσει πλαστικά το υλικό.

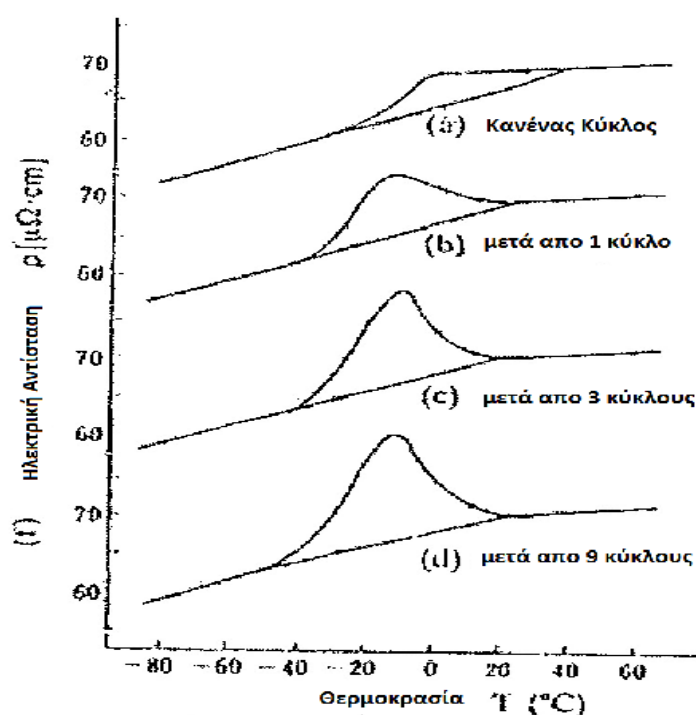
Η τάση των SMA στη φάση ωστενίτη είναι περίπου 300 φορές μεγαλύτερη από την τάση στη φάση μαρτενσίτη. Το σχήμα Γ.13 είναι μια σύγκριση του επιπέδου τάσης των δύο φάσεων.



*Σχήμα Γ.13 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τη σύγκριση του επιπέδου τάσης στις φάσεις ωστενίτη και μαρτενσίτη.*

### 3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Από τη στιγμή που η μέτρηση της ειδικής αντίστασης είναι απλή για τα κράματα NiTi, χρησιμοποιείται ευρέως μαζί με τη Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Thermal Analysis) ως μια τεχνική για να καθοριστούν με ακρίβεια οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού των κραμάτων με βάση το NiTi. Όμως, οι καμπύλες ειδικής αντίστασης - θερμοκρασίας (resistivity vs. Temperature) διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα με τη θερμική «ιστορία» του δοκιμίου. Ειδικά στα κράματα NiTi με μεγάλη συγκέντρωση σε Ni, τα αποτελέσματα σε κύκλους θέρμανσης και ανόπτησης (annealing) είναι πολύ έντονα. (σχήμα Γ.14)



Σχήμα Γ.14 : Επίδραση σε ανολοκλήρωτους κύκλους θέρμανσης στην ειδική αντίσταση σε κράμα Ti-50.8%Ni (960 $^{\circ}$ 3h)



Η γραφική παράσταση ειδικής αντίστασης - θερμοκρασίας παρουσιάζει ένα κράμα NiTi με 50.8% σε Ni ( $960^{\circ}\text{C}$  - 3h). Η πρώτη καμπύλη (a) είναι η συνήθης καμπύλη ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης για το δοκίμιο μετά από ανόπτηση. Η ειδική αντίσταση μειώνεται όσο πλησιάζουμε την Ms.

Όμως από τη στιγμή που δεν υπάρχει αλλαγή στην ειδική αντίσταση όταν το δοκίμιο θερμαίνεται πριν την  $A_s$ , είναι δύσκολο να ανιχνευθεί η διαδικασία αντιστρόφου μετασχηματισμού, που προκαλεί την επαναφορά του σχήματος. Αν το δοκίμιο ψυχθεί και θερμανθεί κατ' εξακολούθηση μεταξύ των  $-20^{\circ}\text{C}$  και  $30^{\circ}\text{C}$ , η ειδική αντίσταση αυξάνεται όπως φαίνεται στην καμπύλη (b) μετά από έναν κύκλο, και ένα μεγάλο μέγιστο (peak) εμφανίζεται στην καμπύλη μετά από 9 κύκλους όπως φαίνεται στη (d).

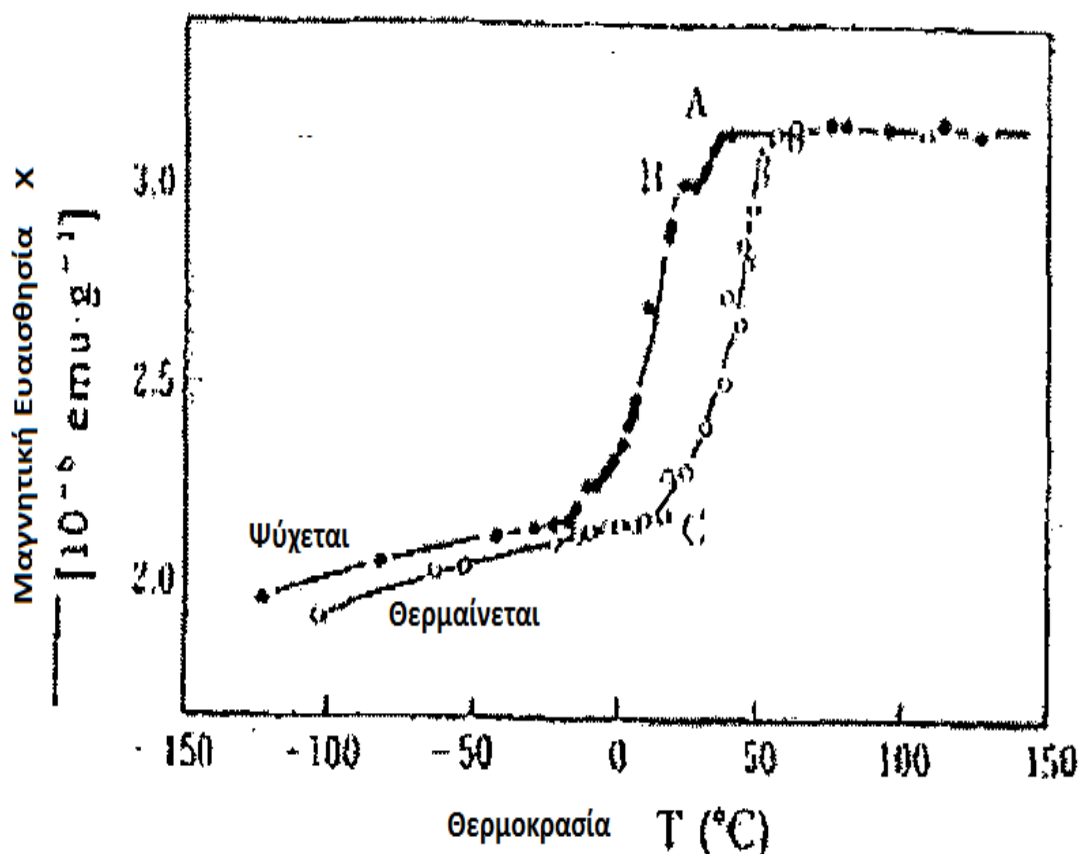
Ο κύκλος θέρμανσης σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας θεωρείται μη ολοκληρωμένος, γιατί η θέρμανση και η ψύξη δεν ολοκληρώνει το μαρτενσιτικό ή τον αντίστροφο μετασχηματισμό. Φυσικά, ακόμα και αν παρατηρηθεί ολοκληρωμένος κύκλος θέρμανσης μεταξύ των θερμοκρασιακών ορίων από  $-120^{\circ}\text{C}$  έως  $60^{\circ}\text{C}$  έτσι ώστε και οι δύο μετασχηματισμοί να ολοκληρωθούν, παρατηρείται το ίδιο αποτέλεσμα.

Σε κράματα στα οποία η συγκέντρωση του Ni είναι κοντά στη στοιχειομετρική τιμή, οι μεταβολές της τιμής της ειδικής αντίστασης δεν είναι τόσο έντονες.

Ακόμα και με 50.2% σε Ni, αν ένας ημιτελής κύκλος επαναληφθεί 20 φορές, η Ms μετακινείται σε μια μικρότερη θερμοκρασία και παρατηρούνται μικρές μόνο αυξήσεις στην ειδική αντίσταση. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ως εξής : η ελάττωση στη θερμοκρασία Ms, κατά τον κύκλο θέρμανσης προκαλεί το μετασχηματισμό από τη φάση υψηλής θερμοκρασίας στην ενδιάμεση φάση, που παρατηρείται νωρίτερα στην Ms.

#### 4. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Από τη στιγμή που οι φάσεις μετασχηματισμού στα κράματα με βάση το NiTi επηρεάζονται από τη μαγνητική διαπερατότητα, αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σημαντικό εργαλείο για ακριβή καθορισμό των θερμοκρασιών μετασχηματισμού. Το σχήμα Γ.15 παρουσιάζει τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, ενός κράματος  $Ti_{50}Ni_{49}Fe_1$ . Στη φάση υψηλής θερμοκρασίας, δεν υπάρχει μεταβολή στη μαγνητική διαπερατότητα.



Σχήμα Γ.15 : Μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία σε κράμα  $Ti_{50}Ni_{49}Fe_1^3$

Το δοκίμιο παρουσιάζει παραμαγνητισμό Pauli (Pauli paramagnetism). Όταν η ειδική αντίσταση μειώνεται (σημείο B στην εικόνα, Ms), το  $\chi$  πέφτει απότομα στα  $2/3$  της προηγούμενης τιμής του. Σε φάση χαμηλής θερμοκρασίας (μαρτενσίτη), το  $\chi$  μειώνεται, όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Κατά τη θέρμανση, το  $\chi$  αυξάνεται απότομα στο σημείο C και το σημείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του αντιστρόφου μετασχηματισμού της As (η οποία εμφανίζεται στην καμπύλη ειδικής αντίστασης θερμοκρασίας).

Στην Ms (σημείο A), όπου η μαγνητική διαπερατότητα ανεβαίνει, στο μετασχηματισμό από τη φάση υψηλής θερμοκρασίας στην ενδιάμεση φάση, το  $\chi$  παρατηρείται να μειώνεται με αργούς ρυθμούς. Έτσι μετρήσεις της μαγνητικής διαπερατότητας των κραμάτων με βάση το NiTi δίνουν πληροφορίες για τον προσδιορισμό των διαφόρων θερμοκρασιών μετασχηματισμού. Όμως, το υψηλό κόστος των μετρητικών μηχανισμών και η πολυπλοκότητα στις τεχνικές μέτρησης έχουν εμποδίσει τη γενική τους εφαρμογή ως μεθόδους υπολογισμού των θερμοκρασιών μετασχηματισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ

---

# ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το *Nitinol* χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές. Έχουν χρησιμοποιηθεί για τον στρατό, την ιατρική, την ασφάλεια, και τις εφαρμογές ρομποτικής. Οι στρατιωτικοί έχουν χρησιμοποιήσει τους συζευκτήρες *Nitinol* σε *F-14* πολεμικά αεροσκάφη από το τέλος δεκαετίας του '60. Αυτοί οι συζευκτήρες ενώνουν τις υδραυλικές γραμμές σφιχτά και εύκολα.

Πολλές από τις τρέχουσες εφαρμογές του *Nitinol* ήταν στον τομέα της ιατρικής. Τα τσιμπιδάκια για να αφαιρέσουν τα ξένα αντικείμενα μέσω των μικρών τομών εφευρέθηκαν από τη *NASA*. Οι άγκυρες με τους γάντζους *Nitinol* για να συνδέσουν τους τένοντες με το κόκκαλο χρησιμοποιήθηκαν για τη χειρουργική επέμβαση ώμων του *Opél Hershiser*. Τα ορθοδοντικά καλώδια που γίνονται από *Nitinol* μειώνουν την ανάγκη να ρυθμιστεί το καλώδιο. Αυτά τα καλώδια επιταχύνουν επίσης την κίνηση των δοντιών διότι επανέρχονται στις αρχικές μορφές τους. Τα πλαίσια γυαλιών οράσεως από *Nitinol* μπορούν να καμφθούν συνολικά από την αρχική τους μορφή και να επανέλθουν σε αυτήν μετά από θέρμανση. Εντοπιστές καλωδίων βελόνων *Nitinol* «που χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν και να χαρακτηρίσουν τους όγκους στήθων έτσι ώστε η επόμενη χειρουργική επέμβαση μπορεί να είναι ακριβέστερη» χρησιμοποιούν την ιδιότητα μνήμης μορφής του μετάλλου. Μια άλλη επιτυχής ιατρική εφαρμογή είναι η χρήση του *Nitinol* ως οδηγός για τους καθετήρες μέσω των αιμοφόρων αγγείων.

Υπάρχουν παραδείγματα *SMA* που χρησιμοποιούνται στις συσκευές ασφάλειας που θα σώσουν ζωές στο μέλλον. Οι ψεκαστές πυρασφάλειας που χρησιμοποιούν *SMA* είναι ήδη στην αγορά. Το κύριο πλεονέκτημα των ψεκαστών πυρκαγιάς φτιαγμένων από *Nitinol* είναι η μείωση στο χρόνο απόκρισης.

Το *Nitinol* χρησιμοποιείται στους ενεργοποιητές και μικροχειριστές ρομποτικής για να μιμηθούν την ανθρώπινη κίνηση μυών. Το κύριο πλεονέκτημα του *Nitinol* είναι η ομαλή, ελεγχόμενη δύναμη που ασκεί επάνω στην ενεργοποίηση.

Άλλες διάφορες εφαρμογές των κραμάτων μνήμης μορφής περιλαμβάνουν τη χρήση στις οικιακές συσκευές, στον ιματισμό, και στις δομές. Μια από τις πιο μοναδικές και επιτυχείς εφαρμογές είναι ο στηθόδεσμος με χρήση εσωτερικού καλωδίου *Ni-Ti*. Αυτοί οι στηθόδεσμοι, που κατασκευάστηκαν για να είναι και άνετοι και ανθεκτικοί, είναι ήδη εξαιρετικά επιτυχείς στην Ιαπωνία. Οι ενεργοποιητές *Nitinol* ως υποστηρίγματα μηχανών μπορούν επίσης να ελέγξουν τη δόνηση. Αυτοί οι ενεργοποιητές μπορούν να αποτρέψουν την καταστροφή τέτοιων δομών όπως τα κτήρια και τις γέφυρες.

Υπάρχουν πολλές πιθανές εφαρμογές για SMA. Οι μελλοντικές εφαρμογές προβλέπονται για να περιλάβουν τις μηχανές στα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα και τις ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούν τη μηχανική ενέργεια ως αποτέλεσμα των μετασχηματισμών μορφής. Το *Nitinol* με την ιδιότητα μνήμης μορφής του προβλέπεται επίσης για τη χρήση ως πλαίσια αυτοκινήτων.

Το SMA είναι «ιδανικά για τη χρήση ως σύνδεσμοι, συνδετήρες, και σφιγκτήρες» σε ποικίλες εφαρμογές. Οι σφιχτότερες συνδέσεις και οι ευκολότερες και αποδοτικότερες εγκαταστάσεις προκύπτουν από τη χρήση των κραμάτων μνήμης μορφής.

# 1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ

## ΒΙΟΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Η βιοσυμβατότητα των υλικών με μνήμη σχήματος (κράματα νικελίου-τιτανίου) σε ιατρικές εφαρμογές, απασχολεί κατά πολύ τους ερευνητές στον κλάδο της ιατρικής στις μέρες μας. Αυτά τα έξυπνα μεταλλικά υλικά, που χαρακτηρίζονται από τις σημαντικές μηχανικές τους ιδιότητες, κεντρίζουν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, για τη χρησιμοποίησή τους σε καθοριστικής σημασίας χειρουργικές επεμβάσεις και διαγνωστικές εφαρμογές, καθώς και σε ορθοδοντικές συσκευές, όπως έχουμε προαναφέρει. Λόγω της παρουσίας υψηλών ποσών νικελίου στο κράμα, η κυτταροτοξικότητα τέτοιων κραμάτων είναι υπό διερεύνηση. Από έρευνες, αποδεικνύεται ότι τα κράματα μνήμης σχήματος NiTi χαρακτηρίζονται γενικά από καλές ιδιότητες στη διάβρωση, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανώτερα βιοϊατρικά υλικά σε σύγκριση με τους συμβατικούς ανοξείδωτους χάλυβες ή βιοϊατρικά υλικά βασισμένα σε κοβάλτιο-χρώμιο-μολυβδαίνιο. Από τη πλειοψηφία των μελετών περί της βιοσυμβατότητας, προκύπτει ότι τα κράματα αυτά έχουν χαμηλή κυτταροτοξικότητα καθώς επίσης και χαμηλή γενοτοξικότητα. Η απελευθέρωση ιόντων νικελίου εξαρτάται από τη κατάσταση και τη χημεία στη σύνθεση της επιφάνειας του κράματος. Ομαλές επιφάνειες, με καλά ελεγχόμενες δομές και χημεία στη σύνθεση του προστατευτικού στρώματος TiO<sub>2</sub> στην επιφάνεια του κράματος, οδηγούν σε αμελητέα απελευθέρωση ιόντων νικελίου, με τις συγκεντρώσεις να είναι πολύ μικρότερες από τη καθημερινή κανονική ανθρώπινη εισαγωγή.

Ένα παράδειγμα μιας συσκευής από υλικά με μνήμη σχήματος είναι ένα στέντ. Ένα στέντ, είτε σε συνδυασμό με ένα μπαλόνι διαστολής ή απλώς αυτοδιασταλόμενο, μπορεί να διασταλεί ή να υποστηρίξει μια αποκλεισμένη αρτηρία στο ανθρώπινο σώμα. Η στεφανιαία νόσος, η οποία είναι μια σημαντική αιτία θανάτου σε όλο τον κόσμο, προκαλείται από μια πέτρα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τοίχωμα μιας αρτηρίας. Αυτό μειώνει την διατομή της αρτηρίας και κατά συνέπεια μειώνει τη ροή του αίματος στον καρδιακό μυ. Ένα στέντ μπορεί να εισαχθεί με ένα «παραμορφωμένο» σχήμα, με άλλα λόγια, με μικρότερη διάμετρο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των αρτηριών με τα στέντ να περιέχονται σε ένα καθετήρα. Όταν αναπτυχθεί, το στέντ επεκτείνεται στην κατάλληλη διάμετρο με αρκετή δύναμη ώστε να ανοίξει η αρτηρία και να αποκαταστήσει τη ροή του αίματος.



*Εικόνα 1: Στεντς τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να συγκρατούν ανοιχτές αρτηρίες του ανθρώπινου σώματος κατασκευασμένα από υλικά με μνήμη σχήματος*

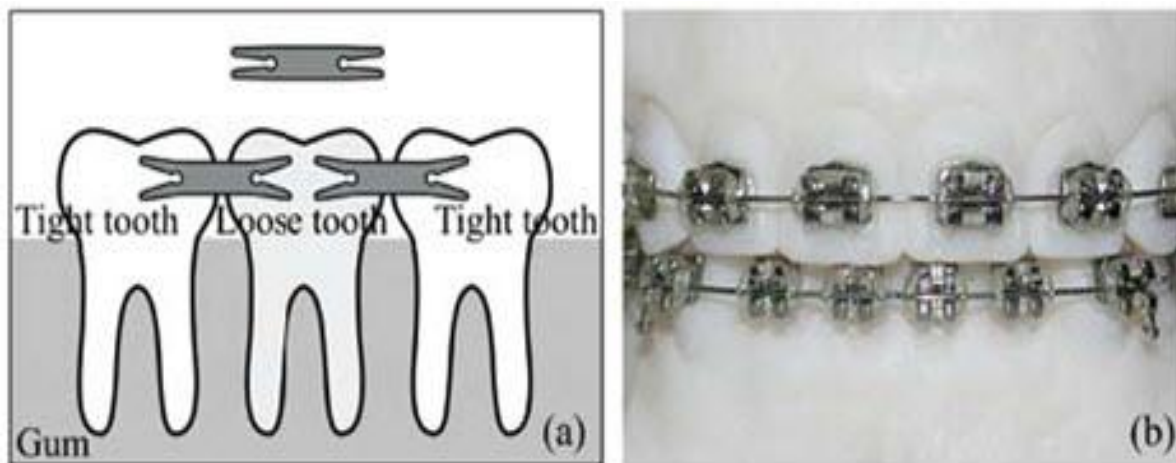




*Εικόνα 2: Στεντ*

Ορθοδοντικές τράντες. Ορθοδοντικές τράντες από υλικά με μνήμη σχήματος σε ένα πρότυπο άνω σιαγόνας. Τράντες, ή ορθοδοντικές συσκευές, αποτελούμενες από μέταλλο εμπλέκονται στα επάνω δόντια και συνδέονται μεταξύ τους με ρυθμιζόμενο καλώδιο. Τα υλικά με μνήμη σχήματος είναι κατασκευασμένα από κράματα νικελίου και τιτανίου, μαζί με χαλκό ή αλουμίνιο. Καθώς οι τράντες ζεσταίνονται το σχήμα τους παίρνει την αρχική τους μορφή και αργά επιτυγχάνουμε την ευθυγράμμιση (ανωμαλίες) ή τη διόρθωση σε τυχόν συνωστισμό των δοντιών.

Επίσης τα υλικά με μνήμη σχήματος χρησιμοποιούνται ευρέως και για τεχνητές ρίζες των δοντιών. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος τα καθιστά πολύ λειτουργικά με άριστη βιοσυμβατότητα.



*Εικόνα 3: Ορθοδοντικές τράντες και σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται ευρέως από την οδοντιατρική για την ευθυγράμμιση και την καλύτερη εμφάνιση των δοντιών.*

## 2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Τα πέταλα αυτού του όμορφου φωτιστικού ανοίγουν και κλείνουν ανάλογα με την ένταση που εκπέμπεται από την λάμπα. Τα λεπτά του πέταλα, τα οποία είναι κατασκευασμένα από υλικά με μνήμη σχήματος λυγίζουν

ανάλογα με τη θερμότητα που εκπέμπεται από το βολβό ενώ στο δεύτερο έχουμε αλλαγή του σχήματος του φωτιστικού όταν η λάμπα ανάψει.



*Εικόνα 4 :Πρωτότυπα φωτιστικά κατασκευασμένα από υλικά με μνήμη σχήματος που αλλάζουν μορφή ανάλογα με τη θερμότητα που εκπέμπεται.*

Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (HST), στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν βραχίονες κατασκευασμένοι από ένα κράμα μνήμης σχήματος, ώστε να απελευθερώσει τους ηλιακούς συλλέκτες του αυτόματα μόλις φτάσει το διάστημα. Κατά το ξεκίνημά του, το τηλεσκόπιο ήταν μέσα στο Διαστημικό Λεωφορείο σε κάποια σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, έτσι ώστε οι βραχίονες με μνήμη σχήματος να είναι λυγισμένοι προς τα μέσα και οι ηλιακοί συλλέκτες να παραμένουν ασφαλείς. Στο διάστημα, και μακριά από το διαστημικό λεωφορείο,

οι ακτίνες του ήλιου ζεσταίνουν ταχύτατα το σκάφος, και οι βραχίονες με μνήμη σχήματος φτάνουν σε μια κρίσιμη θερμοκρασία (γνωστή ως η θερμοκρασία μετασχηματισμού), έτσι ώστε να αποκτήσουν το αρχικό τους σχήμα , προκαλώντας τους ηλιακούς συλλέκτες να αναδιπλωθούν αυτόματα .



*Εικόνα 5: Διαστημικό τηλεσκόπιο της NASA με ηλιακούς συλλέκτες κατασκευασμένους από υλικά με μνήμη σχήματος.*

Υλικό μνήμης σχήματος με βάση το πολυαιθυλένιο για τη διόρθωση φθαρμένων σωλήνων.

Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας θα επιτρέψει στις εταιρείες κοινής ωφελείας να μειώσουν τον αντίκτυπο των δραστηριοτήτων τους στο ευρύ κοινό, παρέχοντας μία περιβαλλοντικά πιο ευαισθητοποιημένη λύση από άλλες

εναλλακτικές που θα δημιουργούσαν συνεχή προβλήματα τα οποία ανεβάζουν το κόστος συντήρησης των σωλήνων.

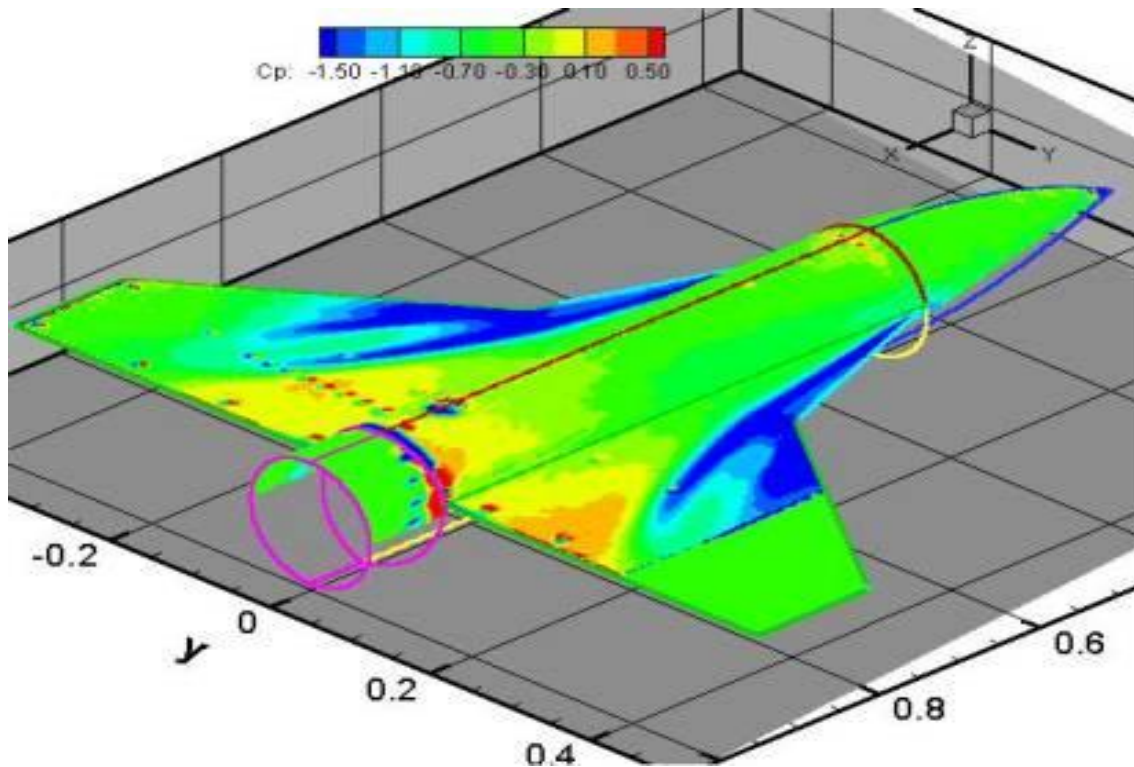


*Εικόνα 6 : (α) Η επένδυση στη μειωμένη διάμετρο αμέσως μετά την εισαγωγή. (β) Η επένδυση σε άμορφη κατάσταση, ενώ έχει ενεργοποιηθεί το υλικό με μνήμη σχήματος. (γ) Μετά την ψύξη και κρυστάλλωση, επιτυγχάνουμε τη πλησιέστερη στην αρχική μορφή του σωλήνα .*

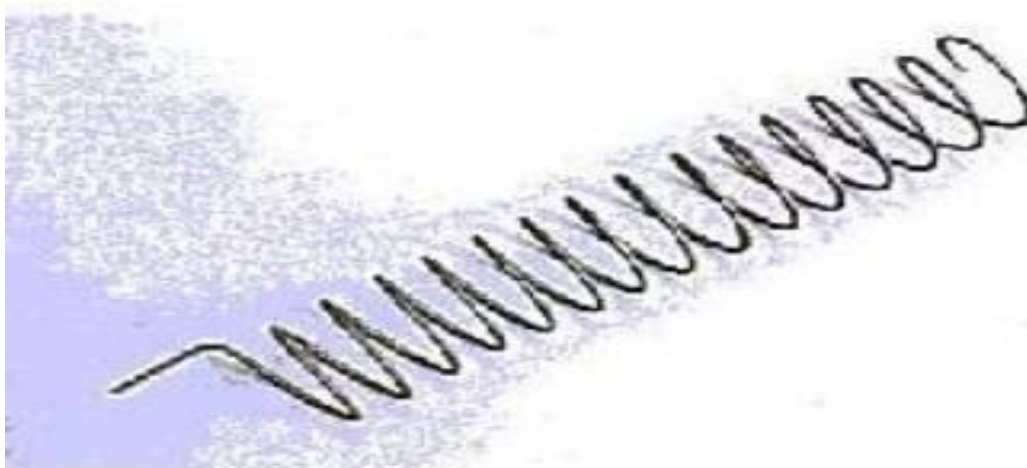
Το κράμα νικελίου τιτανίου με μνήμη σχήματος αναδείχθηκε ως πολλά υποσχόμενο υλικό για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Ορισμένες από τις εφαρμογές είναι ενεργές και προσαρμοσμένες στον έλεγχο σχήματος στις δομές αεροδιαστημικής και τις διάφορες εφαρμογές ενεργοποίησης. Όλες αυτές οι εφαρμογές απαιτούν υλικά με μνήμη σχήματος σε μορφή σύρματος με ένα εύρος θερμοκρασιών μετασχηματισμού και μηχανικές ιδιότητες. Διάφορες



εταιρίες έχουν καταφέρει τη χρησιμοποίηση καλωδίων από υλικά με μνήμη σχήματος ως ενεργοποιητές.



*Εικόνα 7: Χρήση καλωδίων και συρμάτων ως ενεργοποιητές και ως σφικτήρες από την αεροναυπηγική.*



*Εικόνα 8: Σύρματα νικελίου τιτανίου που χρησιμοποιούνται από την αεροναυπηγική.*

Υπάρχουν αρκετές διεθνείς εταιρείες οι οποίες δραστηριοποιούνται στην κατασκευή εύκαμπτων πλαισίων γυαλιών χρησιμοποιώντας μέταλλα όπως το νικέλιο, ανοξείδωτο ατσάλι, τιτάνιο, και υλικά κραμάτων μνήμης σχήματος. Η σύνθεση όλων αυτών των μετάλλων μπορεί να δώσει στα γυαλιά αρκετά μεγάλη ελαστικότητα στο πλαίσιο τους χωρίς να χάνουν το σχήμα τους σε πολύ θερμά κλίματα. Το πλαίσιο τους από αλουμίνιο με μνήμη σχήματος χαρακτηρίζεται από την ικανότητα να επιστρέφει στην αρχική του μορφή, αφού τεντωθεί ή έχει χάσει το αρχικό του σχήμα. Το πλαίσιο που έχουν, περιέχει ένα ή περισσότερα συστατικά, μέρη των οποίων είναι κατασκευασμένα από ένα υπερελαστικό σύρμα το οποίο κατασκευάζεται από ένα κράμα νικελίου-τιτανίου. Έτσι μπορούμε να επιτύχουμε άριστες μηχανικές ιδιότητες όπως περισσότερο από 2% ελαστικότητα σε θερμοκρασία από  $-40^{\circ}\text{C}$ . έως  $50^{\circ}\text{C}$ . Υπερελαστικά σύρματα που δημιουργούνται από συμβατικά ψυχρή ολκή συρμάτων νικελίου τιτανίου με ψυχρή διαμόρφωση της τάξης του 30% και στη συνέχεια, υποβάλλοντας τα σε μια διαδικασία η οποία πετυχαίνεται κυρίως από παραμόρφωση με μία μηχανική επεξεργασία για την αύξηση της συνολικής ψυχρής διαμόρφωσης μέχρι και 35 - 40 %. Τα πλαίσια αυτών των γυαλιών οράσεως συνήθως έχουν περιεκτικότητα σε τιτάνιο από 48%-51%.



*Εικόνα 9: Πλαίσια γυαλιών οράσεως κατασκευασμένα από κράμα νικελίου τιτανίου με ικανότητα μνήμης σχήματος.*



*Εικόνα 10: Πλαίσιο γυαλιών νικελίου τιτανίου το οποίο δέχεται καταπόνηση με λυγισμό χωρίς να υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις.*

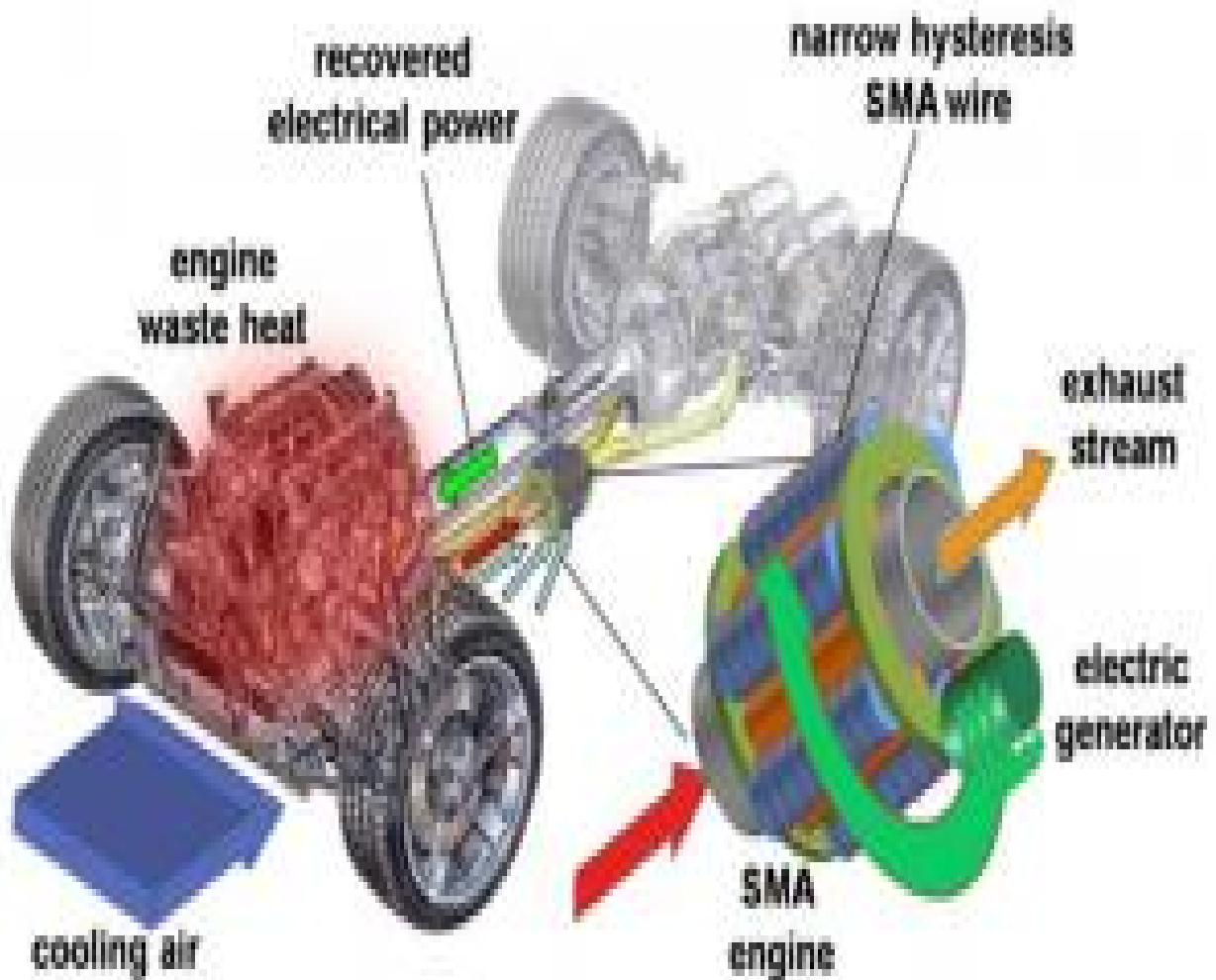




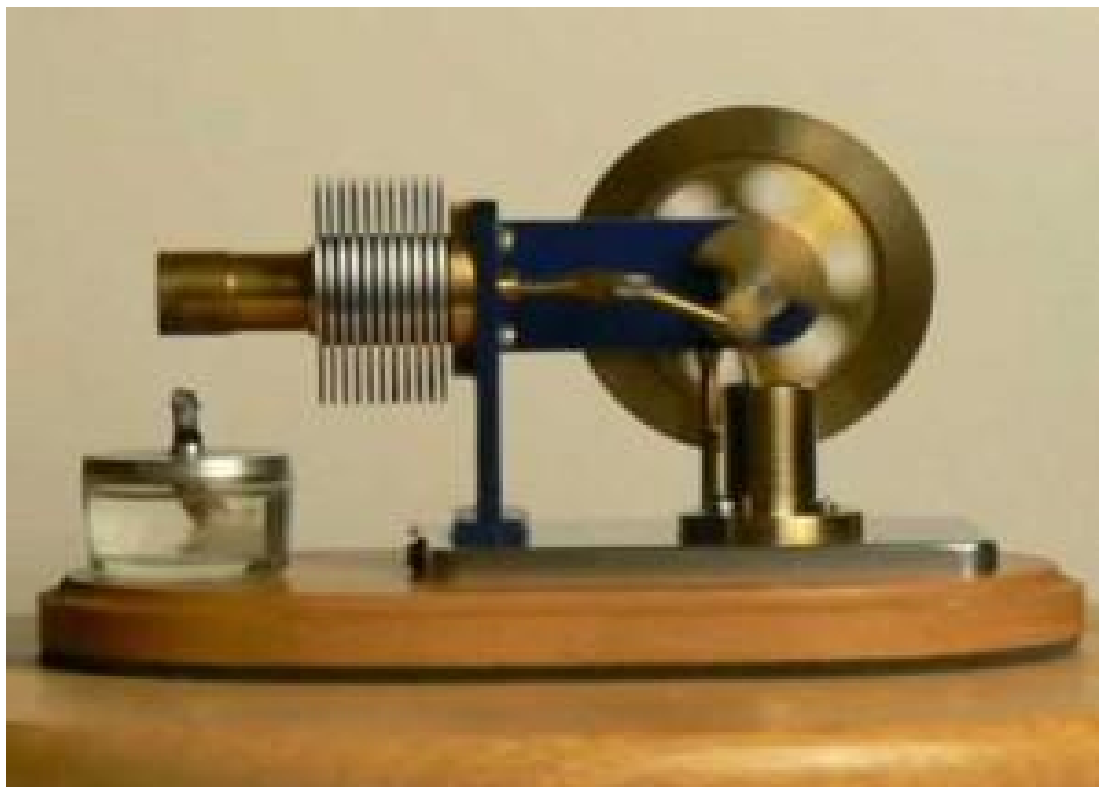
*Εικόνα11: Πλαίσιο γυαλιών νικελίου τιτανίου το οποίο δέχεται καταπόνηση με στρέψη χωρίς να υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις.*

Εάν ένα τεντωμένο σύρμα νικελίου τιτανίου θερμανθεί, θα συρρικνωθεί πίσω στο αρχικό μήκος του. Όταν κρυώσει, γίνεται λιγότερο δύσκαμπτο και μπορεί να επανέλθει στο αρχικό του σχήμα. Η συμπεριφορά των υλικών με μνήμη σχήματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να καταστεί δυνατή η θερμική μηχανή που θα μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική ή ηλεκτρική. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 υπήρχε ένα τεράστιο ενδιαφέρον για τις δυνατότητες των κινητήρων θερμότητας από υλικά με μνήμη σχήματος. Αλλά ήταν πολύ ογκώδες με πολύ μεγάλο κόστος ώστε να έχουν μια ευκαιρία στην αγορά. Το πρόβλημα με την υλικά με μνήμη σχήματος είναι ότι τείνουν να παρουσιάζουν υστέρηση, η οποία είναι κάτι πολύ κακό για αυτήν την εφαρμογή. Μπορεί να λειτουργήσει με διάφορους ενεργοποιητές, αλλά όχι και για απόλυτη θερμομηχανική ανάκτηση θερμότητας αυτού του συστήματος. Αν

το σχέδιο αυτό επιτύχει, αυτό θα εκφραστεί με τη δυνατότητα να φορτίσετε το συσσωρευτή ενός υβριδικού αυτοκινήτου, ενώ σε συμβατικούς κινητήρες θα μπορούσε να σημάνει την αντικατάσταση του εναλλάκτη χωρίς κανένα φορτίο επί του κινητήρα.



*Εικόνα 12: Μηχανή SMA*



*Εικόνα 13: Κινητήρας κατασκευασμένος από υλικά με μνήμη σχήματος με σκοπό την θερμομηχανική ανάκτηση του συστήματος.*

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Είναι σημαντικό να εξεταστεί η επιτυχημένη χρήση των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS – micro-electrical-mechanical systems) σαν αισθητήρες στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Για παράδειγμα, οι συσκευές MEMS χρησιμοποιούνται, για την ανάπτυξη των αερόσακων και του συστήματος που ξεκλειδώνει τα φρένα του αυτοκινήτου (ABS). Υπάρχουν σημάδια ότι αυτή η αγορά έχει αρχίσει να μεγαλώνει.

Μερικά «αληθινά» έξυπνα υλικά – ηλεκτροχρωμικά υλικά – χρησιμοποιούνται στον αυτόματο φωτισμό και τον έλεγχο της θερμότητας στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. οι καθρέφτες που θαμπώνουν και τα πίσω παράθυρα). Μια λιγότερο ώριμη εφαρμογή είναι η χρήση ενεργοποιητών σαν

υποκατάστατα μικρών κινητήρων, όπου τα πλεονεκτήματα είναι το μειωμένο βάρος και οι λιγότερες βλάβες λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας. Επίσης η χρήση των έξυπνων υλικών για τη μείωση του θορύβου και της δόνησης είναι λιγότερο ώριμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την βελτιωμένη άνεση και τα οφέλη ως προς την ασφάλεια, ειδικά για τους επαγγελματίες οδηγούς.

Επί του παρόντος έχει υιοθετηθεί μια υβριδική και εξελικτική προσέγγιση, με τους ηλεκτρικούς κινητήρες να αντικαθιστούν τα μηχανικά μέσα των κινούμενων υδραυλικών. Ο απώτερος σκοπός είναι η πλήρης αντικατάσταση των υδραυλικών με συστήματα που είναι όλα ηλεκτρικά. Η χρήση των έξυπνων υλικών μπορεί να βοηθήσει σ' αυτόν τον σκοπό, όπου για παράδειγμα, θα απαιτηθεί έλεγχος της κατάστασης στο τακάκι του δισκόφρενου προκειμένου να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα των φρένων. Αυτό θα χρειαστεί μέτρηση της θερμοκρασίας, του πάχους του τακακίου και της δύναμης των φρένων.

Έχουν αναπτυχθεί συστήματα ενεργής διαθεσιμότητας για την βελτίωση του ελέγχου του αυτοκινήτου και την άνεση του οδηγού. Η δυσκαμψία και η απόσβεση μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας συστήματα που περιλαμβάνουν ηλεκτρορολογικά υγρά, όμως έχουν προβλήματα με τη διάρκεια ζωής, την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και το κόστος. Οι περαιτέρω εξελίξεις σ' αυτά τα υλικά, και ίσως τα συστήματα που περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά υλικά θα μπορούσαν να ωφελήσουν τον κλάδο.

Μια περαιτέρω εφαρμογή των έξυπνων υλικών στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η χρήση των πολυμερών που έχουν μνήμη σχήματος σ' αυτό που αποκαλείται «ατζαμής οδηγός», όταν οι παραμορφώσεις λόγω των μικρών συγκρούσεων μπορούν να εξαλειφθούν με την αντιμετώπιση του μαρσαρίσματος. (Η επίδραση της μνήμης σχήματος επιτρέπει στο αρχικό σχήμα της δομής να επανέλθει). Το κόστος βεβαίως και πάλι θα επηρεάσει την πιθανή ευρεία χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Με αυτά τα νέα υλικά, η λειτουργικότητα μπορεί να προγραμματιστεί, επιτρέποντας σχεδιαστικές καινοτομίες, βελτιωμένη απόδοση και νέα, αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά που θα κάνουν τα αυτοκίνητά μας πιο συναρπαστικά σε εμφάνιση και λειτουργία σε σχέση με αυτά του παρελθόντος. Αυτοί οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες μπορούν να παρέχουν σημαντικά οφέλη όταν χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση συμβατικών ηλεκτρικών και υδραυλικών συσκευών, μειώνοντας τη μάζα του οχήματος, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του εξαρτήματος, βελτιώνοντας την ευελιξία σχεδίασης, τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία.

#### **4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΚΛΑΔΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Στον κλάδο των κατασκευών, οι εφαρμογές της έξυπνης τεχνολογίας χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: εποπτεία της ποιότητας της κατασκευής (συμπεριλαμβανομένου του εντοπισμού ζημιών), έλεγχος της δόνησης και έλεγχος του περιβάλλοντος του χρήστη (οπτικό, θερμικό, ηλεκτρο-μαγνητικό, ακουστικό κ.λ.π.). Υπάρχει επίσης διαχωρισμός μεταξύ των εφαρμογών που σχετίζονται πρωταρχικά με κατασκευές που φέρουν μεγάλο φορτίο και με εκείνες που έχουν σχέση με τον εσωτερικό και εξωτερικό σχεδιασμό του κτίσματος καθώς και της λειτουργίας.

Η εποπτεία της κατασκευαστικής υγείας είναι η πιο ώριμη προσέγγιση των έξυπνων υλικών και των συστημάτων τεχνολογίας σ' αυτόν τον κλάδο. Ο κλάδος των κατασκευών είναι στα πρόθυρα της πρακτικής πραγματοποίησης αυτών των τεχνολογιών, εστιάζοντας στην εποπτεία των φορτίων και των εντοπισμό των ζημιών στις αρχικές και τις επισκευασμένες κατασκευές. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα συστήματα οπτικών ινών μπήκαν σε εφαρμογή το 2001 για τον έλεγχο της ποιότητας των πολυμερών σύνθετων επενδύσεων που

χρησιμοποιούνται για να δυναμώσουν τις κατασκευές για την ανύψωση της καμάρας του Μετρό στο Λονδίνο.

Ο έλεγχος δονήσεων είναι η μέγιστη πρακτική εκδήλωση των ενεργών συστημάτων ελέγχου στην κατασκευή, πρωταρχικά για την μετρίαση των δονήσεων που προκαλούνται από τον αέρα και το σεισμό. Το ενδιαφέρον για τη δόνηση που προκαλείται από τον αέρα μεγαλώνει σε παγκόσμιο επίπεδο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί από τους σχεδιαστές γέφυρας και άλλων κατασκευών για τη χρήση λεπτών καλωδιακών κατασκευών, που είναι διάσημες για την αισθητική τους. Μια άλλη μαγνητική λύση, που βασίζεται στα μαγνητορεολογικά υγρά έχει επίσης εφαρμοστεί για την μείωση της έντασης της καλωδιακής γέφυρας στην Κίνα και στη μείωση των επιδράσεων του σεισμού στην Ιαπωνία. Η δυνατότητα χρήσης ενός έξυπνου υλικού περισσότερο για την άμεση κατασκευαστική ενίσχυση παρά για τον έλεγχο της δόνησης έχει ήδη περιγραφεί. Αυτό συνιστά τη χρήση κραμάτων με μνήμη σχήματος για υπεράκτιες κατασκευαστικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ενίσχυσης, της σύσφιξης και της ανύψωσης.

Μια θεωρία που εξετάζει τη μετρίαση των επιδράσεων της κατασκευαστικής ζημιάς (π.χ. από έναν σεισμό) χωρίς την ανάγκη για ένα σύστημα εποπτείας, είναι η κατασκευή που γίνεται από το ίδιο το κατασκεύασμα.

Ο περιβαλλοντολογικός έλεγχος είναι ένας κλάδος λιγότερο αναπτυγμένος στην εφαρμογή των έξυπνων τεχνολογιών. Οι εφαρμογές έχουν να κάνουν πρωταρχικά με τον εσωτερικό και εξωτερικό σχεδιασμό του κτίσματος, με έμφαση στον περιβαλλοντολογικό έλεγχο. Υπάρχουν επίσης δυνατοί δεσμοί στην έννοια του «έξυπνου κτισίου ή του σπιτιού» και της φροντίδας της υγείας, συμπεριλαμβανομένης της φροντίδας για του πιο ηλικιωμένους και την πρόληψη του εγκλήματος. Εν τέλει, τα έξυπνα υλικά και η σχετιζόμενη τεχνολογία, μπορούσε να ενσωματωθεί στους χώρους που

ανταποκρίνονται στον χρήστη μέσω της φωνής ή της κίνησης. Η κατανόηση της τεχνολογίας των έξυπνων υλικών θα είναι αμοιβαία εξαρτώμενη από το βαθμό στον οποίο εγκαθίσταται η τρέχουσα ώθηση προς την ενιαία τεχνολογία πληροφόρησης σ' αυτόν τον κλάδο.

Οι πιθανές εφαρμογές τέτοιων ευφυών συστημάτων/υλικών είναι άφθονες.

Παρακάτω ακολουθούν ορισμένες εφαρμογές αρκετές από τις οποίες βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη. Οι εφαρμογές των ευφυών υλικών περιλαμβάνουν :

- το σχεδιασμό έξυπνου «δέρματος» αεροσκαφών που ενσωματώνουν αισθητήρες οπτικών ινών για ανίχνευση δομικών ρωγμών
- γέφυρες με αισθητήρες αλλά και με κινούμενα στοιχεία για να αντιμετωπίζει βίαιες δονήσεις
- ιπτάμενα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα με τηλεχειρισμό για έρευνα και για αποστολές διάσωσης
- υποβρύχια οχήματα τύπου stealth με ειδικούς τεχνητούς μύες σχεδιασμένους για κολύμβηση φτιαγμένους από ειδικά πολυμερή σώματα
- βαλβίδες ελέγχου υψηλής ταχύτητας (αναλογικές βαλβίδες, βαλβίδες εμβόλου κλπ.)
- εγχυτήρες (καυσίμου, εκτυπωτικής μελάνης, βιοϊατρικοί δοσολόγοι, κ.τ.λ.)
- ρομποτικοί βραχίονες και χειριστές (robot manipulators)
- για τους οποίους απαιτείται ταχύτατη ανταπόκριση και υψηλή συχνότητα λειτουργίας
- γραμμικοί κινητήρες
- εφαρμογές σε συσκευές τοποθέτησης (positioning) υψηλής ακρίβειας

- αντλίες και μικροαντλίες (π.χ. αντλίες ψύξης για ηλεκτρονικές συσκευές)
- ενεργή απόσβεση ταλαντώσεων, δονήσεων και κραδασμών
- μηχανικοί συζεύκτες (φρένα, δαγκάνες, συγκρατητήρες)
- ηχοβολιστικές συσκευές (sonars)
- εφαρμογές υπερήχων
- μεγάφωνα
- ηλεκτρικές συνδεσμολογίες (ηλεκτρονόμοι, διακόπτες κυκλώματος)
- εφαρμογές αισθητήρων (αισθητήρες θέσης, χειριστήρια -joysticks παρακολούθηση δονήσεων)
- διάφορες εφαρμογές MEMS ενεργοποιητών (actuators)
- ημιενεργούς απορροφητές δόνησης
- αισθητήρες οπτικής ίνας σε γέφυρες
- εύκαμπτα φτερά για μη επανδρωμένα αεροπορικά οχήματα
- μηχανική δοκιμή και οι μικροδομικές μελέτες των υλικών MEMS
- ενεργητικός και παθητικός έλεγχος απόσβεσης για τις μεγάλες αστικές κατασκευές
- αυτοθεραπευόμενο σκυρόδεμα
- σύνθεση έξυπνων συστημάτων ενεργοποιητών για χαμηλής και υψηλής συχνότητας μακρό-κίνηση
- τηλεπισκόπηση της ζημίας στις μεγάλες αστικές κατασκευές που χρησιμοποιούν ενσωματωμένους αισθητήρες για το μετρίασμό κινδύνου και εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας ελεγχόμενης μορφής έξυπνες κατασκευή.



# Περιεχόμενα Σχημάτων

## Κεφάλαιο Α

- 1) Σχήμα Α.1 : Είδη μεταλλικών υλικών
- 2) Σχήμα Α.2 : «Έξυπνο» σύστημα. Το σημείο τομής των τριών κύκλων ορίζει την ύπαρξη των ευφυών υλικών
- 3) Σχήμα Α.3 : Διάγραμμα ελέγχου
- 4) Σχήμα Α.4: Τυπικά είδη ενεργοποιητών «έξυπνου» ελέγχου σχήματος

## Κεφάλαιο Β

- 1) Σχήμα Β.1 : (α) Δοκιμαστικό κρύσταλλο φάσης. (β) Αυτοπροσαρμογή των διδυμιών , Α, Β, C, και D, μετά από ψύξη και το μετασχηματισμό του μαρτενσίτη. (γ) Το Α γίνεται κυρίαρχο όταν εφαρμόζεται η πίεση. Επάνω στη θέρμανση, το υλικό επανέρχεται στη δοκιμαστική φάση και ανεκτά την αρχική μορφή του.
- 2) Σχήμα Β 1-2 : Ταξινόμηση των μετασχηματισμών φάσεων
- 3) Σχήμα Β.2 : Μηχανή παρασκευής SMA και έλεγχου σύστασης και θερμοκρασίας για κράματα Ni-Ti
- 4) Σχήμα Β.3 : Μηχανή Έλεγχου σύστασης και θερμοκρασίας κατά την παρασκευή κραμάτων Ni-Ti με μνήμη σχήματος
- 5) Σχήμα Β.4 : Διεργασία κατασκευής κυλινδρικής ράβδου με τη μέθοδο του πλάσματος
- 6) Σχήμα Β.5 : Εφελκυστική αντοχή κραμάτων Ni-Ti σε συνάρτηση με την επιμήκυνση σε υψηλές θερμοκρασίες

- 7) Σχήμα Β.6 : Φαινόμενο Μνήμης Σχήματος (SMA)
- 8) Σχήμα Β.7 : Χαρακτηριστικός βρόγχος υστέρησης των μετασχηματισμών
- 9) Σχήμα Β.8 : (Α) Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της μνήμης σχήματος σε μικροσκοπική (σε επίπεδο κρυστάλλου) και μακροσκοπική κλίμακα (ελατήριο).
- 10) Σχήμα Β.9 : Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων μεθόδων εκπαίδευσης.

## Κεφάλαιο Γ

- 1) Σχήμα Γ.1 : Διάγραμμα φάσης νικελίου-τιτανίου
- 2) Σχήμα Γ.2 (α): Κυβική δομή Ωστενίτη (β) Δομή πλέγματος μαρτενσίτη εμφάνιση διδυμών
- 3) Σχήμα Γ.3 : Η διαδικασία επίδρασης μνήμης σχήματος
- 4) Σχήμα Γ.4 : Χαρακτηριστική πίεση μετασχηματισμού εναντίον της καμπύλης θερμοκρασίας.  $M_f$ ,  $M_s$ ,  $A_s$  και  $A_f$  σημαίνουν ‘τέλος μαρτενσίτη’, αρχή μαρτενσίτη’ και αντίστοιχα οι θερμοκρασίες για των ωστενίτη
- 5) Σχήμα Γ.5: Οπτικά μικρογραφήματα της αύξησης ενός κρυστάλλου SMA λόγω της ψύξης
- 6) Πίνακας Γ.1: Κοινές μηχανικές ιδιότητες του NiTi
- 7) Πίνακας Γ.2 : Ιδιότητες των κραμάτων μνήμης μορφής Ni-Ti
- 8) Σχήμα Γ.7: Τυπικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες σχετικά με το μετασχηματισμό, δείχνουν: (α) Ωστενίτης, (β) Μαρτενσίτης, (c) Ψευδοελαστική συμπεριφορά

- 9) Σχήμα Γ.8 : Ψευδοελαστικότητα. AS, AF κ MS κ MF θερμοκρασία στην οποία ο σχηματισμός του ωστενίτη και του μαρτενσίτη αρχίζει και τελειώνει, αντίστοιχα.  $\sigma$ - $\epsilon$  = τάση-παραμόρφωση καμπύλη.
- 10) Σχήμα Γ.9 : Επίδραση μνήμης σχήματος
- 11) Σχήμα Γ.10 : Επίδραση μετασχηματισμού Φάσης
- 12) Σχήμα Γ.11: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης του μαρτενσίτη
- 13) Σχήμα Γ.12 : Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του ωστενίτη σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης του ωστενίτη
- 14) Σχήμα Γ.13 : Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τη σύγκριση του επιπέδου τάσης στις φάσεις ωστενίτη και μαρτενσίτη.
- 15) Σχήμα Γ.14 : Επίδραση σε ανολοκλήρωτους κύκλους θέρμανσης στην ειδική αντίσταση σε κράμα Ti-50.8%Ni (960°3h)
- 16) Σχήμα Γ.15 : Μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία σε κράμα  $Ti_{50}Ni_{49}Fe_1^3$

## Κεφάλαιο Δ

- 1) Εικόνα 1: Στεντς τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να συγκρατούν ανοιχτές αρτηρίες του ανθρώπινου σώματος κατασκευασμένα από υλικά με μνήμη σχήματος.
- 2) Εικόνα 2: Στεντ
- 3) Εικόνα 3: Ορθοδοντικές τράντες και σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται ευρέως από την οδοντιατρική για την ευθυγράμμιση και την καλύτερη εμφάνιση των δοντιών.

- 4) Εικόνα 4 :Πρωτότυπα φωτιστικά κατασκευασμένα από υλικά με μνήμη σχήματος που αλλάζουν μορφή ανάλογα με τη θερμοότητα που εκπέμπεται.
- 5) Εικόνα 5: Διαστημικό τηλεσκόπιο της NASA με ηλιακούς συλλέκτες κατασκευασμένους από υλικά με μνήμη σχήματος.
- 6) Εικόνα 6 : (α) Η επένδυση στη μειωμένη διάμετρο αμέσως μετά την εισαγωγή. (β) Η επένδυση σε άμορφη κατάσταση, ενώ έχει ενεργοποιηθεί το υλικό με μνήμη σχήματος. (γ) Μετά την ψύξη και κρυστάλλωση, επιτυγχάνουμε τη πλησιέστερη στην αρχική μορφή του σωλήνα .
- 7) Εικόνα 7: Χρήση καλωδίων και συρμάτων ως ενεργοποιητές και ως σφικτήρες από την αεροναυπηγική.
- 8) Εικόνα 8: Σύρματα νικελίου τιτανίου που χρησιμοποιούνται από την αεροναυπηγική.
- 9) Εικόνα 9: Πλαίσια γυαλιών οράσεως κατασκευασμένα από κράμα νικελίου τιτανίου με ικανότητα μνήμης σχήματος.
- 10) Εικόνα 10: Πλαίσιο γυαλιών νικελίου τιτανίου το οποίο δέχεται καταπόνηση με λυγισμό χωρίς να υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις.
- 11) Εικόνα 11: Πλαίσιο γυαλιών νικελίου τιτανίου το οποίο δέχεται καταπόνηση με στρέψη χωρίς να υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις
- 12) Εικόνα 12: Μηχανή SMA
- 13) Εικόνα 13: Κινητήρας κατασκευασμένος από υλικά με μνήμη σχήματος με σκοπό την θερμομηχανική ανάκτηση του συστήματος.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΒΙΒΛΙΑ**

- 1) Βιβλίο , Dimitris C. Lagoudas, Modeling and engineering applications .
- 2) Βιβλίο , D. Michelle Addington, Daniel L. Schodek , Smart materials and new technologies: for the architecture and design .
- 3) Βιβλίο ,Κωνσταντίνος Καμαριανάκης – Γενικά για την χύτευση.
- 4) Βιβλίο , Παππάς, Παναγιώτης – Νεκτάριος(2009-07-15) , "Ευφυή" σύνθετα υλικά με ενσωματωμένα κράματα μνήμης σχήματος .
- 5) Βιβλίο , Ralph C. Smith, Smart material systems.
- 6) Βιβλίο , Vol. 55, No. 2, pp. 173-189, 2008 , RMZ – Materials and Geoenvironment.

### **ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ**

- 1) Δημοσίευση , [www.nea-acropoli.gr](http://www.nea-acropoli.gr), Μελέτη με θέμα τον αρχαιοελληνικό πολιτισμό - Η τέχνη της μεταλλουργίας .
- 2) Δημοσίευση , Σ.Α. Παϊπέτη, Καθηγήτης Πανεπιστημίου Πατρών: «Αμυντικά όπλα στα Ομηρικά έπη».
- 3) Δημοσίευση , Ηλιοπούλου, Βασιλική (2010-10-13) , Εφαρμογές έξυπνων υλικών σε πλατφόρμες οστεογένεσης .
- 4) Δημοσίευση , Εφημερίδα το Βήμα , Γιάννης Αντωνόπουλος – Θεόδωρος Καρακώστας , Η εποχή των υλικών .

- 5) Δημοσίευση , Cambridge University Press, 1998 , K. Otsuka, C.M. Wayman (Eds), Shape Memory Materials .
- 6) Δημοσίευση , [www.geocities.com](http://www.geocities.com) , Μελέτη με θέμα «Μεταλλουργία και ορυχεία».
- 7) Περιοδικό, National Geographic, τεύχος Απριλίου 1999, σελίδες 132 έως 141

## **ΜΕΛΕΤΕΣ**

- 1) Μελέτη , Mel M. Schwartz ,Smart materials .
- 2) Διδακτορική Διατριβή , Κόκκινος Αναστάσιος 2007 Πάτρα , Σχεδιασμός ενδομυελικού ήλου διατακτικής οστεογένεσης καταγμάτων με χρήση έξυπνων υλικών με μνήμη σχήματος. Εφαρμογή των έξυπνων υλικών με μνήμη σχήματος στην ορθοπεδική.

## **ΙΣΤΙΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- 1) Ιστοσελίδα , (<http://gym-vrachn.ach.sch.gr>) , Οι χημικές τέχνες στην αρχαιότητα .
- 2) Ιστοσελίδα, Wikipedia  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Shape\\_memory\\_alloy](http://en.wikipedia.org/wiki/Shape_memory_alloy)).
- 3) Ιστοσελίδα  
(<http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/handle/123456789/2618>)
- 4) Ιστοσελίδα  
(<http://www.dimitriskaranikolas.gr/main.asp?ElementId=13859>)