



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

των

**ΜΠΡΙΛΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ**

**ΤΖΑΓΚΟΥΡΝΗ ΜΑΡΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: κα ΜΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΥ ΑΜΑΛΙΑ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2022**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ολοκληρώνοντας τη πτυχιακή μας εργασία, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μας όλο αυτό το διάστημα, που μας στήριξαν και πίστεψαν σε μας.

Συγκεκριμένα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την επιβλέπων καθηγήτρια, την κ. Αμαλία Μουτσοπούλου

για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα, για την

υπομονή που έδειξε και την άμεση ανταπόκριση σε όποια βοήθεια χρειαζόμασταν.

Θα θέλαμε, επίσης, να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας που πάντα ήταν δίπλα μας και

μας εμπύχωναν διαρκώς, δείχνοντάς μας εμπιστοσύνη.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους τους καθηγητές του τμήματος για τις γνώσεις

που μας προσέφεραν και που πάντα ήταν πρόθυμοι να βοηθήσουν σε κάθε δυσκολία.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΞΩΦΥΛΛΟ</b>	<b>1</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>2</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b>	<b>3</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>5</b>
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2. ΑΜΕΣΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	6
1.3. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	6
1.4. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	7
1.5. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	8
1.5.1. ΥΠΟΒΡΥΧΙΟ ΡΑΝΤΑΡ – SONAR	8
1.5.2. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ	9
1.5.3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΗΧΕΙΑ ΚΑΙ ΒΟΜΒΗΤΕΣ	10
1.5.4. ΠΙΕΖΟ-ΟΔΗΓΟΙ	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΞΥΨΙΝΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>11</b>
2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΥΨΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
2.2. ΥΛΙΚΑ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΗ: ΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΚΥΤΤΑΡΙΝΗΣ	12
2.3. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	12
2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΥΨΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ	13
2.4.1. ΙΑΤΡΙΚΗ ΧΡΗΣΗ	13
2.4.2. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	13
2.4.3. ΈΞΥΨΙΝΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	13
2.4.4. ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ Η ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	14
2.5. ΕΙΔΗ ΕΞΥΨΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	14
2.5.1. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	14
2.5.2. ΥΛΙΚΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	14
2.5.3. ΧΡΩΜΟΔΡΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	14
2.5.4. ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	15
2.5.5. ΦΩΤΟΕΝΕΡΓΑ ΥΛΙΚΑ	15
2.6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΞΥΨΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	15
2.7. ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥΣ	16
2.7.1. ΓΡΑΦΙΤΗΣ	16
2.7.2. ΔΙΑΜΑΝΤΙ	17
2.7.3. ΓΡΑΦΕΝΙΟ	18
2.7.4. ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΚΟΥΚΚΙΔΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ	22
2.7.5. ΦΟΥΛΕΡΕΝΙΑ	23
2.7.6. ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΪΝΕΣ	25
2.7.7. ΝΑΝΟ-ΚΡΕΜΜΥΔΙΑ ΑΝΘΡΑΚΑ	29
2.7.8. ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΑΝΘΡΑΚΑ	30
2.7.9. Q-CARBON	31

2.7.10.	ΑΕΡΟΠΗΚΤΑ ΑΝΘΡΑΚΑ (ΑΕΡΟΓΕΛΗ) ΚΑΙ ΑΕΡΟΓΡΑΦΙΤΗΣ	33
2.7.11.	ΥΛΙΚΑ ΑΝΘΡΑΚΑ – ΑΝΘΡΑΚΑ	35
2.7.12.	ΥΛΙΚΑ ΑΝΘΡΑΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΖΟΜΕΝΑ ΑΠΟ CO <sub>2</sub>	36
2.7.13.	ΑΝΘΡΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΜΑΝΤΙΟΥ (DLC) ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ PVD	36
2.7.14.	ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΝΘΡΑΚΑ	39

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ** **40**

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>40</b>
<b>ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΓΝΩΣΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΟΜΕΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ</b>	<b>40</b>
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	40
ΥΛΙΚΑ ΜΝΗΜΗΣ	42
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	45
ΧΡΩΜΟΓΟΝΑ ΥΛΙΚΑ	45
<b>ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ, ΈΡΓΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΠΡΟΒΛΟΙ</b>	<b>47</b>
ΑΣΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ	47
ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	49
ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	50
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ	54
ΒΙΟΪΛΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	55

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ** **58**

<b>4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>58</b>
<b>4.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</b>	<b>59</b>
4.2.1. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	60
4.2.2. ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	60
4.2.3. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ	61
4.2.4. ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ	61
4.2.5. ΗΛΕΚΤΡΟΣΥΣΤΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	61
4.2.6. ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	62
4.2.7. ΦΩΤΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	62
<b>4.3. ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΑ ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>62</b>
4.3.1. ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ	64
4.3.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΜΕΣ	64
4.3.3. ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	65
4.3.4. ΕΝΕΡΓΕΣ ΔΟΜΕΣ	65
4.3.5. ΕΥΦΥΕΙΣ Η ΕΞΥΠΝΕΣ ΔΟΜΕΣ	65
<b>4.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b>	<b>65</b>
<b>4.5. ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>68</b>
4.5.1. ΣΥΝΘΕΣΗ ΝΑΝΟ-ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	71
4.5.2. ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	71
4.5.3. ΑΜΦΙΦΙΛΑ ΜΠΛΟΚ ΣΥΜΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΜΙΚΚΥΛΙΑ ΑΥΤΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ	71
<b>4.6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</b>	<b>72</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ** **74**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

### 1.1. Εισαγωγή

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι υλικά που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν τοποθετούνται υπό μηχανική καταπόνηση. Η πιεζοηλεκτρική διαδικασία είναι επίσης αναστρέψιμη, οπότε αν εφαρμοστεί ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτά τα υλικά, στην πραγματικότητα θα αλλάξουν ελαφρώς το σχήμα τους (κατ' ανώτατο όριο 4%).

Υπάρχουν αρκετά υλικά που γνωρίζουμε εδώ και αρκετό καιρό και διαθέτουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, όπως οστά, πρωτεΐνες, κρύσταλλοι (π.χ. χαλαζίας) και κεραμικά (π.χ. τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος).

Ωστόσο, τον Μάιο του 2012, ανακοινώθηκε ότι οι επιστήμονες του εργαστηρίου του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Μπέρκλεϋ έχουν βρει έναν μηχανισμό αξιοποίησης της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας από ιούς. Είναι η πρώτη φορά που ένα βιολογικό υλικό χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας.

Η πιεζοηλεκτρική ενέργεια ανακαλύφθηκε από δύο Γάλλους επιστήμονες και αδερφούς, τον Ζακ και τον Πιέρ Κιουρί, το 1880. Ανακάλυψαν για την πιεζοηλεκτρική ενέργεια αφού συνειδητοποίησαν για πρώτη φορά ότι η πίεση που ασκείται στο χαλαζία ή ακόμη και σε συγκεκριμένους άλλους κρυστάλλους, δημιουργούν ηλεκτρικό φορτίο σε αυτό το συγκεκριμένο υλικό. Αργότερα αναφέρθηκαν σε αυτό το παράξενο και επιστημονικό φαινόμενο ως το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Οι αδελφοί Κιουρί ανακάλυψαν σύντομα το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτό συνέβη μετά την επαλήθευση ότι όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμοστεί σε κρυσταλλικό μόλυβδο, οδηγεί σε δυσπλασία ή διαταραχή σε αυτόν – κάτι που τώρα ονομάζεται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

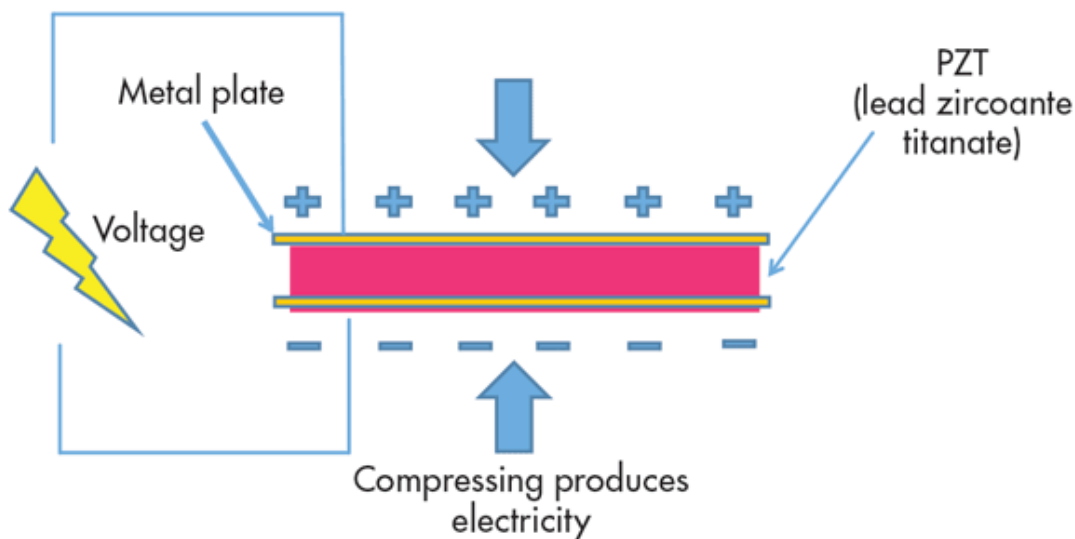
Ο όρος πιεζοηλεκτρισμός προέρχεται από την ελληνική λέξη «πιέζω», ενώ είναι ενδιαφέρον ότι το ήλεκτρο είναι το κεχριμπάρι. Το κεχριμπάρι τυγχάνει επίσης να είναι πηγή ηλεκτρικού φορτίου.

Πολλές ηλεκτρονικές συσκευές χρησιμοποιούν σήμερα πιεζοηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται κάποιο είδος λογισμικού αναγνώρισης φωνής όπως η Siri στο smartphone, το μικρόφωνο στο οποίο μιλάμε πιθανότατα χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο πιεζοκρύσταλλος μετατρέπει την ηχητική ενέργεια από την φωνή σε ηλεκτρικά σήματα για να τα ερμηνεύσει ο υπολογιστής ή το τηλέφωνο. Όλα αυτά καθίστανται δυνατά με την πιεζοηλεκτρική ενέργεια.

Η δημιουργία διαφόρων πιο προηγμένων τεχνολογιών μπορεί να εντοπιστεί στην ανακάλυψη της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, τα ισχυρά ευαίσθητα μικρόφωνα σόναρ «sonobuoy» και ο κεραμικός μετατροπέας ήχου, είχαν την δυνατότητα να δημιουργηθούν λόγω της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα βλέπουμε την ανάπτυξη ολοένα περισσότερων πιεζοηλεκτρικών υλικών και συσκευών.

## 1.2. Άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Όπως αναφέρθηκε, η συμπίεση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού παράγει ηλεκτρική ενέργεια (πιεζοηλεκτρική). Το σχήμα 1 εξηγεί την έννοια.



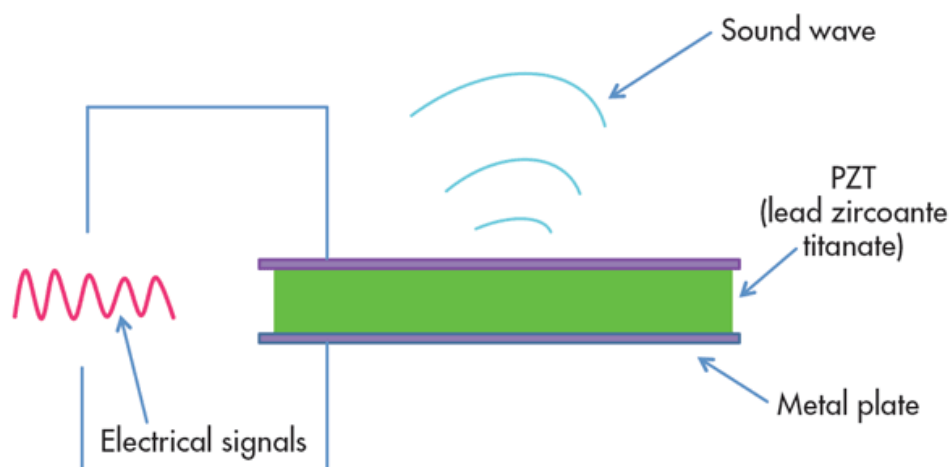
Σχήμα 1. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει μέσω συμπίεσης πιεζοηλεκτρικού υλικού.

Το πιεζοκεραμικό υλικό – μη αγώγιμο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό ή κρύσταλλος – τοποθετείται μεταξύ των δύο μεταλλικών πλακών. Για να δημιουργηθεί πιεζοηλεκτρική ενέργεια, χρειάζεται το υλικό να συμπιεστεί. Η μηχανική τάση που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό υλικό παράγει ηλεκτρισμό.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1, υπάρχει δυναμικό τάσης στο υλικό. Οι δύο μεταλλικές πλάκες συμπιέζουν εντός τους τον πιεζοκρύσταλλο. Οι μεταλλικές πλάκες συλλέγουν τα φορτία, τα οποία δημιουργούν/ παράγουν τάση (στο σχήμα την βλέπουμε με το σύμβολο του κεραυνού), δηλαδή πιεζοηλεκτρική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο λειτουργεί σαν μια μικροσκοπική μπαταρία, επειδή παράγει ηλεκτρισμό. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιλαμβάνουν μικρόφωνα, αισθητήρες πίεσης, υδρόφωνα και πολλούς άλλους τύπους συσκευών ανίχνευσης.

## 13. Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να αντιστραφεί και αναφέρεται ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτό δημιουργείται εφαρμόζοντας ηλεκτρική τάση για να συρρικνωθεί ή να διογκωθεί ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (Σχ. 2). Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.



Σχήμα 2. Η αντιστροφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, γνωστή ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, παρουσιάζεται όταν εφαρμόζεται τάση για συρρίκνωση ή μεγέθυνση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου.

Η χρήση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη συσκευών που παράγουν ακουστικά ηχητικά κύματα. Παραδείγματα πιεζοηλεκτρικών ακουστικών συσκευών είναι τα ηχεία (συνήθως βρίσκονται σε φορητές συσκευές) ή βομβητές. Το πλεονέκτημα της ύπαρξης τέτοιων ηχείων είναι ότι είναι πολύ λεπτά, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα σε μια σειρά τηλεφώνων. Ακόμη και οι ιατρικοί υπερηχογράφοι και οι μετατροπείς σόναρ χρησιμοποιούν το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι μη ακουστικές αντίστροφες πιεζοηλεκτρικές συσκευές περιλαμβάνουν κινητήρες και ενεργοποιητές.

#### 1.4. Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι υλικά που μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό λόγω μηχανικής καταπόνησης, όπως η συμπίεση. Αυτά τα υλικά μπορούν επίσης να παραμορφωθούν όταν εφαρμόζεται τάση (ηλεκτρική ενέργεια). Όλα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά δεν είναι αγώγιμα ώστε να εμφανιστεί και να λειτουργεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: κρύσταλλους και κεραμικά.

Μερικά παραδείγματα πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι το PZT (επίσης γνωστό ως τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος), το τιτανικό βάριο και το νιοβικό λίθιο. Αυτά τα τεχνητά υλικά έχουν πιο έντονο αποτέλεσμα (έχουν οριστεί δηλαδή ως καλύτερα υλικά προς χρήση) από το χαλαζία και άλλα φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Αν τώρα συγκρίνουμε το PZT με τον χαλαζία, το PZT μπορεί να παράγει περισσότερη τάση για την ίδια ποσότητα εφαρμοζόμενης μηχανικής καταπόνησης. Αντίθετα, η εφαρμογή τάσης στο PZT αντί για τον χαλαζία, παρέχει περισσότερη κίνηση. Ο χαλαζίας, είναι επίσης το πρώτο γνωστό πιεζοηλεκτρικό υλικό.

Το PZT δημιουργείται και παράγεται (σε υψηλές θερμοκρασίες) με δύο χημικά στοιχεία – τον μόλυβδο και το ζirkόνιο – και συνδυάζεται με μια τιτανική χημική ένωση. Ο χημικός τύπος του PZT είναι  $(\text{Pb}[\text{Zr}(x)\text{Ti}(1-x)]\text{O}_3)$ . Συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή μετατροπέων υπερήχων, κεραμικών πυκνωτών και άλλων αισθητήρων και ενεργοποιητών. Αναδεικνύει επίσης μια ειδική γκάμα διαφορετικών ιδιοτήτων. Το 1952, το PZT κατασκευάστηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Τόκιο.

Το τιτανικό βάριο είναι ένα σιδηροηλεκτρικό κεραμικό υλικό με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, το τιτανικό βάριο έχει χρησιμοποιηθεί ως πιεζοηλεκτρικό υλικό για πολλά περισσότερα χρόνια από τα περισσότερα άλλα αντίστοιχα υλικά. Ο χημικός τύπος του είναι  $\text{BaTiO}_3$ . Το τιτανικό βάριο ανακαλύφθηκε το 1941 κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου

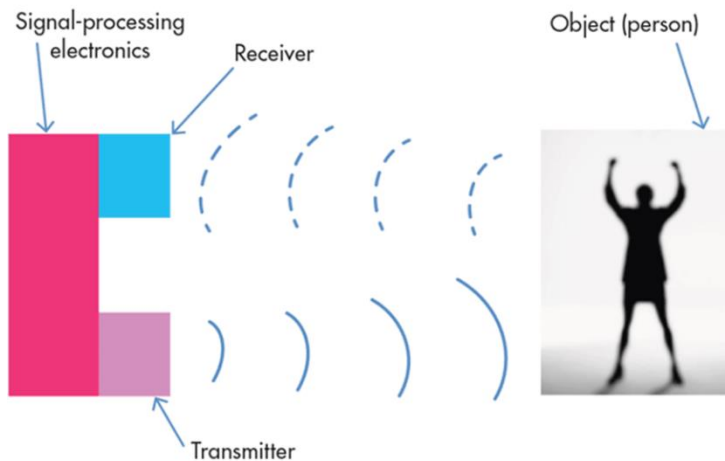
Το νιοβικό λίθιο είναι μια ένωση που συνδυάζει οξυγόνο, λίθιο και νιόβιο. Ο χημικός τύπος του είναι  $\text{LiNbO}_3$ . Είναι επίσης ένα σιδηροηλεκτρικό κεραμικό υλικό και ακριβώς όπως το τιτανικό βάριο, καθώς έχει και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες.

## **1.5. Πιεζοηλεκτρικές συσκευές**

### **1.5.1. Υποβρύχιο ραντάρ – Sonar**

Το Sonar, αναπτύχθηκε το 1900 από τον Lewis Nixon. Αρχικά ανέπτυξε το σόναρ για να εντοπίσει παγόβουνα. Το ενδιαφέρον για το σόναρ αυξήθηκε κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, ωστόσο, για να βοηθήσει στον εντοπισμό υποβρυχίων. Φυσικά, το σόναρ έχει πολλούς σκοπούς και χρήσεις σήμερα, από τον εντοπισμό ψαριών έως την υποβρύχια πλοήγηση και ούτω καθεξής.





**Σχήμα 3.** Με το πιεζοηλεκτρικό σόναρ, ένας πομπός που χρησιμοποιεί το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στέλνει ένα ηχητικό κύμα για αναζήτηση αντικειμένων που βρίσκονται μπροστά

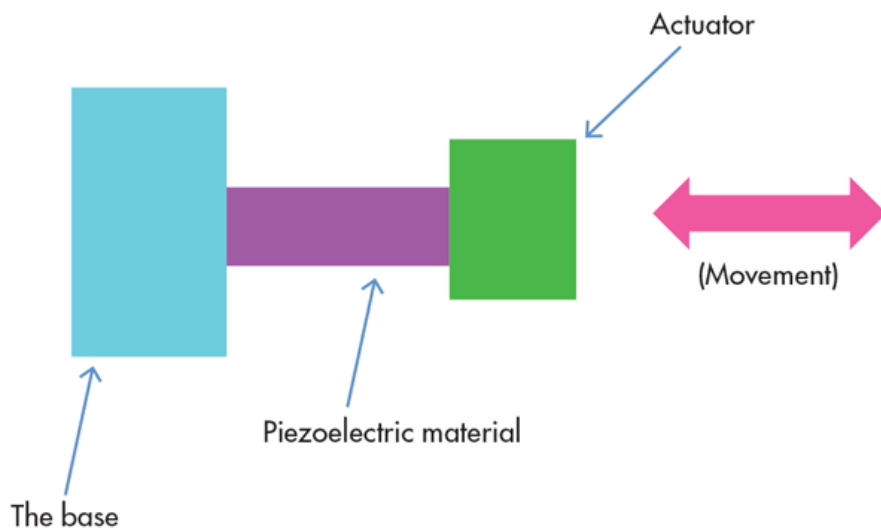
Στο Σχήμα 3, το σόναρ στέλνει, μέσω πομπού, ένα ηχητικό κύμα (σήμα) για αναζήτηση αντικειμένων που βρίσκονται μπροστά. Ο πομπός χρησιμοποιεί αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, που συμβαίνει όταν ο πομπός χρησιμοποιεί τάση για να τον βοηθήσει να στείλει ένα ηχητικό κύμα. Μόλις το ηχητικό κύμα χτυπήσει πάνω σε ένα αντικείμενο, θα επιστρέψει. Το ηχητικό κύμα που αναπηδά προς τα πίσω, θα ανιχνευθεί από τον δέκτη.

Ο δέκτης, σε αντίθεση με τον πομπό, χρησιμοποιεί το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η πιεζοηλεκτρική συσκευή του δέκτη συμπιέζεται από το ηχητικό κύμα που επιστρέφει. Στέλνει το σήμα (τάση) στα ηλεκτρονικά επεξεργασίας σήματος, τα οποία λαμβάνουν αυτό το κύμα ήχου και ξεκινούν την επεξεργασία του. Με τον τρόπο αυτό θα καθορίσει την απόσταση του αντικειμένου υπολογίζοντας τα σήματα χρονισμού από τον πομπό και το δέκτη.

### 1.5.2. Πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές

Το σχήμα 4 δείχνει τη λειτουργία ενός πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή. Η βάση παραμένει ακίνητη και ενεργεί σαν τη μεταλλική πλάκα που συμπιέζει μέσα της το πιεζοηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται στην μέση. Στη συνέχεια εφαρμόζεται τάση στο υλικό, το οποίο διαστέλλεται και συστέλλεται από το ηλεκτρικό πεδίο της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο πιεζοκρύσταλλος κινείται πολύ λίγο, είτε μπροστά είτε πίσω. Μόλις το πιεζοηλεκτρικό υλικό ή ο κρύσταλλος κινηθεί, πιέζει και τραβά αργά τον ενεργοποιητή.

Ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής έχει πολλές χρήσεις και εφαρμογές. Για παράδειγμα, μηχανές πλέξης και μηχανές μπράιγ χρησιμοποιούν αυτούς τους ενεργοποιητές, καθώς έχουν μικρή ποσότητα κινούμενων μερών και πολύ απλό σχεδιασμό. Μπορούν ακόμη και να βρεθούν σε βιντεοκάμερες και κινητά τηλέφωνα, επειδή αποδεικνύονται πιο ικανά ως μηχανισμός αυτόματης εστίασης.



Σχήμα 4. Σε έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή, εφαρμόζεται τάση στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, προκαλώντας διαστολή και συστολή

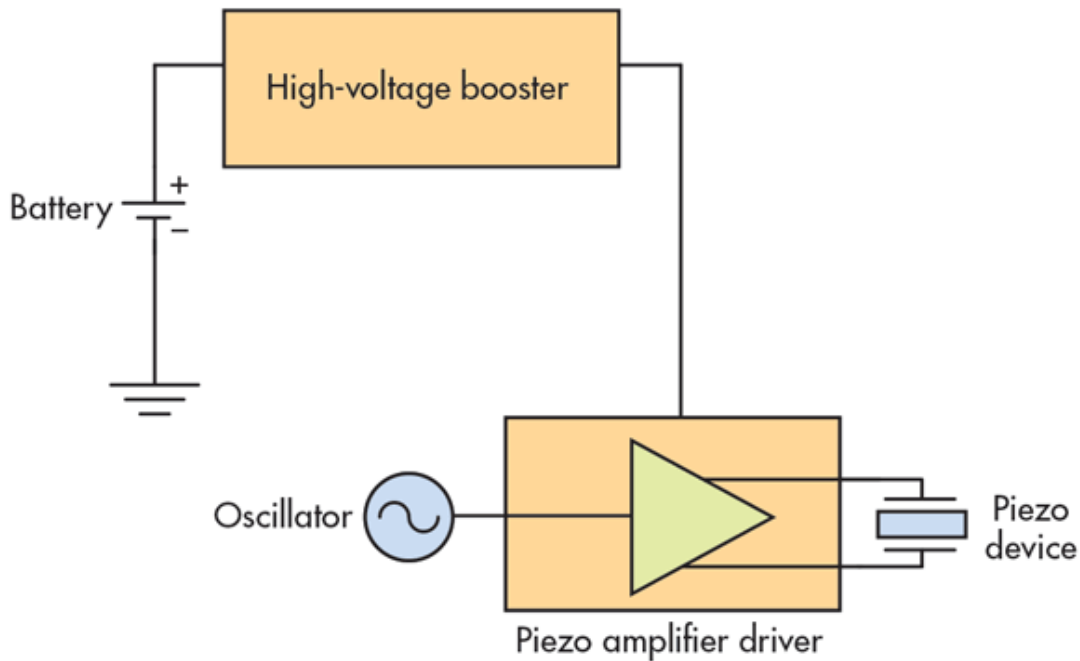
### 1.5.3. Πιεζοηλεκτρικά ηχεία και βομβητές

Τα πιεζοηλεκτρικά ηχεία και οι βομβητές χρησιμοποιούν το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για να παράγουν ήχο. Όταν εφαρμόζεται τάση σε ηχεία και βομβητές, δημιουργούνται ηχητικά κύματα (Σχ. 2). Ένα σήμα τάσης ήχου που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό των ηχείων ή των βομβητών θα προκαλέσει την δόνηση του υλικού στον αέρα. Αυτή η δόνηση παράγει ηχητικά κύματα, τα οποία βγαίνουν από το ηχείο.

Τα πιεζοηλεκτρικά ηχεία χρησιμοποιούνται συνήθως σε ξυπνητήρια ή άλλες μικρές μηχανικές συσκευές για τη δημιουργία απλών, υψηλής ποιότητας ήχων. Αυτό οφείλεται στο ότι περιορίζονται σε ένα μικρό ποσοστό απόκρισης συχνότητας.

### 1.5.4. Πιεζο-οδηγοί

Οι πιεζο-οδηγοί μπορούν να μετατρέψουν την χαμηλή τάση μπαταρίας σε υψηλή τάση σε πιεζοηλεκτρικές συσκευές. Οι πιεζο-οδηγοί είναι πολύ σημαντικοί, επειδή βοηθούν τους μηχανικούς να παράγουν περισσότερη τάση για να δημιουργήσουν μεγαλύτερα ημιτονοειδή κύματα.



Σχήμα 5. Μέθοδος λειτουργίας του πιεζο-οδηγού

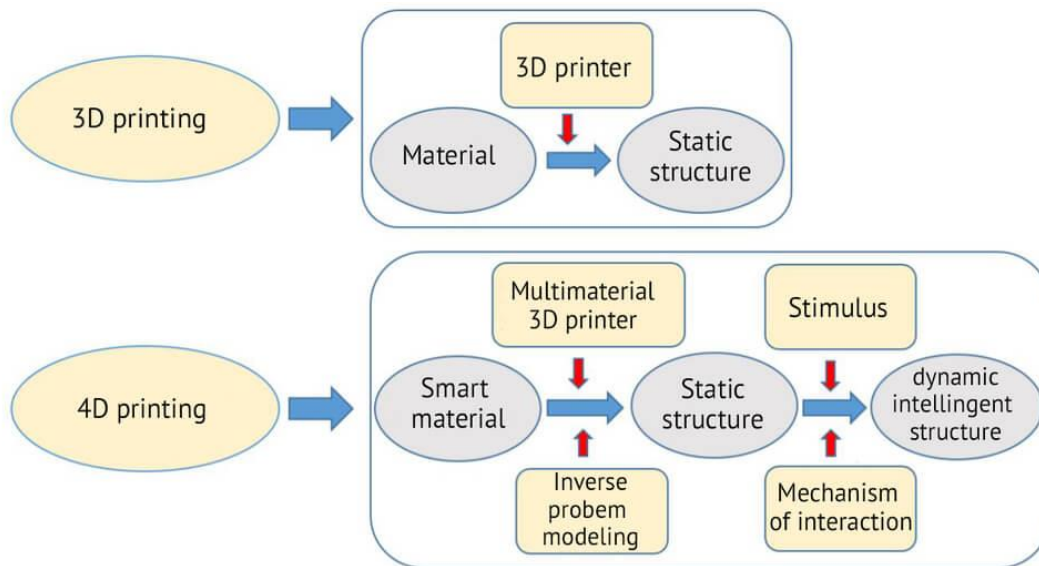
Το Σχήμα 5 είναι ένα διάγραμμα μπλοκ που απεικονίζει τη λειτουργία πιεζο-οδηγού. Ένας πιεζο-οδηγός μετατρέπει την χαμηλή τάση μπαταρίας σε υψηλότερη τάση, η οποία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός ενισχυτή που λειτουργεί τη συσκευή. Ένας ταλαντωτής εισάγει μικρά ημιτονοειδή κύματα που ο ενισχυτής μετατρέπεται σε μεγαλύτερα ημιτονοειδή κύματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ

### 2.1. Ορισμός έξυπνων υλικών

Τα έξυπνα υλικά είναι υλικά που αντιδρούν σε εξωτερικές διεγέρσεις και έχουν μία ή περισσότερες ιδιότητες. Θα μπορούσαμε επίσης να τα ονομάσουμε υλικά που ανταποκρίνονται. Αυτά τα αντικείμενα μπορούν να αλλάξουν σχήμα ή συμπεριφορές με ζεστό νερό, πίεση, χημικά, φως ή θερμότητα.

Αυτά τα έξυπνα υλικά θα μπορούσαν ακόμη και να αυτοσυναρμολογούνται όταν τα αγγίζετε. Όταν ένα ερέθισμα εφαρμόζεται σε ένα τέτοιο αντικείμενο, είναι δυνατό να μεταμορφωθεί σε ένα ολοκαίνουργιο σχήμα καθώς αυτά τα υλικά αντιδρούν στο εξωτερικό τους περιβάλλον.



Σχήμα 6. Διαφορές μεταξύ των διαδικασιών εκτύπωσης 3D και 4D εκτύπωσης

## 2.2. Υλικά εμπνευσμένα από τη φύση: Οι δυνατότητες της κυτταρίνης

Ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ και το Πανεπιστήμιο του Μπαθ εργάζονται σε βιοεμπνευσμένα αντικείμενα. Για παράδειγμα, εμπνεύστηκαν από τη συμπεριφορά ενός κουκουναριού στο νερό. Πράγματι, βυθισμένο στο νερό, το κουκουνάρι αλλάζει σχήμα και ανασύρεται.

Για αυτό το πείραμα, οι ερευνητές εργάστηκαν με κυτταρίνη. Η κυτταρίνη είναι ένα πραγματικά απορροφητικό υλικό και είναι επίσης το πιο άφθονο οργανικό πολυμερές στη Γη. Αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν αυτό το υλικό που μπορεί να κλείνει όπως το κουκουνάρι, όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, για να δημιουργήσουν ένα μελάνι, συνδυάζοντας υδρογέλη, σωματίδια αργίλου και πολτό κυτταρίνης. Αυτό το πείραμα οδηγεί στη δημιουργία ενός έξυπνου υλικού, ικανού να αντιδρά σε ερεθίσματα.

Η έμπνευση από τη φύση δεν είναι μια νέα μέθοδος για τους ερευνητές. Στην πραγματικότητα ονομάζεται βιομίμηση. Αυτή η διαδικασία μας βοηθά να αναπτύξουμε νέα υλικά που δημιουργούν νέες δυνατότητες παραγωγής. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τη φύση, να μάθουμε από αυτήν και να τη χρησιμοποιήσουμε προς όφελός μας.

## 2.3. Πολυμερή μνήμης σχήματος

Ένα πολυμερές με μνήμη σχήματος είναι ένα έξυπνο υλικό που προσφέρει μια πραγματικά μεγάλη ελαστική παραμόρφωση, ως απόκριση στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Για να αλλάξει το σχήμα του και να

αναπτύξει την ελαστικότητά του, το υλικό πρέπει να εκτεθεί σε θερμότητα, φως, ηλεκτρισμό, υγρασία, για παράδειγμα.

Αυτά τα πολυμερή μνήμης σχήματος κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μικροστερεολιθογραφία προβολής.

## **2.4. Εφαρμογές έξυπνων υλικών στην 4D εκτύπωση**

### **2.4.1. Ιατρική χρήση**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθά πραγματικά την ιατρική βιομηχανία και η ανάπτυξη της βιοεκτύπωσης βοηθά επίσης. Ποιος θα μπορούσε να είναι ο ρόλος της 4D εκτύπωσης για την υγειονομική περίθαλψη; Τα πολυμερή μνήμης σχήματος θα μπορούσαν να εισαχθούν μέσα στο σώμα και να αντιδράσουν στις αλλαγές και τη διέγερση του σώματος. Πράγματι, θα μπορούσε να επιτρέψει τη δημιουργία ολοκαίνουργιων αντιβιοτικών που αντιδρούν, για παράδειγμα, στις αλλαγές της θερμοκρασίας του σώματος.

### **2.4.2. Βελτίωση των συσκευών για ενέργεια**

Μια πιθανή χρήση υλικών μνήμης σχήματος θα ήταν σε ηλιακούς συλλέκτες που θα λειτουργούσαν ως αισθητήρες για την ανίχνευση του ήλιου. Με αυτόν τον τρόπο, τα ηλιακά πάνελ θα μπορούσαν να περιστρέφονται πλήρως αυτόματα προς τη σωστή κατεύθυνση. Σε συνδυασμό με τη ρομποτική, θα μπορούσε να επιτρέψει τη δημιουργία ηλιακών συλλεκτών πλήρως βελτιστοποιημένων για τη μέγιστη ηλιακή ενέργεια.

### **2.4.3. Έξυπνα υλικά για την κατασκευή**

Ο συνδυασμός παραδοσιακών δομικών υλικών με έξυπνο υλικό θα μπορούσε πραγματικά να είναι μια εξαιρετική λύση για να μπορέσουν οι κατασκευές να αναπτυχθούν, να αυτοεπισκευαστούν ή να προσαρμοστούν αρκετά γρήγορα στο περιβάλλον τους. Αυτό ακριβώς εξετάζει το Engineered Living Materials (ELM) της DARPA: χρήση ζωντανών βιοϋλικών για αρχιτεκτονική και κατασκευή!

#### **2.4.4. Αεροναυπηγική ή αυτοκινητοβιομηχανία**

Η Airbus SAS αρχίζει να χρησιμοποιεί ένα «έξυπνο» υλικό που σχετίζεται με 4D που αντιδρά στη θερμοκρασία για να ψύχονται οι κινητήρες αεριωθουμένων και ένα φτερό που μεταμορφώνεται σύμφωνα με τις αεροδυναμικές συνθήκες για να μειώσει την αντίσταση του αέρα. Η αυτόματη προσαρμογή των συσκευών σε εξωτερικές συνθήκες θα μπορούσε να είναι σημαντικό πλεονέκτημα για πολλούς διαφορετικούς κλάδους.

### **2.5. Είδη έξυπνων υλικών**

Σήμερα, υπάρχουν διάφοροι τύποι έξυπνων υλικών και νέα προκύπτουν καθημερινά, χάρη στην επένδυση στην E+A+Θ. Μεταξύ αυτών πρέπει να επισημανθούν τα εξής:

#### **2.5.1. Πιεζοηλεκτρικά υλικά**

Μπορούν να μετατρέψουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και το αντίστροφο. Για παράδειγμα, αλλάζουν το σχήμα τους ως απόκριση σε μια ηλεκτρική ώθηση ή παράγουν ηλεκτρικό φορτίο ως απόκριση σε μια εφαρμοσμένη μηχανική καταπόνηση.

#### **2.5.2. Υλικά μνήμης σχήματος**

Έχουν την ικανότητα να αλλάζουν το σχήμα, ακόμη και να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα, όταν εκτίθενται σε πηγή θερμότητας, μεταξύ άλλων ερεθισμάτων.

#### **2.5.3. Χρωμοδραστικά υλικά**

Αλλάζουν χρώμα όταν υπόκεινται σε μια συγκεκριμένη διακύμανση θερμοκρασίας, φωτός, πίεσης κ.λπ. Σήμερα, χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων σε τομείς όπως η οπτική.

#### **2.5.4. Μαγνητορεολογικά υλικά**

Αλλάζουν τις ιδιότητές τους όταν εκτίθενται σε μαγνητικό πεδίο. Για παράδειγμα, σήμερα χρησιμοποιούνται σε αμορτισέρ για την αποφυγή σεισμικών δονήσεων σε γέφυρες ή ουρανοξύστες.

#### **2.5.5. Φωτοενεργά υλικά**

Υπάρχουν διάφοροι τύποι: τα ηλεκτροφωταύγια εκπέμπουν φως όταν τροφοδοτούνται με ηλεκτρικούς παλμούς, τα φθορίζοντα αντανακλούν το φως με μεγαλύτερη ένταση και τα φωσφορίζοντα είναι ικανά να εκπέμπουν φως μετά την παύση της αρχικής πηγής.

### **2.6. Παραδείγματα και εφαρμογές έξυπνων υλικών**

Η επιστήμη των υλικών είναι μια συνεχής παροχή ειδήσεων σχετικά με νέες ανακαλύψεις που θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στο μέλλον μας. Εξετάζουμε μερικά από τα πιο εκπληκτικά υλικά των τελευταίων ετών παρακάτω:

Συνθετικός ιστός αράχνης. Αυτό το υλικό δεν είναι μόνο πέντε φορές ισχυρότερο από το ατσάλι, αλλά έχει επίσης μεγάλη ελαστικότητα. Οι πιθανές χρήσεις του περιλαμβάνουν: αλεξίσφαιρα ρούχα, τεχνητό δέρμα για εγκαύματα ή αδιάβροχες κόλλες.

Σρικ. Το κύριο συστατικό του είναι η χιτίνη, ένας υδατάνθρακας που βρίσκεται στα κελύφη κριλ. Δημιουργήθηκε από ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ και θεωρείται το ιδανικό υποκατάστατο του πλαστικού — αφού ο χρόνος αποσύνθεσής του είναι μόνο δύο εβδομάδες και λειτουργεί επίσης ως διεγερτικό για την ανάπτυξη των φυτών.

Γραφένιο. Οι πιθανές χρήσεις του είναι σχεδόν απεριόριστες: μπαταρίες με μεγαλύτερη αυτονομία, φθηνότερα φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα, ταχύτεροι υπολογιστές, ευέλικτες ηλεκτρονικές συσκευές, πιο ανθεκτικά κτίρια, βιονικά μέλη κ.λπ. Όλα αυτά είναι δυνατά χάρη στις πολλαπλές ιδιότητές τους.

Μεταύλικά. Κατασκευάζονται στο εργαστήριο με ασυνήθιστες φυσικές ιδιότητες που δεν υπάρχουν στη φύση και αποτελούν αντικείμενο έρευνας σε τομείς όπως ο στρατός, η οπτική ή η τηλεφωνία. Μπορούν, για παράδειγμα, να κάμψουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα φωτός δημιουργώντας αρνητικούς δείκτες διάθλασης.

XPL. Είναι ένα πολυμερές με βάση τη σιλίκονη που προσκολλάται στο χόριο σαν δεύτερο δέρμα. Δημιουργήθηκε από επιστήμονες στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT), αναπαράγει την εμφάνιση νεανικού, υγιούς δέρματος αναζωογονώντας την όψη του χρήστη.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα υλικά που έχουν γίνει πρωτοσέλιδα τα τελευταία χρόνια. Αυτά περιλαμβάνουν το στένιο, το οποίο θα μπορούσε να είναι ο υπερσυμπυκνωτής του μέλλοντος. σιλικόνη, την οποία πολλοί συγκρίνουν με το γραφένιο. διοξείδιο του βαναδίου, με την ικανότητα να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπει θερμότητα, που υπόσχεται να φέρει επανάσταση στα ηλεκτρονικά. και θερμοχρωμικό τσιμέντο και αυτοεπισκευαζόμενο σκυρόδεμα, που προορίζονται να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση των κατοικιών και τη διάρκεια ζωής των κτιρίων αντίστοιχα.

Ένας από τους τομείς έρευνας όπου η επιστήμη των υλικών έχει προχωρήσει περισσότερο τα τελευταία χρόνια είναι η ανάπτυξη νέων υλικών για χρήση στην τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία χρησιμοποιείται ήδη σε τομείς τόσο διαφορετικούς όπως ο σχεδιασμός, η ιατρική, η αρχιτεκτονική και τα τρόφιμα. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα θερμοπλαστικά, ειδικά το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), τα οποία χρησιμοποιούνται σε θήκες κινητών τηλεφώνων, παιχνίδια και αμαξώματα αυτοκινήτων. Τα έξυπνα υλικά ξεκινούν επίσης να εκτυπώνονται χάρη στους 4D εκτυπωτές.

## **2.7. Νανοδομές άνθρακα και τα σύνθετα υλικά τους**

### **2.7.1. Γραφίτης**

Ο γραφίτης είναι ένα φυσικό υλικό που εμφανίζεται σε κρυσταλλικές, άμορφες, σβώλους ή φλεβώδεις μορφές. Είναι η πιο σταθερή μορφή άνθρακα στη Γη και, ιδανικά, αποτελείται από ατελείωτα στρώματα υβριδοποιημένων ατόμων άνθρακα  $sp^2$ . Τα επιμέρους στρώματα ονομάζονται «φύλλα γραφενίου» ή «στρώματα γραφενίου», τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μόνο με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, οι οποίες δίνουν στον γραφίτη την απαλότητα, την ευελιξία και τη σχάση του [1,10,11]. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται ως λιπαντικό σε πολλές βιομηχανίες. Χάρη στο αποτοπισμένο νέφος των π-ηλεκτρονίων είναι επίσης ένας εξαιρετικός θερμικός και ηλεκτρικός αγωγός, αλλά μόνο προς την κατεύθυνση των επιπέδων. στην κατεύθυνση κάθετη στα επίπεδα, η αγωγιμότητα είναι χαμηλότερη. Ο γραφίτης αντανακλά πολύ καλά το ορατό φως. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση ενός ιδανικού μαύρου σώματος—το μαύρο του άνθρακα μπορεί να απορροφήσει έως και το 99,5% της ακτινοβολίας. Οι πολυκρυσταλλικές μορφές άνθρακα και το μαύρο τους χρώμα και το ελάχιστο μέγεθος σωματιδίων επιτρέπουν επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις της ακτινοβολίας φωτός μέσα στους πόρους και στα κενά μεταξύ των σωματιδίων, γεγονός που οδηγεί σε σταδιακή απορρόφηση. Η χρήση του γραφίτη είναι εκτεταμένη. Οι ράβδοι γραφίτη χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες [10] και ο γραφίτης χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδια σε ξηρές μπαταρίες, χρησιμεύει ως ενίσχυση σε χάλυβες και έχει εφαρμογές σε αντιδιαβρωτικά στρώματα κ.λπ.



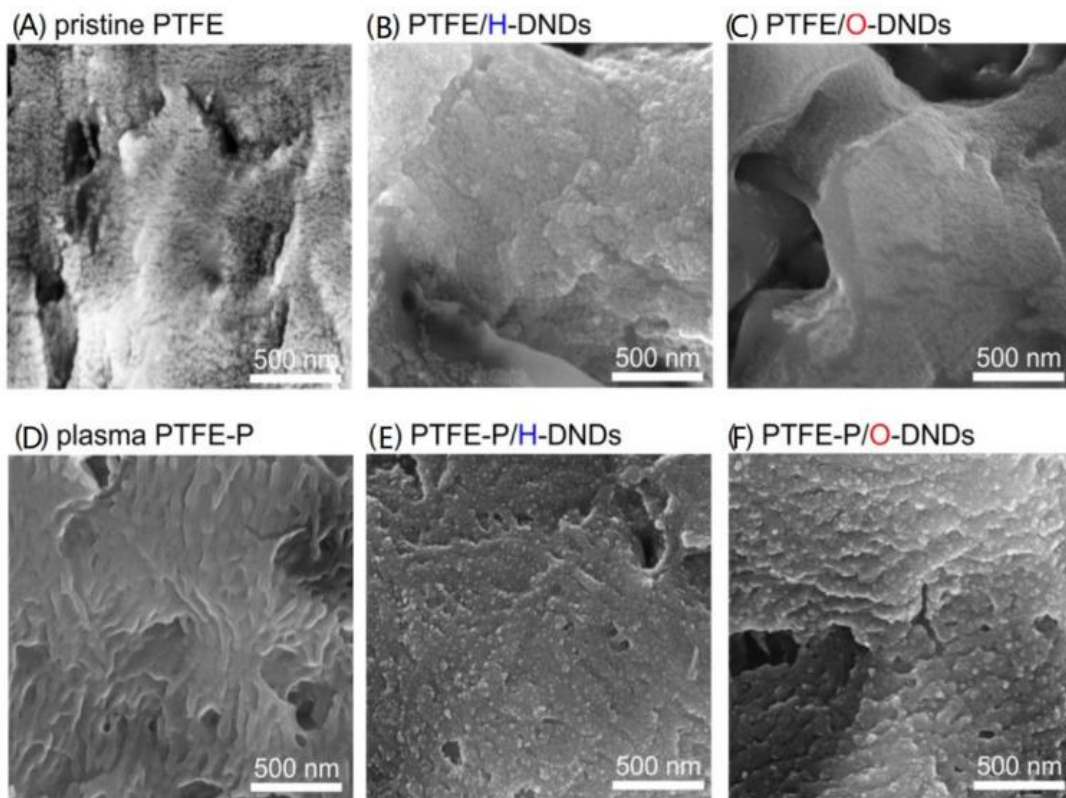
## 2.7.2. Διαμάντι

Ένα διαμάντι είναι ένα αλλότροπο που σχηματίζεται από ένα δίκτυο υβριδοποιημένων ατόμων άνθρακα  $sp^3$  διατεταγμένων σε ένα κυβικό πλέγμα με κέντρο την περιοχή. Κάθε άτομο άνθρακα συνδέεται με τα γύρω τέσσερα άτομα με τη μορφή τετραέδρου. Το διαμάντι υπάρχει σε δύο τροποποιήσεις - τον εξαγωνικό και τον κυβικό τύπο - ενώ ο δεύτερος τύπος είναι πιο άφθονος. Σε σύγκριση με τον γραφίτη, το διαμάντι είναι λιγότερο σταθερό σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση, επομένως η σύνθεσή του από γραφίτη είναι πολύ απαιτητική και απαιτεί ακραίες συνθήκες. Ο λόγος για την πολυπλοκότητα της παραγωγής διαμαντιών γραφίτη είναι το υψηλό φράγμα ενεργοποίησης που χωρίζει τις δύο φάσεις, εμποδίζοντας έτσι τη μετατροπή τους σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου. Ωστόσο, αυτό το φράγμα υψηλής ενέργειας βρίσκεται πίσω από την ύπαρξη του διαμαντιού. Μόλις δημιουργηθεί, το ενεργειακό φράγμα το εμποδίζει να μετατραπεί αυθόρμητα σε πιο θερμοδυναμικά σταθερό γραφίτη. Επομένως, το διαμάντι ονομάζεται μετασταθερό, δηλ. κινητικά σταθερό, αλλά θερμοδυναμικά ασταθές [12]. Είναι η πιο σκληρή γνωστή φυσική ουσία. Οι εξαιρετικές οπτικές του ιδιότητες το καθιστούν ένα από τα πιο περιζήτητα πετράδια. Εκτός από την υψηλή σκληρότητα, το διαμάντι έχει επίσης υψηλή χημική και μηχανική αντίσταση, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και καλές ηλεκτρικές μονωτικές ιδιότητες, επομένως χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή εργαλείων λείανσης, κοπής ή διάτρησης. Ωστόσο, έχει βρει την εφαρμογή του και στην ιατρική, για παράδειγμα, ως μέρος ορθοπεδικών οργάνων όπου, με τη μορφή νανοδομικών επικαλύψεων, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι πιο έντονο όταν το στρώμα τροποποιηθεί περαιτέρω [13], μειώνει την τριβή του προϊόντος, προστατεύει ενάντια στη φθορά, και έτσι παρατείνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. με τη μορφή ενός νανοδιαμαντιού, λόγω του μικρού μεγέθους σωματιδίων, της καθαρότητας και της λειτουργικότητας για τη λειτουργικότητα της επιφάνειάς τους, για στοχευμένη απελευθέρωση φαρμάκου [14]. ή ως μέρος μικρορευστικών συσκευών [15].

Η ελκυστικότητα των λεπτών μεμβρανών διαμαντιών επεκτείνεται σε εξωτικές περιοχές υπεραγωγιμότητας και κβαντικού υπολογισμού μέσω ελεγχόμενου ντόπινγκ λεπτής μεμβράνης. Ως αποτέλεσμα, το διαμάντι είναι ένα από τα πιο περιζήτητα υλικά με πολλές εφαρμογές, από λειαντικά, προστατευτικές επιστρώσεις και βιοϊατρικές εφαρμογές μέχρι υψηλής τεχνολογίας διαμάντια ηλεκτρονικά, φωτονικά και εξοπλισμό απεικόνισης [16,17,18,19].

Λόγω των αξιοσημείωτων ιδιοτήτων του, το νανοδιαμάντι είναι πολύ κατάλληλο για σύνθετα υλικά και έτσι βελτιώνει τις ιδιότητες άλλων υλικών (Εικόνα 2). Σε αυτή την περίπτωση, το νανοδιαμάντι δρα ως πληρωτικό, με τη μήτρα να σχηματίζεται από ένα πολυμερές ή άλλη ανόργανη ένωση. Το νανοδιαμάντι μπορεί να συνδεθεί σε σύνθετα υλικά τόσο με ομοιοπολικούς όσο και με μη ομοιοπολικούς δεσμούς [10]. Τα σύνθετα υλικά που περιέχουν νανοδιαμάντια χρησιμοποιούνται συνήθως ως επιστρώσεις. Οι

ανοξειδωτοι χάλυβες με σύνθετες επικαλύψεις που περιέχουν απατίτη και νανοδιαμάντια (με μέγεθος νανοδιαμαντιών 4–6 nm) έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνουν σημαντικά την πρόσφυση, την ολκιμότητα, τη μεταβολική δραστηριότητα και τη σκληρότητα. Η βιολογική τους δραστηριότητα έχει επίσης αποδειχθεί [20]. Ένα άλλο υλικό που δεν έχει ερευνηθεί και περιγραφεί εκτενώς είναι το σύνθετο άνθρακα-άνθρακα. Μπορεί να είναι, για παράδειγμα, ένα σύνθετο υλικό που ονομάζεται «νανοδομημένο διαμάντι» (NSD) ή «υπερλεπτό νανοδομημένο διαμάντι» (USND), το οποίο αποτελείται από νανοκρυσταλλικούς κόκκους διαμαντιού μεγέθους 5-6 nm, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι σε μια άμορφη μήτρα άνθρακα [21].



Σχήμα 7. Εικόνων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (δευτερεύοντα ηλεκτρόνια). Εικόνες SEM από παρθένο φύλλο PTFE (Α) πριν από τη θεραπεία. (Β) μετά από επεξεργασία υδρογονωμένου νανοδιαμαντιού, και (Γ) μετά από επεξεργασία οξειδωμένου νανοδιαμάντι. Εικόνες SEM του επεξεργασμένου με πλάσμα φύλλου PTFE (Δ) πριν από την μεταχείριση. (Ε) μετά από επεξεργασία υδρογονωμένων νανοδιαμαντιών, και (ΣΤ) μετά από επεξεργασία οξειδωμένου νανοδιαμαντιού. Ανατύπωση με την άδεια από την αρ. [19], 2018, John Wiley and Sons. Το DND αναφέρεται σε νανοδιαμάντια έκρηξης (DNDs).

### 2.7.3. Γραφένιο

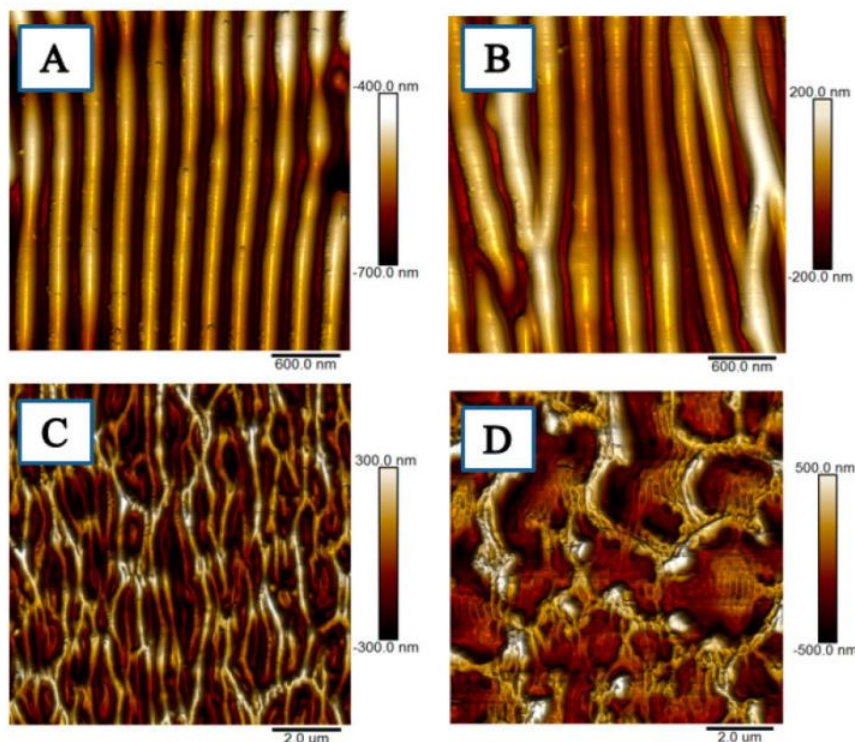
Το γραφένιο είναι ένα μοναδικό διαφανές υλικό με υψηλή ειδική επιφάνεια [22], εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα, κβαντικό φαινόμενο Hall, καλή απορρόφηση (από ορατό έως σχεδόν υπέρυθρο) και οπτική διαφάνεια περίπου 97,7% [23], υψηλή κινητικότητα φορέα και υψηλή Συντελεστής Young [22], κ.λπ.

Αποτελείται από ένα επίπεδο δίκτυο ενός στρώματος ατόμων άνθρακα διατεταγμένα σε σχήμα εξαγώνων που συνδέονται με δεσμούς. Έτσι, η μόνη θεμελιώδης μονάδα γραφενίου είναι ο άνθρακας. Στην ιδανική περίπτωση, είναι μια μονοστιβάδα υβριδοποιημένων ατόμων άνθρακα  $sp^2$  με εξαγωνικό πλέγμα (ένα στρώμα γραφίτη). Κάθε άτομο άνθρακα έχει τρεις δεσμούς  $\sigma$  και έναν δεσμό  $p$  έξω από το επίπεδο που μπορεί να συνδεθεί με γειτονικά άτομα [24,25]. Αυτή η ατομική δομή, σε συνδυασμό με την κατανομή ηλεκτρονίων του γραφενίου, οδηγεί σε υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, μοναδική οπτική συμπεριφορά, εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, εξαιρετική χημική σταθερότητα και μεγάλη επιφάνεια [25,26]. Το γραφένιο μπορεί όχι μόνο να υπάρχει σε μια επίπεδη δισδιάστατη (2D) μορφή, αλλά, ανάλογα με τις φυσικές διαστάσεις, μπορούν να οριστούν διαφορετικοί τύποι κυματισμού, όπως κυματισμοί, ρυτίδες, πτυχώσεις ή πτυχώσεις γραφενίου [27]. Το γραφένιο μπορεί να μετατραπεί σε υλικά γραφενίου με χημικές και φυσικές τροποποιήσεις, όπως το μονοστρωματικό και πολυστρωματικό γραφένιο, το οξείδιο του γραφενίου και το ανηγμένο οξείδιο του γραφενίου, καθένα από τα οποία έχει μοναδικές ιδιότητες. Με κύλιση γραφενίου, μπορούν να ληφθούν νανοσωλήνες άνθρακα ή νανοκέρατα [25,28]. Όλες αυτές οι ιδιότητες επιτρέπουν επαρκώς αποδοτικό γραφένιο για καθολικές εφαρμογές σε ηλεκτροχημικές συσκευές [29] και σε άλλες εφαρμογές [30].

Το γραφένιο χρησιμοποιείται ευρέως στη βιοϊατρική ως βάση για την κυτταρική ανάπτυξη, κυρίως λόγω της βιοσυμβατότητας, των χημικών αλληλεπιδράσεων, της ευελιξίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του. Λόγω της δυνατότητας τροποποίησης και λειτουργικότητας της δομής του, χρησιμεύει στη μηχανική ιστών ως βιοδραστικό ικρίωμα, το οποίο μπορεί να δεσμεύσει τις απαραίτητες πρωτεΐνες ή φάρμακα [2]. Η εξαιρετική μηχανική αντοχή και ακαμψία των υλικών γραφενίου είναι κατάλληλα για τη μηχανική οστικού ιστού. Η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών γραφενίου είναι, με τη σειρά της, κατάλληλη για μηχανική νευρικών ιστών [31,32,33]. Λόγω της δυνατότητας τροποποίησης και λειτουργικότητας της δομής του, χρησιμεύει στη μηχανική ιστών ως βιοδραστικό ικρίωμα και μπορεί να δεσμεύσει τις απαραίτητες πρωτεΐνες ή φάρμακα [2,34,35,36]. Εξαιρετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες χαρακτηρίζουν επίσης το γραφένιο. Μια επιπλοκή της εργασίας με το γραφένιο είναι η κακή διασπορά του σε διαλύτες και συσσωμάτωση [37].

Το γραφένιο χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε συνδυασμό με ίνες άνθρακα και πολυμερή υλικά. Ένας τύπος τέτοιου σύνθετου υλικού είναι τα υλικά με στρώματα, όπου ένα σύνθετο γραφένιο-εποξειδικό χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός προεμποτίσματος που έχει τη μορφή ανθρακονήματος. Αυτό το prepreg χρησιμοποιείται στη συνέχεια για παρεμβολή σε ένα σύνθετο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα [38]. Σε αυτή την περίπτωση, η πλάκα γραφενίου έχει τη λειτουργία ενός πληρωτικού σκλήρυνσης. Ο συνδυασμός φύλλων γραφενίου και εποξειδίων οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής σε θραύση και/ή της διάρκειας κόπωσης των παρεμβολών γραφενίου/εποξειδικού υλικού για σκλήρυνση αποκόλλησης και παρακολούθηση της ζημιάς σε ρωγμές σε ελάσματα από ανθρακονήματα/εποξειδικά σύνθετα φύλλα [39]. Το γραφένιο με τη μορφή νανοπλακών ενσωματωμένων σε πολυμερές τύπου PLLA προκαλεί μείωση της

ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού σε δείγματα με 20 wt% νανοσφαιρίδια γραφενίου. σε όγκο, η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης μειώνεται στα 150 Ω. Σε αυτή τη μελέτη, έχει αποδειχθεί η θετική επίδραση των νανοσφαιριδίων σε πολυμερές υλικό στην προσκόλληση και τον πολλαπλασιασμό των κυττάρων [40].



**Σχήμα 8.** Σαρώσεις AFM από παρθένο πολυστυρένιο τροποποιημένο με 6000 παλμούς και τιμές ροής λέιζερ: (A) 8, (B) 10, (C) 12 και (D) 16 mJ·cm<sup>-2</sup>

Σύνθετες μεμβράνες μπορούν επίσης να παρασκευαστούν με συνδυασμό γραφενίου με άλλα λειτουργικά νανοϋλικά (πολύτιμα μέταλλα, ενώσεις μετάλλων κ.λπ.). Στη συνέχεια παρουσιάζουν μοναδικές οπτικές, μηχανικές, ηλεκτρικές, χημικές, αισθητήριες και καταλυτικές ιδιότητες [41]. Ο συνδυασμός γραφενίου και, π.χ., ZnO, αυξάνει τη φωτοδραστικότητα ενός τέτοιου σύνθετου υλικού [42]. Τα σύνθετα υλικά γραφενίου με πολυμερή μπορούν επίσης να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία με στόχο τη δημιουργία περιοδικών ή άλλων κανονικών δομών [43]. το παρθένο πολυμερές μπορεί επίσης να ενεργοποιηθεί με λέιζερ excimer [44,45,46,47] για επακόλουθη εναπόθεση άνθρακα.

Το γραφένιο (αλλά μόνο στη διαφανή του μορφή) μελετάται πολύ συχνά για την πιθανή χρήση του σε φωτοβολταϊκά, οπτοηλεκτρονικά και συσκευές φωτοαποδόμησης και φωτοανίχνευσης κ.λπ., ειδικά σε συνδυασμό με πολυμερή όπως εποξικά, πολυστυρόλιο, πολυανιλίνη, πολυουρεθάνη, πολυανθρακικό και PET . Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος αξιόπιστων υπερέκταμων ηλιακών κυψελών περοβσκήτη ή ως άνοδοι σε ηλιακές κυψέλες. Το γραφένιο χρησιμοποιείται επίσης ως αποτελεσματικό αγωγικό πληρωτικό για την παραγωγή σύνθετων δομών για θωράκιση EMI [48,49]—και πάλι, σε συνδυασμό με πολυμερή υλικά.

Η χρήση γραφενίου και υλικών με βάση το γραφένιο σε σύνθετες εφαρμογές περιορίζεται κυρίως λόγω της κακής διαλυτότητας και διασποράς στα υγρά. Ωστόσο, η εξαιρετική διεπιφανειακή πρόσφυση είναι επίσης μια κρίσιμη παράμετρος για τα σύνθετα υλικά [50]. Η απλούστερη μέθοδος διασποράς είναι η ανάμιξη ή η διάτμηση ενός κολλοειδούς εναιωρήματος γραφενίου με ένα επιλεγμένο πολυμερές [51]. Συχνά χρησιμοποιείται κατεργασία με υπερήχους χωρίς/με τασιενεργά. Δυστυχώς, αυτή είναι μια μη ικανοποιητική μέθοδος για πολλές εφαρμογές, επειδή η παρουσία ενός τασιενεργού μπορεί να επηρεάσει τη διαφάνεια, τις θερμικές ιδιότητες και τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού [50,51,52]. Τα υπεροξεία έχουν αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλος διαλύτης για το γραφένιο, στο οποίο η συγκέντρωση γραφενίου μπορεί να είναι έως και 2 mg/mL. Και πάλι, πρέπει να δοθεί έμφαση στις πιθανές εφαρμογές, καθώς τα υπεροξεία είναι συνήθως ασύμβατα με τις περισσότερες σύνθετες εφαρμογές. Η οξείδωση του γραφίτη για να σχηματίσει οξείδιο του γραφενίου είναι επίσης μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για τη διασπορά του γραφενίου στην υγρή φάση [52]. Η τεχνική *in situ* πολυμερισμού (που περιλαμβάνει ανάμιξη του πληρωτικού σε καθαρό μονομερές/πολλαπλά μονομερή ή σε διάλυμα μονομερούς που ακολουθείται από πολυμερισμό παρουσία διασκορπισμένου πληρωτικού) έχει αποδειχθεί πολύ κατάλληλη μέθοδος για τον σχηματισμό σύνθετων υλικών με καλά διασπαρμένο γραφένιο [51]. Ο επί τόπου πολυμερισμός, στον οποίο το γραφένιο "επικαλύπτεται" με επίστρωση πολυμερούς, χρησιμοποιείται επίσης για την πρόληψη της συσσωμάτωσης λόγω των δυνάμεων Van der Waals. Συνδυάζει γαλάκτωμα και μικκυλιακό πολυμερισμό επειδή το γραφένιο βρίσκεται μέσα στο μικκύλιο και εφαρμόζεται μια λεπτή επίστρωση πολυμερούς στην επιφάνεια του γραφενίου. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί επιτυχημένη στο σχηματισμό ενισχυμένων πολυμερών σύνθετων υλικών, όπου η πολυβινυλοπυρρολιδόνη έχει χρησιμοποιηθεί για επικάλυψη. Τέτοια υλικά μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μηχανικά ισχυρών και ηλεκτρικά αγωγικών σύνθετων υλικών γραφενίου/PVP [50,52]. Η παρασκευή του γραφενίου από οξείδιο του γραφενίου (GO) πραγματοποιείται με αναγωγή, οδηγώντας σε πολλά ελαττώματα. Το γραφένιο που παρασκευάζεται με αυτόν τον τρόπο αναφέρεται ως χημικά τροποποιημένο (ανηγμένο) γραφένιο (rGO). Τόσο το GO όσο και το rGO ξεκινούν από το ίδιο υλικό, αλλά τα χαρακτηριστικά δομής και επιφάνειας μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο αποκολλάται και μειώνεται το GO. Η οξείδωση του γραφίτη και η θερμική ή χημική αναγωγή οδηγεί σε μη αναστρέψιμη παραμόρφωση των γραφιτικών ανθράκων, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τις μικρομηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες μεταφοράς. Το GO είναι ένας ηλεκτρικός μονωτήρας, επομένως είναι απαραίτητο να μειωθεί για να αποκατασταθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα και άλλες ιδιότητες που ανήκουν στο γραφένιο. Τα επιφανειοδραστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή την περίπτωση για την αποφυγή συσσωμάτωσης [2,53,54].

Η δομή του γραφενίου είναι το σημείο εκκίνησης για το σχηματισμό άλλων αλλοτροπικών τροποποιήσεων άνθρακα, όπως τα φουλλερένια και οι νανοσωλήνες άνθρακα [55].

#### 2.7.4. Κβαντικές κουκκίδες άνθρακα και γραφενίου

Οι κβαντικές κουκκίδες άνθρακα (CQD) είναι ένα από τα πιο πρόσφατα φθορίζοντα νανοϋλικά που ανακαλύφθηκαν. Συνήθως περιέχουν άμορφους ή νανοκρυσταλλικούς πυρήνες με υβριδισμένο άνθρακα κυρίως  $sp^2$ . Τα CQD είναι αντικείμενα νανοδιάστατων. Το συνηθισμένο μέγεθος αυτών των αντικειμένων είναι κάτω από 20 nm και τις περισσότερες φορές είναι ημιαγωγοί στους οποίους συμβαίνει η λεγόμενη κβαντική παγίδευση ενός σωματιδίου. Οι επιφανειακές δομές των CQD ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με τις μεθόδους παρασκευής και τους πρόδρομους που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση και μπορεί να περιέχουν οξυγόνο/άζωτο, λειτουργικές ομάδες. Εάν οι διαστάσεις του υλικού είναι μεγάλες σε σύγκριση με το μήκος κύματος των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό, τότε αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν ως ελεύθερα σωματίδια. Ωστόσο, όταν το μέγεθος του υλικού μειωθεί και οι διαστάσεις του είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου, τότε οι οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού θα διαφέρουν από αυτές του μεγάλου όγκου υλικού. Με τις φθίνουσες διαστάσεις του υλικού και όταν φτάσουμε σε ένα συγκεκριμένο βέλτιστο όριο, που ονομάζεται ακτίνα Bohr του εξιτονίου, το ενεργειακό του φάσμα θα γίνει διακριτό και το πλάτος του διάκενου ζώνης θα εξαρτάται από τις διαστάσεις του. Η πιο σημαντική συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι ο περιορισμός του ηλεκτρονίου σε μικρότερο χώρο από το μήκος κύματος του ηλεκτρονίου de Broglie. Λόγω του κβαντικού περιορισμού, η δομή της ταινίας του υλικού αλλάζει, όπως και το πάχος των επιπέδων ενέργειας. Εάν το υλικό είναι ημιαγωγός, τότε οι αλλαγές στην πυκνότητα των επιπέδων ενέργειας στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους θα επηρεάσουν την πυκνότητα κατάληψης, τις μεταβάσεις μεταξύ των ζωνών και την κινητικότητα των φορέων φορτίου. Το μέγεθος της απαγορευμένης ζώνης EG θα είναι μεγαλύτερο από τον «χύμα» EGB υλικού μεγαλύτερου μεγέθους και οι οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες θα αλλάξουν επίσης [56].

Οι κβαντικές κουκκίδες γραφενίου (GQDs) έχουν συνήθως διάμετρο κάτω από 20 nm. Σε σύγκριση με τα συνήθως χρησιμοποιούμενα ανόργανα QDs. Οι δυνατότητες προετοιμασίας των GQD μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: τις λεγόμενες μεθόδους από πάνω προς τα κάτω και από κάτω προς τα πάνω. Οι μέθοδοι από πάνω προς τα κάτω περιλαμβάνουν την αποσύνθεση και την απολέπιση φθινού και άμεσα διαθέσιμου υλικού, συνηθέστερα γραφίτη, υπό «σκληρές» συνθήκες. Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν συχνά λειτουργίες πολλαπλών σταδίων, οι περισσότερες χρησιμοποιούν οξέα, ισχυρούς οξειδωτικούς παράγοντες και υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, το μειονέκτημά τους είναι ο μικρός έλεγχος της μορφολογίας και της κατανομής μεγέθους των σχηματισμένων σωματιδίων. Οι μέθοδοι από κάτω προς τα πάνω περιλαμβάνουν τη σύνθεση QD από πολυκυκλικές αρωματικές ενώσεις, όπως τα φουλερένια. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει σε κάποιον να ελέγξει τις τελικές ιδιότητες του προϊόντος που προκύπτει [37].

Λόγω των ιδιοτήτων τους, τα GQDs έχουν βρει χρήση και στην ιατρική, για παράδειγμα, ως εργαλείο για τη λεγόμενη φωτοδυναμική θεραπεία στη θεραπεία του καρκίνου, η οποία έχει πρόσφατα αντικαταστήσει τις κοινώς χρησιμοποιούμενες μεθόδους όπως η χειρουργική επέμβαση, η χημειοθεραπεία και η ακτινοθεραπεία, κυρίως λόγω ελάχιστες παρενέργειες και αμελητέα φαρμακευτική αντοχή και χαμηλή συστηματική τοξικότητα. Τα GQD και τα λειτουργικά GQD έχουν υψηλή δυνατότητα χρήσης στις βιοτεχνολογίες λόγω των οπτικών ιδιοτήτων τους, αλλά κυρίως λόγω της χαμηλής κυτταροτοξικότητάς τους [57,58,59,60].

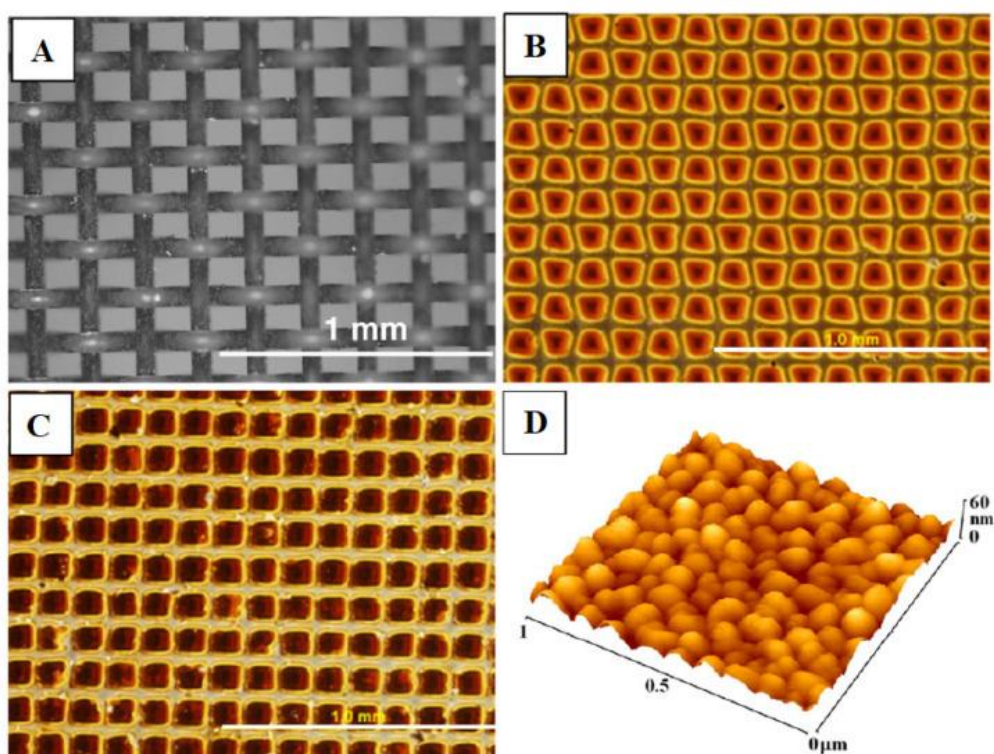
Οι κβαντικές κουκίδες γραφενίου είναι φθορίζουσες ουσίες που διατηρούν τις δομικές και φυσικές ιδιότητες του οξειδίου του γραφενίου. Η σύνδεσή τους με τις υδρογέλες οδηγεί σε διεύρυνση των δυνατοτήτων των πιθανών εφαρμογών τους στην ιατρική. Εάν τα GQD χρησιμοποιούνται με τη μορφή νανοσωματιδίων που τοποθετούνται σε υδρογέλη καρβοξυμεθυλοκυτταρίνης, οι δοκιμασμένες ιδιότητες θα βελτιωθούν. Τέτοιες τροποποιημένες υδρογέλες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως μακράς διάρκειας και εξαιρετικά αποτελεσματικός αντικαρκινικός παράγοντας [61,62].

#### 2.7.5. Φουλερένια

Τα φουλερένια, που μερικές φορές ονομάζονται Buckminsterfullerenes, αντιπροσωπεύουν μια αλλοτροπική δομή άνθρακα που αποτελείται από έναν ζυγό αριθμό  $sp^2$  υβριδοποιημένων ατόμων άνθρακα. Αυτά συνδέονται σε 12 πενταγωνικούς και  $m$  εξαγωνικούς δακτυλίους όπου  $m = (n - 20)/2$ , όπου το  $n$  αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό ατόμων άνθρακα στο μόριο. Το  $C_{60}$  (12 πεντάγωνα και 20 εξάγωνα) είναι επομένως το μικρότερο φουλερένιο που ικανοποιεί αυτόν τον λεγόμενο κανόνα πενταγώνου, ο οποίος δηλώνει ότι τα πιο σταθερά είναι εκείνα τα φουλερένια όπου τα πεντάγωνα δεν μοιράζονται καμία ακμή [63]. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες που δείχνουν ότι η σταθερότητα των φουλλερενίων αυξάνεται με το μέγεθός τους [64,65]. Λόγω της καμπυλότητας της δομής, τα φουλλερένια υφίστανται τη λεγόμενη πυραμιδοποίηση, δηλαδή μια αλλαγή στον υβριδισμό από καθαρό  $sp^2$  σε ένα ενδιάμεσο μεταξύ  $sp^2$  και  $sp^3$  υβριδισμού. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τις προκύπτουσες ιδιότητες των φουλλερενίων, προκαλώντας, για παράδειγμα, υψηλή συγγένεια ηλεκτρονίων ή αύξηση της χημικής αντιδραστικότητας, και έτσι τα φουλλερένια υπόκεινται περισσότερο σε αντιδράσεις προσθέτων. Χάρη σε αυτές τις συγκεκριμένες ιδιότητες, τα φουλερένια έχουν βρει εφαρμογή στη χημική και ιατρική βιομηχανία. Χρησιμοποιούνται ως συστήματα για στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων (σύστημα παράδοσης φαρμάκων), νανοαισθητήρες, αντιοξειδωτικά ή ως δομικά υλικά για ηλιακούς συλλέκτες [66]. Λόγω της υψηλής αντιδραστικότητάς τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες. Η χημική λειτουργικοποίησή τους (συνδυασμός με άλλες ενώσεις) επιτρέπει τη δημιουργία διαφόρων συνδυασμών μοναδικών ιδιοτήτων [1] και επίσης επιτρέπει σημαντική αύξηση της διαλυτότητας των φουλλερενίων σε πολλούς διαλύτες, επειδή τα «καθαρά»



φουλερένια είναι ελάχιστα ή όχι αδιάλυτα. Πολλές άλλες πιθανές εφαρμογές των φουλερενίων είναι υπεραγωγοί, λιπαντικά, φωτοβολταϊκά, αισθητήρες, τεχνολογία απεικόνισης (χρησιμοποιώντας φωτοφωταύγεια φουλερενίων) κ.λπ. [67,68,69]. Τα φουλερένια έχουν πολλές μοναδικές ιδιότητες, π.χ. την ικανότητα να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και να δεσμεύουν μικρότερες ουσίες όπως το ήλιο [67], και παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα βιολογικής δραστηριότητας. Για παράδειγμα, τα φουλλερένια μπορούν να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια και να μετατρέψουν το μοριακό οξυγόνο σε μονό-ατομικό οξυγόνο όταν ακτινοβοληθεί με υπεριώδη ακτινοβολία. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στις κυτταρικές μεμβράνες και να διασπάσουν το DNA, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη φωτοδυναμική θεραπεία για τη θεραπεία όγκων ή κατά των ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων [70,71].



Σχήμα 9. Μεταλλικό πλέγμα μορφολογίας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία στρωμάτων C60 με μικρομοτίβα (A) και μορφολογίας λεπτών (B,Δ) και παχιών (Γ) στρώσεων C60 με μικρομοτίβα (D: σε εξόγκωμα). Μικροσκόπιο Olympus IX 50 εξοπλισμένο με ψηφιακή κάμερα DP 70 και μικροσκόπιο ατομικής δύναμης Digital Instruments CP II Veeco.

Σε μια άλλη μελέτη [7,67] βρέθηκε ότι τα φουλλερένια, όταν διατάσσονται σε λεπτές στρώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως νανοδομημένο υλικό και να επηρεάσουν θετικά την πρόσφυση, την εξάπλωση, την ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα των οστικών κυττάρων, ειδικά των ανθρώπινων οστεοβλαστών. -όπως κύτταρα MG 63.

Ως εκ τούτου, τα φουλερένια θεωρούνται συχνά εργαλείο και βάση για τη δημιουργία πολλά υποσχόμενων υλικών με νέες ιδιότητες. Τα φουλερένια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικοί παράγοντες για σύνθετα μήτρα ελαφρών μετάλλων. Αυτά τα υλικά έχουν τότε εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή χημική σταθερότητα [72,73,74]. Τα υλικά μέταλλου-φουλλερενίου βελτιώνουν ένα ευρύ φάσμα φυσικών

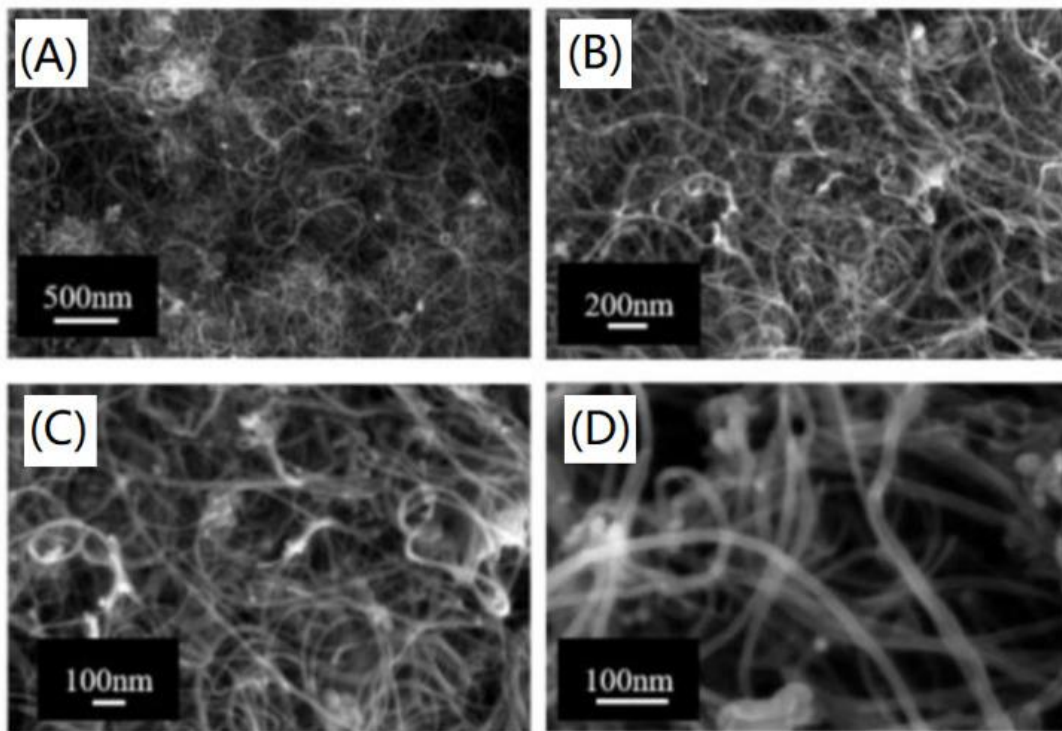


και φυσικοχημικών ιδιοτήτων. Η προσθήκη φουλερενίων στα υλικά, ακόμη και σε μικρές ποσότητες (έως 1,0% κατά βάρος), αλλάζει σημαντικά τις ιδιότητες του αρχικού υλικού [75]. Αυτά τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την παραγωγή ενεργών στοιχείων για αισθητήρες, στον τομέα της νανο- και μικρομηχανικής ή για επικαλύψεις, και όχι μόνο στον τομέα των βιοϊατρικών εφαρμογών [76].

Ένα άλλο ενδιαφέρον υλικό με πιθανές υποσχόμενες ιδιότητες εκπομπών πεδίου δημιουργείται από έναν συνδυασμό φουλερενίων και νανοσωλήνων μονού τοιχώματος. Είναι ένα υβριδικό υλικό που δημιουργείται κατά τη διάρκεια μιας συνεχούς διαδικασίας. Σε αυτή τη σύνθεση, τα φουλλερένια [77] συνδέονται ομοιοπολικά στην εξωτερική επιφάνεια ενός νανοσωλήνα μονού τοιχώματος.

### **2.7.6. Νανοσωλήνες άνθρακα και νανοϊνες**

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν μια απλή ατομική διαμόρφωση: φύλλα γραφενίου τυλιγμένα σε κυλινδρικά σχήματα. Ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων γραφενίου, χωρίζονται σε νανοσωλήνες ενός τοιχώματος (SWCNTs) και σε νανοσωλήνες πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs) (Εικόνα 5) [78]. Ενώ τα SWCNT περιέχουν μόνο ένα στρώμα γραφενίου, τα MWCNT αποτελούνται από ένθετους κυλίνδρους με απόσταση στρωμάτων 3,4 Å και διάμετρο της τάξης των 10–20 nm. Οι CNT διαφέρουν περαιτέρω ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο το φύλλο γραφενίου τυλίγεται σε νανοσωλήνες «ζιγκ-ζαγκ», «καρέκλα» ή «χειρόμορφους» [79,80,81]. Η βέλτιστη διαδικασία για την ενίσχυση της επιφάνειας, που συνδέεται με τη διαβρεξιμότητα και τις αλλαγές στη χημεία της επιφάνειας, είναι η έκθεση στο πλάσμα της επιφάνειας του πολυμερούς [82,83,84,85], η οποία μπορεί περαιτέρω να χρησιμοποιηθεί για επακόλουθη εναπόθεση ή εμβολιασμό νανοσωματιδίων.



Σχήμα 10. Εικόνες FESEM MWCNT σε διαφορετικά μεγέθη: (A) 70 kX, (B) 130 kX, (Γ) 250 kX, (Δ) 500 kX.

Οι νανοϊνες άνθρακα (CNF) σχηματίζονται όταν τα φύλλα γραφενίου καμπυλώνονται υπό μια ορισμένη γωνία ( $\alpha$ ) και έτσι δημιουργούνται μια στοίβα από νανοκώνους. Το CNF διαφέρει από τους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) κατά μια γωνία,  $\alpha$ , η οποία είναι ίση με μηδέν για τους CNTs. Το μέγεθος του CNF μπορεί να είναι από 3,5 nm έως αρκετές εκατοντάδες νανόμετρα σε διάμετρο, με μήκος έως και αρκετά μικρόμετρα [86]. Η μικρή διάμετρος επηρεάζει σημαντικά τον αριθμό των δομικών ελαττωμάτων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες και τις ειδικές ιδιότητες της επιφάνειας. Οι ίνες άνθρακα μπορούν να έχουν διαφορετικές δομές: κοίλους και γεμάτους πυρήνες, στοιβαγμένους νανοκώνους, χωρισμένοι, στοιβαγμένοι νανοκώνοι, και χωρισμένους νανοσωλήνες [81]. Οι νανοϊνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη θεραπεία και την τόνωση του οστικού συστήματος και την κατασκευή νανοσύνθετων ή ινωδών υποστρωμάτων *in situ* μηχανικής ιστών. Η βιοσυμβατότητά τους έχει επιβεβαιωθεί σε πολλές μελέτες [87,88,89]. Τα CNT και τα CNF μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή βιοαισθητήρα [90] ή μηχανική νευρικού ιστού [91]. Οι ίνες άνθρακα είναι πολύ ελαφριά υλικά με χαμηλή πυκνότητα 1,6–2,2 g·cm<sup>3</sup> [92,93] και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, γεγονός που τα προορίζει για χρήση σε σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης, ειδικά στην αεροδιαστημική βιομηχανία [93,94,95].

Οι ίνες μονής και πολλαπλών στρωμάτων και οι σωλήνες με ένα και πολλαπλών τοιχωμάτων έχουν πολλές μοναδικές ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για χρήση σε σύνθετα υλικά. Ωστόσο, όπως και σε άλλα υλικά άνθρακα, η πρωταρχική πρόθεση είναι να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των

αρχικών, κυρίως πολυμερών, κεραμικών και, σε μικρότερο βαθμό, άλλων ανόργανων υλικών (μέταλλα όπως το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Και οι δύο τύποι υλικών άνθρακα (ίνες και σωλήνες) έχουν πολύ χαμηλή πυκνότητα στην περίπτωση των ινών. Η διάμετρός τους είναι σημαντικά μικρότερη από το μήκος τους. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς υποψήφιους για σύνθετα γεμίσματα με τη μορφή ενισχύσεων [10,96]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στο σχηματισμό αυτών των τύπων σύνθετων υλικών είναι η ομοιογενής κατανομή των νανοσωματιδίων άνθρακα στη μήτρα. Αυτό μπορεί περαιτέρω να οδηγήσει στη συσσωμάτωση νανοσωματιδίων και στο σχηματισμό θέσεων με διαφορετικές συγκεντρώσεις πληρωτικού, προκαλώντας μια ανομοιογενή κατανομή των ιδιοτήτων. Μια σημαντική παράμετρος είναι επίσης η διάταξη των ινών άνθρακα ή των σωλήνων στη μήτρα. Η κατεύθυνση της διάταξης των ινών και των σωλήνων μπορεί να επηρεάσει, για παράδειγμα, τη φέρουσα ικανότητα του σύνθετου πολυμερούς [10].

Όταν οι σωλήνες άνθρακα συνδυάζονται με κατάλληλα πολυμερή - όπως το πολυ (π-φαινυλενο βινυλένιο) ή τα παράγωγά του, τα παρασκευασμένα σύνθετα έχουν ιδιότητες ηλεκτροφωταύγειας και χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές συσκευές και διόδους εκπομπής φωτός. Σε συνδυασμό με άλλες πολυμερείς ουσίες, οι ηλεκτρικές ιδιότητες βελτιώνονται σημαντικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι νανοσωλήνες χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με φθηνά πολυμερή και χρησίμευσαν ως αντικατάσταση των ακόμα συχνά χρησιμοποιούμενων μαύρων του άνθρακα. Είχαν το πλεονέκτημα έναντι της αιθάλης στο ότι το ηλεκτροστατικό φορτίο μειώθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν νανοσωλήνες. Σε μια άλλη μελέτη, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη 1% κατά βάρος νανοσωλήνων άνθρακα σε μια μήτρα πολυστερενίου αυξάνει την ελαστική ακαμψία κατά περίπου 36-42% και αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό κατά 25% [10]. Η χρήση ινών άνθρακα σε συνδυασμό με φαινολικά προεμποτίσματα που περιέχουν νανοσωματίδια είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή πυρίμαχου υλικού [97].

Ωστόσο, οι νανοϊνες και οι νανοσωλήνες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλα υλικά [98]. Για παράδειγμα, όταν συνδυάζονται σωστά με κεραμικά υλικά, θα μπορούσαν να δημιουργηθούν σύνθετα υλικά με εξαιρετική σταθερότητα και αντοχή στη θερμοκρασία, εξαιρετική σκληρότητα και αντοχή σε ερπυσμό. Στην περίπτωση συνδυασμού με μεταλλικά υλικά, έχει αποδειχθεί βελτίωση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου. Αυτή η αύξηση οφείλεται στην αύξηση της περιεκτικότητας σε νανοσωλήνες σε σύνθετα υλικά [97]. Οι ίνες άνθρακα στη μήτρα από αλουμίνιο ή μαγνήσιο χρησιμοποιούνται σήμερα σε ορισμένες περιοχές [99,100], όπου είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί χαμηλή πυκνότητα και υψηλή αντοχή του υλικού, όπως στην αεροδιαστημική βιομηχανία [101]. Τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα και σωλήνες που χρησιμοποιούνται σήμερα μπορούν να βρεθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αποτελούν μέρος, π.χ., ρόπαλα του μπέιζμπολ, μπαστούνια του γκολφ, ανταλλακτικά αυτοκινήτων (όχι μόνο σωλήνες καυσίμου) ή χάλυβας δαμασκηνού [102].

Όπως και στο γραφένιο, η πιθανή χρήση των CNTs είναι περιορισμένη λόγω της δύσκολης διασποράς και της κακής αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειών, ειδικά με τη μήτρα του πολυμερούς. Στην περίπτωση των CNTs, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη επειδή οι CNTs χαρακτηρίζονται από μικρή διάμετρο σε κλίμακα νανομέτρων με υψηλό λόγο διαστάσεων (>1000) και επομένως εκτεταμένη περιοχή [103]. Οι CNTs παραδίδονται στο εμπόριο ως ισχυρά μπερδεμένες δέσμες, επομένως η προσαρμογή του "cut and unwind or unwind" πριν από την ίδια τη διασπορά είναι απαραίτητη για την ενεργοποίηση της θεραπείας [104]. Η κατεργασία με υπερήχους χρησιμοποιείται ως η πιο κοινή μέθοδος. Ο υπέρηχος είναι κατάλληλος για τη διασπορά [105] των CNTs σε υγρά χαμηλής πυκνότητας. Οι CNT μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν επιφανειοδραστικά (διασκορπιστικά), τα οποία συνήθως προστίθενται στο τήγμα του πολυμερούς [103,106]. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί άλεση με σφαίρα παρουσία διαφόρων χημικών ουσιών, γεγονός που οδηγεί έτσι στην εισαγωγή λειτουργικών ομάδων στην επιφάνεια CNT. Στην περίπτωση των CNT, η λειτουργικότητα της επιφάνειας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μέσω ατόμων άνθρακα που βρίσκονται τόσο στα άκρα των σωλήνων όσο και στα τοιχώματα [105]. Τα ελαττώματα στα οποία μετασχηματίζονται θέσεις ελαττωμάτων μπορούν επίσης να λειτουργήσουν [103,104,107]. Ενώ το -COOH και το -OH είναι εξαιρετικά πολικά, οι αμιδικές ομάδες (-CO-NH-) και οι μη-πολαροκταδεκυλομάδες (-C<sub>18</sub>H<sub>37</sub>) καθιστούν το CNT-ODA εξαιρετικά σταθερό σε μεικτούς πολικούς-μη πολικούς (βουτανόλη-ξυλόλιο) διαλύτες. Η παρουσία αυτών των ομάδων αύξησε την αντοχή σε εφελκυσμό των λειτουργικών CNTs κατά 4-7% (ανάλογα με τον τύπο της ομάδας [107]). Η λειτουργικότητα μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με ενεργοποίηση, π.χ. ομάδες καρβοξυλίου και ομάδες υδροξυλίου μπορούν να σχηματιστούν στην επιφάνεια κατά τη διαδικασία οξείδωσης από οξυγόνο, αέρα, πυκνό θειικό οξύ, νιτρικό οξύ και 30% υδατικό υπεροξείδιο του υδρογόνου, και πυκνό θειικό οξύ και το μείγμα του [104]. Οι ενεργές ομάδες αλδεΐδης (-CHO) και αμινο (-NH<sub>2</sub>) μπορούν να εισαχθούν σε την επιφάνεια με τροποποίηση πλάσματος παρουσία ενός ζεύγους ακεταλδεΐδης και αιθυλενοδιαμίνης [104] Όταν συνδυάζονται CNT και πολυμερείς ρητίνες, η χημική λειτουργικότητα των CNT εμποδίζει τους CNT να αλληλεπιδράσουν με τους παρακείμενους CNTs στη ρητίνη λόγω της διασταυρούμενης ομοιοπολικού δεσμοί μεταξύ των CNT και του περιβάλλοντος πολυμερούς, γεγονός που θα οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα της διασποράς CNT στη ρητίνη [108].

Τα ινώδη σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων, της αντοχής σε κρούση, της υψηλής αντοχής και ευελιξίας στις σχεδιαστικές δυνατότητες και του χαμηλού βάρους τους. Το πρόβλημα με τα σύνθετα υλικά που κυριαρχούν στις ίνες είναι η αποκόλληση (ρωγμές μεταξύ των στρωμάτων), περιορίζοντας τη διάρκεια ζωής του υλικού. Μία λύση είναι η ενσωμάτωση ορισμένων σκληρυντικών παραγόντων ή θερμοπλαστικών συνδετικών μέσα στις εύθραυστες ρητίνες μήτρας. Μια άλλη πιθανή λύση είναι η λειτουργικότητα της επιφάνειας των CNTs. Η λειτουργικότητα νανοσωλήνων άνθρακα διπλού τοιχώματος με αμινομάδες αύξησε την τιμή σκληρότητας σε θραύση κατά 42%. Στην περίπτωση των υλικών από ίνες γυαλιού/εποξειδικά ινώδη υλικά, η αντοχή μπορεί να βελτιωθεί (κατά 16%)

προσθέτοντας απλώς μια μικρή ποσότητα (0,3 wt%) νανοσωλήνων άνθρακα διπλού τοιχώματος [106]. Η μηχανική αντοχή της ένωσης πολυμερούς/CNT μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με περιοδική διαμόρφωση σχεδίων στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων άνθρακα (δέρμα τσίτα) [105]. Μια καλή αναλογία μεταξύ σκληρότητας και αντοχής σε πολυμερή σύνθετα υλικά που περιέχουν CNTs μπορεί να ληφθεί με χημική λειτουργικότητα των εν λόγω πληρωτικών. Αρκετές μελέτες που αναφέρθηκαν στο [109] αναφέρουν το πιμελικό οξύ ή το πιμελικό ασβέστιο ως κατάλληλη χημική ένωση. Σε αυτές τις μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι η χημική λειτουργικότητα οδηγεί σε αυξημένη σκληρότητα και ολκιμότητα των σύνθετων υλικών και βελτιωμένη συμβατότητα μεταξύ του πληρωτικού και της πολυμερούς μήτρας. Το σύνθετο υλικό νανοϊών άνθρακα με πυρίτιο αναφέρθηκε ως κατάλληλο υλικό ανόδου για μπαταρίες ιόντων λιθίου [110].

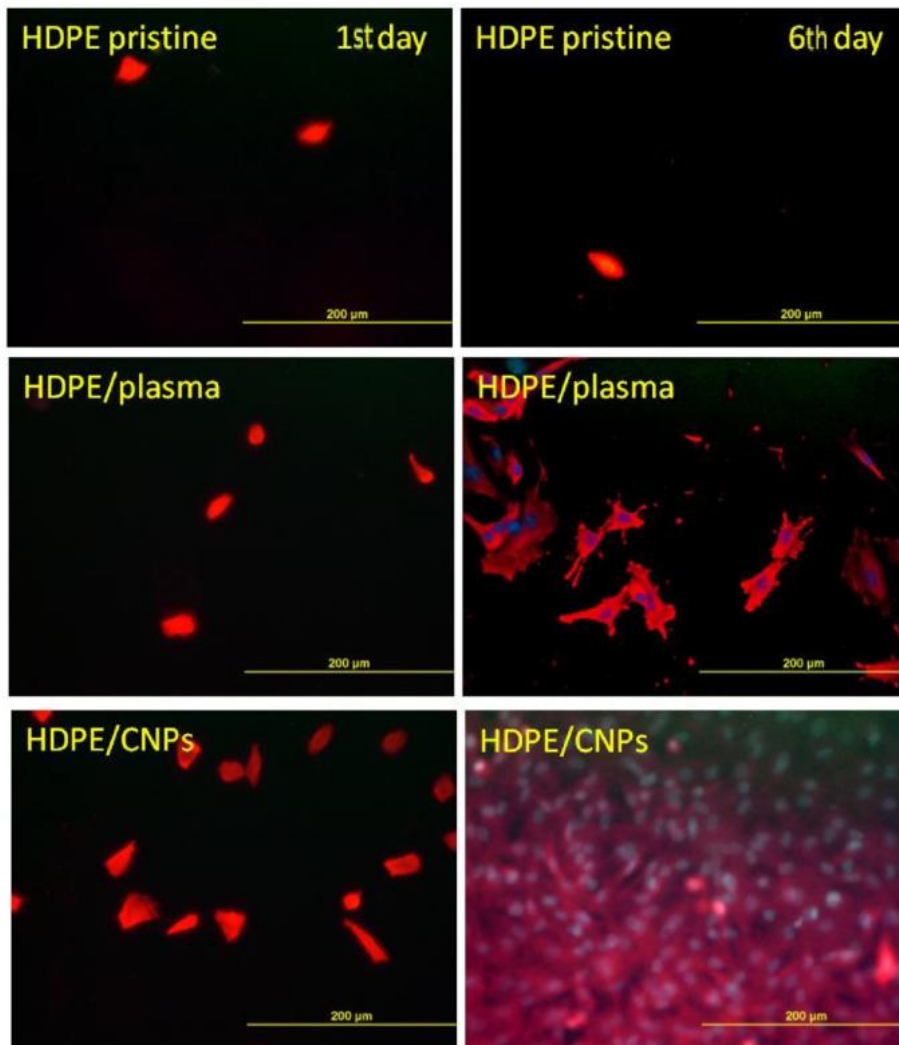
### 2.7.7. Νανο-κρεμμύδια άνθρακα

Οι νεότερες νανοδομές άνθρακα περιλαμβάνουν νανο-κρεμμύδια άνθρακα (CNOs), επίσης γνωστά ως πολυστρωματικά φουλερένια. Είναι ένας τέτοιος συνδυασμός φουλερενίων και νανοσωλήνων πολλαπλών τοιχωμάτων. Μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως τα λεγόμενα κλουβιά φουλερενίου. Υπάρχουν δύο τύποι πολυστρωματικών αντικειμένων γραφίτη: αληθινά κρεμμύδια άνθρακα, που εμφανίζουν μια ομόκεντρη δομή σφαιρικών κελυφών, και βολβώδη νανοσωματίδια γραφίτη, με έντονα πλευρικό σχήμα και σημαντικά μεγαλύτερη εσωτερική κοιλότητα. Η δομή τους περιέχει εξαγωνικούς και πενταγωνικούς δακτυλίους με άτομα άνθρακα που βρίσκονται στις κορυφές. Σχηματίζουν δύο απλούς δεσμούς και έναν διπλό δεσμό με γειτονικά άτομα άνθρακα με αποτοποθετημένα π-ηλεκτρόνια. Τα γραφικά στρώματα στη δομή αποτελούνται από πολλά ελαττώματα και τρύπες, οι οποίες μπορούν να γεμιστούν με διάφορους τρόπους με επταγωνικούς και πενταγωνικούς δακτυλίους άνθρακα. Αυτό παράγει ένα άμορφο ή κρυσταλλικό οιονεί σφαιρικό νανοκύτταρο άνθρακα [111]. Το κλασικό μέγεθος των νανοσωλήνων άνθρακα είναι 4–25 nm [112]. Αυτές οι δομές χρησιμοποιούνται συχνά ως άνοδοι υψηλής ταχύτητας. Ακόμα, οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από τις συνθήκες της σύνθεσής τους—μπορούν να παρασκευαστούν με ποικίλες μεθόδους όπως CVD, απόπτωση υπό κενό, εκκενώσεις τόξου κ.λπ. [113,114,115]. Πειράματα *in vitro* και *in vivo* έχουν δείξει πολλά υποσχόμενες ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής κυτταροτοξικότητας και του χαμηλού φλεγμονώδους δυναμικού, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα των CNO να χρησιμοποιούνται ως παράγοντες απεικόνισης και για στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων [116,117].

Τα νανοκύτταρα άνθρακα έχουν πολλά δομικά ελαττώματα. Αυτό, μαζί με το καμπύλο σχήμα τους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετατροπή σε άλλες μορφές άνθρακα, συγκεκριμένα σε σωματίδια με δομή διαμαντιού. Εκτός από την ακτινοβολία με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, ο μετασχηματισμός ενός κρεμμυδιού άνθρακα σε διαμάντι επιτυγχάνεται επίσης με βομβαρδισμό με ιόντα όπως το  $\text{Ne}^+$ , θερμική κατάρρευση σε θερμοκρασίες 500 °C ή με ακτινοβολία με λέιζερ  $\text{CO}_2$ .

### 2.7.8. Σφαιρικά νανοσωματίδια άνθρακα

Ο ενεργός άνθρακας, ο άνθρακας και η αιθάλη έχουν υψηλή ειδική επιφάνεια λόγω της σωματιδιακής τους δομής. Μικρές και ακανόνιστα διατεταγμένες γραφικές περιοχές καθιστούν το υλικό πρακτικά ισότροπο. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι αιθάλης - η αιθάλη ως προϊόν ατελούς καύσης και η αιθάλη που λαμβάνεται με θερμική αποσύνθεση [10]. Τα νανοσωματίδια άνθρακα θα μπορούσαν, λόγω των ιδιοτήτων τους που διαρρέουν, να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, έχουν ορισμένα σοβαρά μειονεκτήματα που αποκλείουν τη χρήση τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Για τα υλικά με βάση τον άνθρακα, και ιδιαίτερα τα νανοσωματίδια, είναι συχνά η τάση τους να συσσωματώνονται. Μέθοδοι λειτουργικότητας της επιφάνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της συσσωμάτωσης ή την πλήρη εξάλειψή της, ειδικά με τη βοήθεια υδρόφιλων ομάδων [118]. Η ίδια η λειτουργικοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους χρησιμοποιώντας διαφορετικές ουσίες. Τα μεταλλικά νανοσωματίδια χρησιμοποιούνται συχνότερα, αλλά διάφορες χημικές ομάδες ή άλλες ουσίες μπορούν επίσης να προσκολληθούν χημικά στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων. Ορισμένες μελέτες [119,120] δείχνουν ότι η εισαγωγή ενός ετεροατόμου αζώτου, θείου ή βορίου μπορεί να επηρεάσει θετικά τις ιδιότητες των νανοσωματιδίων άνθρακα. Για παράδειγμα, το άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές - όπως νίτρο ή αμινο [121]. Έχει βρεθεί ότι οι αμίνες που έχουν θετικό φορτίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την ελκυστικότητα των νανοσωματιδίων άνθρακα στη μελέτη της κυτταρικής αλληλεπίδρασης [122]. Τέτοια λειτουργικά νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε μόνα τους είτε συνδεδεμένα με άλλο τύπο υλικού. Στη μηχανική ιστών, πολυμερικά υλικά χρησιμοποιούνται πολύ συχνά και θα μπορούσαν να τροποποιηθούν με αυτόν τον τρόπο και να χρησιμοποιηθούν ενδεχομένως, για παράδειγμα, για ανάπτυξη και καλλιέργεια κυττάρων (Εικόνα 6). Ο συνδυασμός ενός κατάλληλου υποστρώματος και ενός στη συνέχεια λειτουργοποιημένου νανοσωματιδίου θα εκμεταλλευόταν τις ιδιότητες του πολυμερούς υλικού και ταυτόχρονα θα βελτίωνε τα μειονεκτήματά του (χαμηλή βιο- ή κυτταροσυμβατότητα) [123].



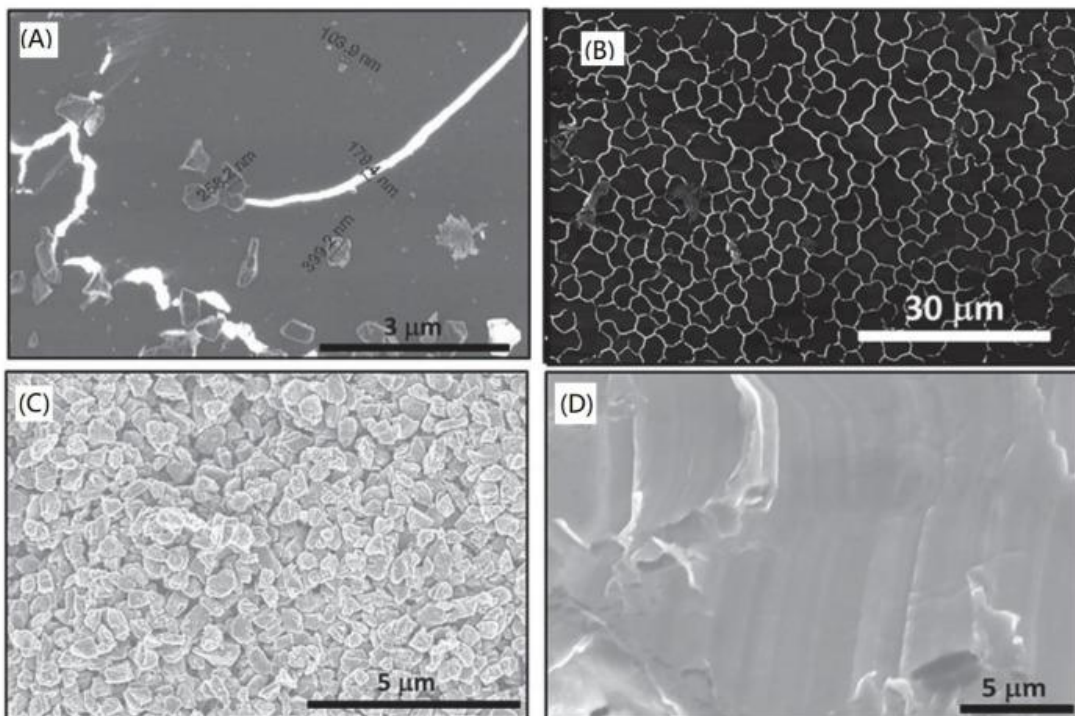
**Σχήμα 11.** Εικόνες μικροσκοπίας φθορισμού των VSMC που προσκολλήθηκαν (1η ημέρα) και πολλαπλασιάστηκαν (6η ημέρα) σε παρθένα (HDPE) και CNP εμβολιασμένα (/CNPs). Ο χρόνος έκθεσης στο πλάσμα για όλα τα τροποποιημένα δείγματα ήταν 120 s. Επανεκτυπώθηκε με την άδεια από την αναφ. [123], 2017, Elsevier.

### 2.7.9. Q-Carbon

Ωστόσο, η προσοχή εστιάζεται επί του παρόντος σε μια νέα φάση άνθρακα, που ονομάζεται σκληρυμένος άνθρακας (Q-carbon, Q-C), η οποία παρουσιάζει εξαιρετικές σιδηροηλεκτρικές ιδιότητες, ακόμη καλύτερες από το διαμάντι [124]. Ο Q-carbon έχει μοναδικές μηχανικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες, χάρη στις οποίες έχει δοθεί μεγάλη προσοχή, ειδικά στην ελεγχόμενη ηλεκτρονικά και βιοϊατρική [125,126]. Ο Q-carbon έχει μια άμορφη δομή που αποτελείται από 75-85% sp<sup>3</sup> και υπολειμματικά sp<sup>2</sup> υβριδισμένα άτομα άνθρακα, που οδηγεί σε διάφορες συναρπαστικές ιδιότητες όπως το εξαιρετικό φαινόμενο Hall, η εκπομπή πεδίου και η υψηλότερη σκληρότητα από το διαμάντι [127,128]. Το πιο ενδιαφέρον από όλα είναι ότι ο Q-άνθρακας εμφανίζει σιδηρομαγνητισμό σε θερμοκρασία δωματίου και πάνω από αυτήν [129]. Κατά την



αξιολόγηση της σκληρότητας ενός υλικού, είναι απαραίτητο να εστιάσουμε στην απόκρισή του στη δράση εξωτερικών δυνάμεων. Υπό την επίδραση μιας εξωτερικής δύναμης, το υλικό υφίσταται μια αναστρέψιμη ελαστική ή μη αναστρέψιμη πλαστική παραμόρφωση. Το Q-carbon, που αποτελείται από μια σφιχτά διατεταγμένη τετραεδρική δομή, επιτρέπει σε κάποιον να αυξήσει την πυκνότητα του αριθμού των σωματιδίων έως και 50% σε κρυσταλλική και έως και 60% σε τυχαία διάταξη και να αυξήσει τη σκληρότητα κατά 40% σε σύγκριση με το διαμάντι. Ο άνθρακας Q, που ανακαλύφθηκε το 2015, είναι μια μετασταθερή φάση άνθρακα που ανακαλύφθηκε πρόσφατα [130]. Σχηματίζεται μετασχηματίζοντας λεπτά στρώματα άμορφου άνθρακα με τήξη παλμικού λέιζερ νανοδευτερόλεπτου και επακόλουθη σκλήρυνση σε υποψύξη [131]. Ο άνθρακας Q μπορεί να παρασκευαστεί με τήξη με παλμικό λέιζερ νανοδευτερόλεπτου (PLA) που ακολουθείται από εξαιρετικά γρήγορη απόσβεση του άμορφου άνθρακα. Κατά τη διαδικασία μη ισορροπίας της απόψυξης με παλμικό λέιζερ, ο άνθρακας λιώνει. Αυτό το τήγμα μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε διάφορα πολύμορφα άνθρακα. Το δεύτερο στάδιο υπερταχείας σκλήρυνσης προκαλεί την τετηγμένη κατάσταση να παραμείνει κάτω από το σημείο τήξης ισορροπίας λόγω της υποψύξης. Εάν η υποψύξη είναι αρκετά μεγάλη, μετασταθερές καταστάσεις (διαμάντι και άνθρακας Q) με χαμηλότερο σημείο τήξης από τη σταθερή φάση γραφίτη μπορούν να σχηματίσουν πυρήνες. Το μέγεθος της υποψύξης καθορίζει έτσι την προκύπτουσα φάση που σχηματίζεται και τον κινητική και τον ρυθμό ανάπτυξης [132].



**Σχήμα 12.** (Α) Σχηματισμός Q-άνθρακα και ανάπτυξη διαμαντιού από Q-άνθρακα, (Β) Q-άνθρακα μεγάλης επιφάνειας, (Γ) μικροκρυστάλλοι διαμαντιού και (Δ) φιλμ μονοκρυστάλλου διαμαντιού μεγάλης περιοχής στο (0001) ζαφείρι.



Έχει προταθεί ότι ο υγρός άνθρακας μπορεί να υπάρχει ως θερμοδυναμικά σταθερή φάση σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Ανάλογα με την ενεργειακή πυκνότητα του λέιζερ και τις φυσικές ιδιότητες του άμορφου φιλμ και υποστρώματος, εμφανίζεται μια διαδικασία υπερψύξης και σβέσης, που οδηγεί σε μια μετασταθερή κατάσταση της δομής του άμορφου άνθρακα Q με μοναδικές ιδιότητες [133]. Έχει αποδειχθεί ότι η θέρμανση με λέιζερ νανοδευτερόλεπτου του διαμαντιού άμορφου άνθρακα σε υποστρώματα ζαφείρι, γυαλιού και πολυμερούς μπορεί να μειωθεί μέχρι την τήξη του άνθρακα σε πολύ υπόψυξη [129]. Με βάση πειράματα και προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης ενός λέιζερ με ένα στερεό φιλμ, έχει βρεθεί ότι η υποψύξη επιτρέπει τον σχηματισμό Q-άνθρακα όταν οι ρυθμοί ανάπτυξης είναι  $6\text{--}16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ενώ οι ταχύτητες  $4\text{--}6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  επαρκούν για το σχηματισμό διαμαντιών [132]. Ο άνθρακας Q διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον σχηματισμό διαμαντιών—νανοδιαμάντια, μικροδιαμάντια, μικροβελόνες και μονοκρυσταλλικές λεπτές μεμβράνες μπορούν να σχηματιστούν ανάλογα με τις επιτρεπόμενες συνθήκες πυρήνωσης και ανάπτυξης για το σχηματισμό διαμαντιών [129,134].

Λόγω της υψηλής σκληρότητας του Q-carbon που αναφέρθηκε παραπάνω, αυτό το υλικό είναι κατάλληλο ως μέρος ενός σύνθετου υλικού, όπου εξασφαλίζει αντοχή και σκληρότητα ως ενισχυτικό συστατικό σε μια μαλακότερη μήτρα. Οι προστατευτικές επιστρώσεις για τριβολογικές εφαρμογές πρέπει να πληρούν τρεις βασικές προϋποθέσεις: σκληρότητα, αντοχή και ικανοποιητική πρόσφυση στο υπόστρωμα. Αν και οι στρώσεις διαμαντιών και DLC παρουσιάζουν εξαιρετική σκληρότητα, χαμηλό συντελεστή τριβής και βιοσυμβατότητα, το πρόβλημα μπορεί να είναι η χαμηλότερη πρόσφυσή τους και επομένως η μειωμένη διάρκεια ζωής λόγω αποφλοίωσης. Επιπλέον, η δράση ενός παλμικού λέιζερ στο φιλμ άνθρακα στο υπόστρωμα δημιουργεί θλιπτική τάση στη διεπιφάνεια μεμβράνης/υποστρώματος, η οποία οδηγεί σε παραμόρφωση εφελκυσμού στα ανώτερα στρώματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό νηματώδους άνθρακα Q, παρέχοντας σκληρότητα και αντοχή κάτω από το στρώμα α-άνθρακα, το οποίο λειτουργεί ως μήτρα του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας απαλότητα και πρόσφυση [135]. Η επίδραση της νανοσύνθετης επίστρωσης Q-carbon έχει διερευνηθεί στους ανοξειδωτους χάλυβες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη χημική, πετροχημική και ιατρική βιομηχανία. Οι επικαλύψεις σε ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες για ιατρική χρήση εκτελούν κατά κύριο λόγο μια προστατευτική λειτουργία, αποτρέποντας την άμεση επαφή του χάλυβα με σωματικά υγρά και αποτρέποντας τη διάβρωση και απελευθερώνοντας ιόντα σιδήρου, χρωμίου και νικελίου στο σώμα [136].

#### **2.7.10. Αερόπηκτα άνθρακα (αερογέλη) και αερογραφίτης**

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα σχετικά με τις ενεργειακές εφαρμογές έχει επικεντρωθεί στα αερόπηκτα άνθρακα. Λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της μηχανικής αντοχής, της χαμηλής πυκνότητας, της μεγάλης επιφάνειας και της καλά ελεγχόμενης δομής τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

απορροφητικά, καταλύτες αποθήκευσης καυσίμου υδρογόνου ή υπερπυκνωτές, ηλεκτρόδια ή ως μονωτικά υλικά [137,138,139]. Τα αερόπηκτα άνθρακα είναι τρισδιάστατα νανοδίκτυα με ανοιχτή πορώδη δομή που επιτρέπει τη διείσδυση μορίων και ιόντων στον εσωτερικό χώρο [140]. Η μικροδομή αποτελείται από διασυνδεδεμένα σωματίδια στερεάς φάσης—κόκκους άνθρακα, στους οποίους υπάρχει ένα δίκτυο συνυφασμένων ιών γραφίτη με πλάτος πολλών μονάδων (nm) [141], και είναι το προαιρετικό και προσαρμόσιμο πορώδες που τις καθιστά εξαιρετικούς υποψηφίους για ακραία εφαρμογές όπως τα διαστημικά οχήματα [142]. Τα αερόπηκτα άνθρακα υπερέχουν επίσης σε εξαιρετικά υψηλή αντοχή στη θερμότητα και σταθερότητα. Μπορούν να διατηρήσουν την πορώδη δομή τους σε μια αδρανή ατμόσφαιρα, ακόμη και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες 2273 K [139]. Υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις για την παρασκευή αερογέλης: (i) άμεση ενανθράκωση των αεροπηκτών, (ii) αυτοσυναρμολόγηση δομικών στοιχείων νανοάνθρακα και (iii) χημική εναπόθεση ατμών. Ωστόσο, η παραγωγή συνοδεύεται από σοβαρές ελλείψεις (η νανοδομή συχνά συρρικνώνεται και καταρρέει κατά τη διαδικασία της ενανθράκωσης, χρησιμοποιούνται πολύ ακριβές και συχνά τοξικές πρόδρομες ουσίες για την παραγωγή, απαιτείται περίπλοκος και δαπανηρός εξοπλισμός για την παραγωγή), γεγονός που εμποδίζει την πρακτική ανάπτυξη των αερόπηκτων άνθρακα [140,142].

Τα αερογέλη με βάση το γραφένιο έχει αποδειχθεί ότι έχουν υψηλή απόδοση προσρόφησης και εξαιρετική δυνατότητα ανακύκλωσης ελαίων και οργανικών διαλυτών. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της σύνθεσης παράγονται όξινα απόβλητα, γεγονός που περιορίζει σοβαρά τη βιομηχανική παραγωγή. Επομένως, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί μια απλή, οικονομική και αποτελεσματική μέθοδος για τη σύνθεση ενός αερογέλης με βάση τον άνθρακα σε μεγάλη κλίμακα. Τα τελευταία χρόνια, από συνθετική βακτηριακή κυτταρίνη έχουν παρασκευαστεί αερογέλες από νανοϊνες άνθρακα με καλή απορρόφηση ελαίου και ιδιότητες οργανικού διαλύτη. Ωστόσο, τα μειονεκτήματά τους, όπως η υδροφοβία, η χαμηλή ικανότητα προσρόφησης, η κακή άνωση και η μη ικανοποιητική ικανότητα ανακύκλωσης, εμποδίζουν την περαιτέρω εφαρμογή στον διαχωρισμό του νερού λαδιού. Αυτά τα μειονεκτήματα έχουν ξεπεραστεί με τη χρήση ενός άλλου οργανικού υλικού, δηλαδή της ίνας καπός. Ένα ελαφρύ, υδρόφοβο πορώδες αερογέλη μικροσωλήνα άνθρακα (CMA), το οποίο έχει υψηλή ικανότητα απορρόφησης με διάφορους οργανικούς διαλύτες και έλαια, μπορεί να παρασκευαστεί από αυτήν την ίνα με μια απλή μέθοδο. Η ικανότητα προσρόφησης CMA έφτασε το 78–348 φορές το βάρος του. Το CMA έχει επίσης εξαιρετική θερμική σταθερότητα και χάρη στις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, το CMA μπορεί να ανακυκλωθεί με απόσταξη, συμπίεση και αποτέφρωση. Το παρασκευασμένο CMA επομένως χρησιμοποιείται ευρέως ως οικονομικό και ασφαλές προσροφητικό για την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, το CMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό τρισδιάστατων ηλεκτροδίων για αποθήκευση ενέργειας ή ως δομικό στοιχείο για άλλα λειτουργικά σύνθετα υλικά [143].

Μια συναρπαστική εναλλακτική λύση στα αερογέλη είναι τα υλικά που ονομάζονται αερογραφίτης. Αυτά είναι εντελώς μαύρα, οπτικά αδιαφανή υλικά με πολύ χαμηλή πυκνότητα ( $<200 \text{ μg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) και εξαιρετική

στιβαρότητα ικανά να αντέχουν έντονες παραμορφώσεις και αξιοσημείωτα μηχανικά φορτία εφελκυσμού χωρίς απώλεια δομικής ακεραιότητας. Έχουν ήδη αναπτυχθεί τεχνικές για την παρασκευή αεροπηκτών σε διάφορα μακροσκοπικά σχήματα αρκετών cm<sup>2</sup>. Η πορώδης δομή του αερογραφίτη αποτελείται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο μικροσωλήνων με νανοσκοπικό πάχος ( $\approx 15$  nm). Ανάλογα με την τεχνική παρασκευής που χρησιμοποιείται, μπορεί να δημιουργηθεί ένας αριθμός παραλλαγών αερογραφίτη, άλλοι τύποι άνθρακα μπορούν να εισαχθούν σε κούλους μικροσωλήνες και είναι δυνατός ο συντονισμός της μορφολογίας του αερογραφίτη με μια ευρεία έννοια σχετικά με τις αναλογίες διαστάσεων, τις διαμέτρους και επιφανειακή δομή. Η μέθοδος CVD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή αερογραφίτη. Με σύνθεση ενός σταδίου χρησιμοποιώντας πρότυπα ZnO, υλικά της τάξης των cm<sup>3</sup> μπορούν να παρασκευαστούν με εξαιρετική μηχανική αντοχή, ειδική ακαμψία και αντοχή σε εφελκυσμό και εξαιρετικά χαμηλή αναλογία Poisson. Η ατομική δομή μπορεί να ρυθμιστεί από γραφικό σε υαλώδη πυρολυτικό άνθρακα. Ιδιότητες όπως υπερυδροφοβία (άριστη διαβροχή με εποξειδικά συστήματα για την παραγωγή νανοσύνθετων υλικών), αγωγιμότητα, ευκαμψία και συμπίεστικότητα χωρίς απώλεια δομικής ακεραιότητας, υψηλή οπτική απορρόφηση και αδιαφάνεια ακτίνων X, σταθερότητα υψηλής θερμοκρασίας και χημική αντοχή, αντοχή σε εφελκυσμό και συμπίεση και υπερυδρόφοβο το καθιστά ένα αξιόλογο πολυλειτουργικό υλικό. Πιθανές εφαρμογές για αυτά τα υλικά μπορούν να βρεθούν σε τομείς όπως τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), η ηλεκτρική θωράκιση ή η εφαρμογή αγωγίων ηλεκτροδίων, τα οποία θα πρέπει να αντέχουν σε υψηλές επιταχύνσεις, για παράδειγμα, που προκαλούνται από κραδασμούς ή κραδασμούς [144].

### 2.7.11. Υλικά άνθρακα – άνθρακα

Μια ειδική ομάδα σύνθετων υλικών είναι τα υλικά άνθρακα-άνθρακα. Πρόκειται για σύνθετες μήτρες άνθρακα ενισχυμένες με ίνες άνθρακα ή νανοσωματίδια. Το πλεονέκτημα τέτοιων υλικών είναι η χαμηλή τους πυκνότητα (συνήθως 1,6–2 g·cm<sup>-3</sup>) σε σύγκριση με σύνθετα υλικά μετάλλων ή κεραμικών [145].

Τα άλλα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, υψηλή αντοχή σε θερμικούς κραδασμούς και χημική σταθερότητα. Πρόκειται για πολύ συγκεκριμένους συνδυασμούς ανθρακούχων υλικών, επομένως η χρήση τους είναι επίσης πολύ συγκεκριμένη. Αυτά τα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, στην παραγωγή ακροφυσίων για πυραυλοκινητήρες και για φρένα αεροσκαφών. Ωστόσο, το μεγάλο τους πρόβλημα είναι η οξειδωση σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 773 K, όταν μειώνεται η αντοχή τους. Αυτό περιορίζει τη χρήση τους μόνο σε αδρανή ατμόσφαιρα. Μια πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η επίστρωση των σύνθετων υλικών με καρβίδιο του πυριτίου (SiC) [146].

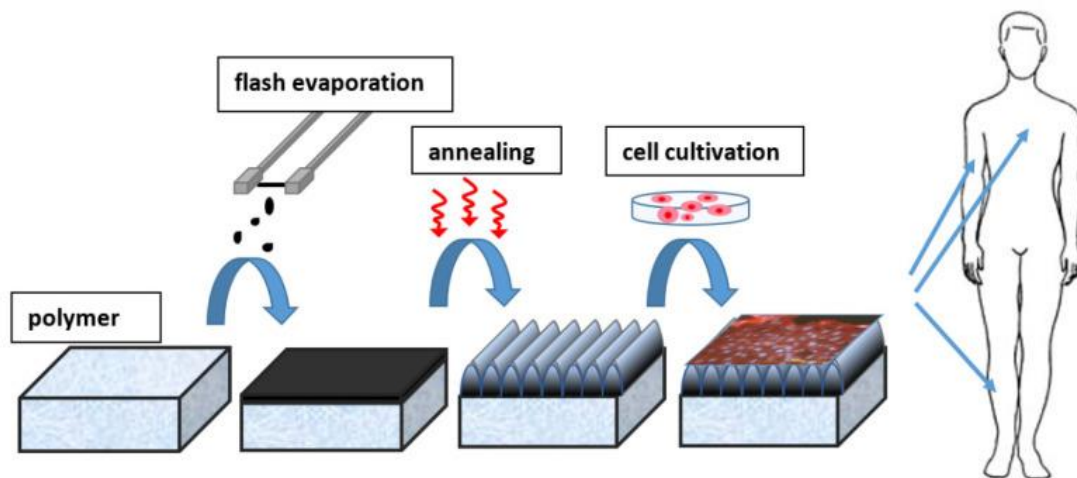
### 2.7.12. Υλικά άνθρακα παρασκευαζόμενα από CO<sub>2</sub>

Οι άνθρακες που μετατρέπονται σε CO<sub>2</sub> μπορεί να γίνουν πολλά υποσχόμενοι υποψήφιοι για υλικά ηλεκτροδίων υψηλής χωρητικότητας, υψηλής ταχύτητας, χαμηλού κόστους και μεγάλης επιφάνειας σε μελλοντικούς υπερπυκνωτές. Πράγματι, η παρασκευή διαφόρων υλικών άνθρακα με βάση την τεχνολογία μετατροπής CO<sub>2</sub> έχει μελετηθεί εντατικά τα τελευταία χρόνια και έχει ήδη αναγνωριστεί ως μια προηγμένη στρατηγική για την πράσινη κατασκευή υλικών ηλεκτροδίων με πολλά υποσχόμενες προοπτικές εφαρμογής. Η επιλεκτική μείωση του CO<sub>2</sub> σε καθαρό άνθρακα αναμένεται να είναι μια καλή εναλλακτική για την ανακύκλωση αερίων θερμοκηπίου. Ωστόσο, η υψηλή σταθερότητα του δεσμού C = O στο CO<sub>2</sub> το καθιστά σημαντικό πρόβλημα. Οι Chen Li et al. [147] δηλώνουν ότι πολλά ανθρακούχα υλικά (CNT, CNF, GO, κ.λπ.) μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν ως νανοδομές για αποθήκευση ενέργειας, καύσιμα και αντικείμενα παρέχοντας εφεδρική ισχύ και την πρόληψη των διακοπών ρεύματος που χρησιμεύουν ως βασικά εξαρτήματα για στρατιωτικούς σκοπούς, ηλεκτρικά οχήματα, έξυπνα εργαλεία και φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτό, συμπεριλαμβανομένης της άμεσης μεταλλοθερμικής καύσης, της μετατροπής ανθρακικών, της μείωσης υψηλής θερμοκρασίας και των ελεγχόμενων αντιδράσεων αυτάρκειας. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της όσον αφορά την απόδοση προετοιμασίας, την κατανάλωση ενέργειας, την ποιότητα του προϊόντος κ.λπ. Επομένως, οι λεπτομέρειες της τεχνολογίας θα πρέπει πάντα να κάνουν κατάλληλες βελτιώσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων [147].

### 2.7.13. Άνθρακας τύπου διαμαντιού (DLC) και τεχνική PVD

Ο άνθρακας χρησιμοποιείται καθημερινά, όχι μόνο στη φυσική του μορφή, με τη μορφή νανοσωματιδίων, αλλά και με τη μορφή στρώσεων ή νανοστοιβάδων. Πρέπει να τονιστεί ότι είναι πολύ δύσκολο να καθοριστούν με ακρίβεια τα πάχη του στρώματος κάτω από το οποίο το στρώμα γίνεται λεπτό. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι, με το πάχος του στρώματος, οι ιδιότητες αλλάζουν διαφορετικά. Γενικά, ωστόσο, η τιμή του πάχους λεπτής μεμβράνης έχει σταθεροποιηθεί κάτω από το ένα μm, εναποτιθέμενο με μία από τις ακόλουθες μεθόδους. Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο ορίζεται το όριο μεταξύ ενός λεπτού στρώματος και ενός παχύ στρώματος είναι εάν το στρώμα έχει ιδιότητες επιφάνειας ή «χύμα» [148,149]. Η εφαρμογή λεπτών μεμβρανών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ηλεκτρικές, οπτικές και φυσικές ιδιότητες του επιλεγμένου υλικού. Αντίθετα, αυτές οι ιδιότητες εξαρτώνται από την επιλεγμένη τεχνική και τη διαδικασία παρασκευής λεπτής μεμβράνης. Η χρήση της ίδιας διαδικασίας και μεθόδου προετοιμασίας μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ενός διαφανούς, διηλεκτρικού φιλμ με εξαιρετικές οπτικές ιδιότητες, ενώ

ρυθμίζοντας ελαφρά τις καθορισμένες παραμέτρους, μπορεί να παρασκευαστεί ένα αδιαφανές φιλμ κατάλληλο για ηλεκτρικά αγώγιμες και όχι οπτικές εφαρμογές. Οι λεπτές μεμβράνες διαδραματίζουν επομένως σημαντικό ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών και ιατρικών εφαρμογών [150].



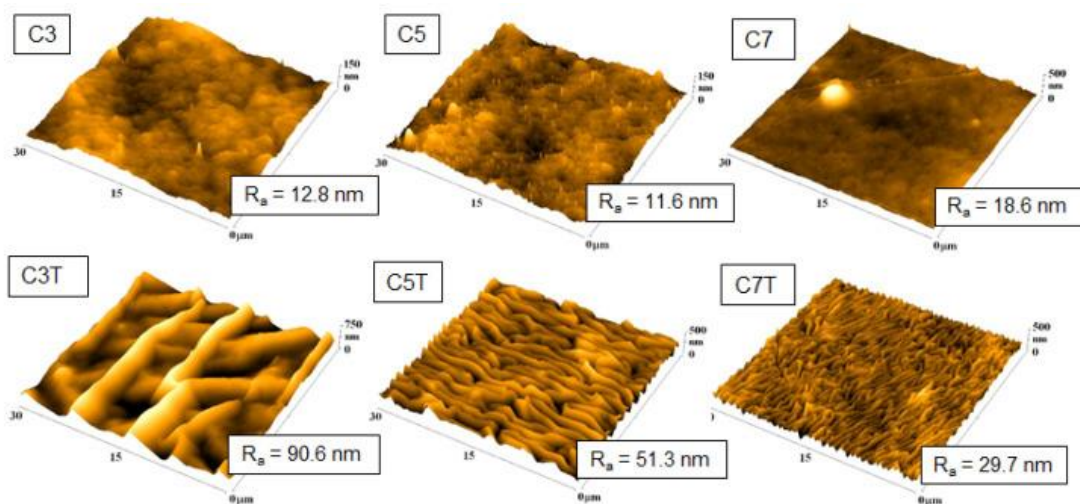
Σχήμα 13. Σχέδιο εφαρμογής των επικαλυμμένων με άνθρακα LIPSS στη μηχανική ιστών Ανατυπώθηκε με την άδεια από την αναφ. [151], 2019, Elsevier.

Ο άνθρακας που μοιάζει με διαμάντι (DLC) είναι μια ομάδα ασαφών υλικών άνθρακα με μοναδική ιδιότητα διαμαντιού. Είναι μια μετασταθερή μορφή άμορφου άνθρακα που περιέχει σημαντικό ποσοστό δεσμών  $sp^3$  (ένα μείγμα δεσμών άνθρακα  $sp^2$  και  $sp^3$ ) [152]. Τα στρώματα DLC έχουν κάποιες ιδιότητες παρόμοιες με το διαμάντι, αλλά επιτυγχάνονται σε ένα ισοτροπικό διαταραγμένο λεπτό φιλμ χωρίς όρια κόκκων [153]. Μπορεί επίσης να οριστεί ως ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από νανοκρυσταλλικά διαμάντια και/ή άμορφο αλουμίνιο με ή χωρίς υδρογόνο [152]. Οι τυπικές ιδιότητες των στρωμάτων DLC περιλαμβάνουν εξαιρετική σκληρότητα, πυκνότητα, ηλεκτρική αντίσταση, χημική αντίσταση, διαφάνεια υπερύθρων, εξαιρετική ομαλότητα, χαμηλό συντελεστή τριβής και υψηλή αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση [153,154,155]. Το DLC αποτελείται όχι μόνο από άμορφους άνθρακες ( $a-C$ ) αλλά και από υδρογονωμένα κράματα,  $a-C:H$ . Η πιο σκληρή μορφή θεωρείται ο τετράπλευρος άμορφος άνθρακας ( $ta-C$ ). Όταν χρησιμοποιείται ήδη με τη μορφή στρώματος πάχους δύο μμ, αυξάνει τη διάρκεια ζωής του ανοξειδώτου χάλυβα από 1 εβδομάδα σε 85 χρόνια [156]. Η παραγωγή επιστρώσεων DLC είναι πολύ φθηνότερη από το διαμάντι μόνο, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα για πολλές εφαρμογές. Τα στρώματα και τα φύλλα DLC χρησιμοποιούνται ως προστατευτικές επικαλύψεις στη βιοϊατρική και την ηλεκτρονική, καθώς και στις βιομηχανίες αυτοκινήτων, ναυπηγικής και μηχανουργικής. Τα στρώματα DLC μπορούν να παρασκευαστούν με μια ποικιλία μεθόδων, όπως με φυσική εναπόθεση ατμού, διεργασίες διασκορπισμού μαγνητρονίων (PVD), όπως εξάτμιση ή εξάτμιση τόξου, ή με χημική εναπόθεση ατμού ενισχυμένη με πλάσμα (PECVD) και εναπόθεση χημικών ατμών (CVD). [157.158.159.160.161]. Έτσι, είναι δυνατό να παρασκευαστούν φιλμ με συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες που βρίσκονται μεταξύ των ιδιοτήτων του

γραφίτη και του διαμαντιού [162]. Οι ιδιότητες και η ποιότητα του φιλμ DLC που προκύπτουν εξαρτώνται από το υπόστρωμα, τον τύπο εναπόθεσης και τις συνθήκες εναπόθεσης.

Τα στρώματα άνθρακα μπορούν να συντεθούν με διάφορους τρόπους και με διαφορετικές μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της ψεκασμού μαγνητρονίων, της εναπόθεσης χημικών ατμών ενισχυμένης με πλάσμα και της εναπόθεσης με δέσμη ιόντων. Μια απλή και αποτελεσματική διαδικασία προετοιμασίας στρωμάτων άνθρακα είναι η εξάτμιση από μια πηγή γραφίτη (π.χ. νήμα άνθρακα) [161,163,164]. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία τόσο πολύ λεπτών στρώσεων που είναι συνεχείς-συνεχείς (η τιμή πάχους είναι της τάξης των δεκάδων nm) όσο και για στρώματα υψηλότερου πάχους (της τάξης των εκατοντάδων nm). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο πολύ σύντομος χρόνος εναπόθεσης, κατά τον οποίο δεν υπάρχει μόλυνση των στρωμάτων που προκύπτουν. Σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα, το πάχος, την ομοιογένεια και τη σταθερότητα των στρωμάτων είναι ο ρυθμός εναπόθεσης και η απόσταση του υποστρώματος από την πηγή γραφίτη. Οι πιθανές εφαρμογές επικαλύψεων που παρασκευάζονται με εναπόθεση ατμού εξαρτώνται από τις παραμέτρους και τις ιδιότητές τους, ιδιαίτερα από το πάχος και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αυτά είναι ζωτικής σημασίας και καθορίζουν εάν τα στρώματα θα είναι χρήσιμα στην ηλεκτρονική ή τη μηχανική ιστών [165,166].

Τα στρώματα άνθρακα χρησιμοποιούνται συχνά στην αναγεννητική ιατρική. Ωστόσο, ο μη τροποποιημένος άνθρακας συχνά δρα ως βιοαδρανές, το οποίο μπορεί να είναι μειονέκτημα σε πολλές βιολογικές εφαρμογές. Επομένως, είναι σκόπιμο να τροποποιηθούν περαιτέρω τέτοιες επιφάνειες για την προετοιμασία προσαρμοσμένων υλικών—είτε οι επιφάνειες είναι κατάλληλες για αποικισμό κυττάρων είτε, αντίθετα, υλικά όπου η κυτταρική προσκόλληση είναι ανεπιθύμητη (π.χ. επιφάνειες σε επαφή με αίμα, καρδιακές βαλβίδες κ.λπ.). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός μεθόδων για μια τέτοια επεξεργασία - είναι δυνατή η χρήση ακτινοβολίας πλάσματος ή λέιζερ ή η θερμική λίπανση των προετοιμασμένων στρωμάτων είναι συχνά επαρκής για τη νανοδομή της επιφάνειας [151].



**Σχήμα 14.** Σαρώνει AFM PLLA που έχει εναποτεθεί άνθρακα πριν και μετά τη θερμική επεξεργασία. Οι αποστάσεις εναπόθεσης ήταν 3, 5 και 7 cm. Η τιμή Ra είναι σε nm. Η μέση τιμή τραχύτητας (Ra) αντιπροσωπεύει τον αριθμητικό μέσο όρο της απόκλισης από το κεντρικό επίπεδο του δείγματος

#### **2.7.14. Υβριδικά στρώματα άνθρακα**

Μια πολύ ενδιαφέρουσα ομάδα υλικών είναι τα υβριδικά υλικά. Στην περίπτωση αυτή, δομές που δημιουργήθηκαν με συνδυασμό/στρώσεις μεμονωμένων τύπων υλικών, όπως άνθρακα (στρώσεις άνθρακα, στρώματα γραφενίου) και ευγενές μέταλλο, το ένα πάνω στο άλλο. Τα υλικά που προκύπτουν δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτήν την αρχική μορφή. Πολύ συχνά, υποβάλλονται σε τροποποίηση από ακτινοβολία UV ή λέιζερ. Η δράση, για παράδειγμα, λέιζερ excimer μπορεί να οδηγήσει στη συνένωση μεμονωμένων στρωμάτων και στο σχηματισμό μεταλλικών συστάδων και νανοδομών. Κατασκευές που παρασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, στον τομέα της οπτικής, των τρανζίστορ ή των εφαρμογών αισθητήρων. Οι προκύπτουσες ιδιότητες της δομής και η «εμφάνιση» της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται και τις παραμέτρους των επιμέρους στρωμάτων. Διαπιστώθηκε ότι, στην περίπτωση ενός συνδυασμού στρώματος άνθρακα και χρυσού με αυξανόμενο πάχος άνθρακα, πραγματοποιήθηκε ένας μετασχηματισμός τύπου ρυτίδας σε μια ομοιογενή σειρά σε νανοσυμπλέγματα χρυσού [167].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

### Εισαγωγή

Το «IQ» των έξυπνων υλικών βασίζεται στην ανταπόκριση και την ευελιξία τους. Μια σύγκριση υλικών με αντίσταση θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC) δείχνει τη διαφορά μεταξύ ενός κανονικού και ενός «έξυπνου» υλικού. Η πλατίνα είναι ένα μέταλλο που χρησιμοποιείται συνήθως για αισθητήρες PTC και η μεταβολή της στην αντίσταση είναι πολύ μικρή ( $<0,03 \mu \Omega \cdot \text{cm/K}$ ) σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 K-1.500 K. Αντίθετα, το BaTiO<sub>3</sub> με ντοπαρισμένο δότη παρουσιάζει αλλαγή σε ειδική αντίσταση σχεδόν έξι τάξεων μεγέθους σε ένα εύρος θερμοκρασιών 350 K-450 K. Αυτή η ιδιότητα του BaTiO<sub>3</sub> επιτρέπει στο υλικό PTC να σχηματίσει ένα κύκλωμα αυτοπροστασίας μέσω της θερμοκρασίας ελέγχου χωρίς πρόσθετα ηλεκτρονικά [ 1 , 2 ].

Ορισμένα υλικά είναι εκ φύσεως «έξυπνα», όπως τα πιεζοηλεκτρικά, τα ηλεκτροσυστολικά και τα μαγνητοσυστολικά υλικά. Αυτά τα φυσικά υλικά, ωστόσο, είναι συχνά περιορισμένα ως προς τις θερμοκρασίες στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ή ως προς το εύρος απόκρισής τους. Με κατάλληλη μηχανική, αυτά τα έξυπνα υλικά μπορούν να γίνουν πιο έξυπνα και μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες εφαρμογές [ 1 ]. Τα έξυπνα υλικά μπορεί να είναι παθητικά, ενεργά ή πολύ έξυπνα υλικά [ 3]. Τα παθητικά έξυπνα υλικά ανταποκρίνονται χωρίς σκέψη ή επεξεργασία σήματος. Τα ενεργά έξυπνα υλικά αναλύουν το αισθητήριο σήμα και στη συνέχεια ανταποκρίνονται ανάλογα. Τα πολύ έξυπνα υλικά έχουν τις ίδιες ικανότητες με τα ενεργά έξυπνα υλικά και μπορούν επίσης να προσαρμοστούν στο περιβάλλον τους μέσω συντονισμού και εκμάθησης. Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) που μπορούν να ενσωματώσουν το σύστημα ελέγχου με αισθητήρες και ενεργοποιητές αναπτύσσονται επί του παρόντος και μπορούν να ταξινομηθούν ως ευφυή συστήματα. Πολλά έξυπνα υλικά και έξυπνα συστήματα είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά, ενώ άλλα βρίσκονται υπό έρευνα και ανάπτυξη για μελλοντικές εφαρμογές.

### Κύριοι τύποι έξυπνων υλικών και οι γνωστές και αναδυόμενες εφαρμογές τους

#### Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Το σχήμα 1 δείχνει έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παραμορφώνονται φυσικά από την έκθεση σε ηλεκτρικά πεδία και παράγουν ενέργεια όταν υφίστανται μηχανική καταπόνηση [ 4 ]. Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές έχουν πολλά πλεονεκτήματα επειδή είναι συμπαγείς σε μέγεθος, έχουν υψηλή ταχύτητα απόκρισης, υψηλή ακρίβεια και απαιτούν λίγη ενέργεια για να αντιδράσουν. Παράγουν



επιμήκυνση με φορτισμένη τάση [ 2 ]. Οι πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές περιλαμβάνουν μεγάφωνα, ακουστική απεικόνιση, συλλογή ενέργειας, ενεργοποίηση, παρακολούθηση της υγείας και αναγέννηση ιστών [ 5 ].



**Εικόνα 1.** Πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας

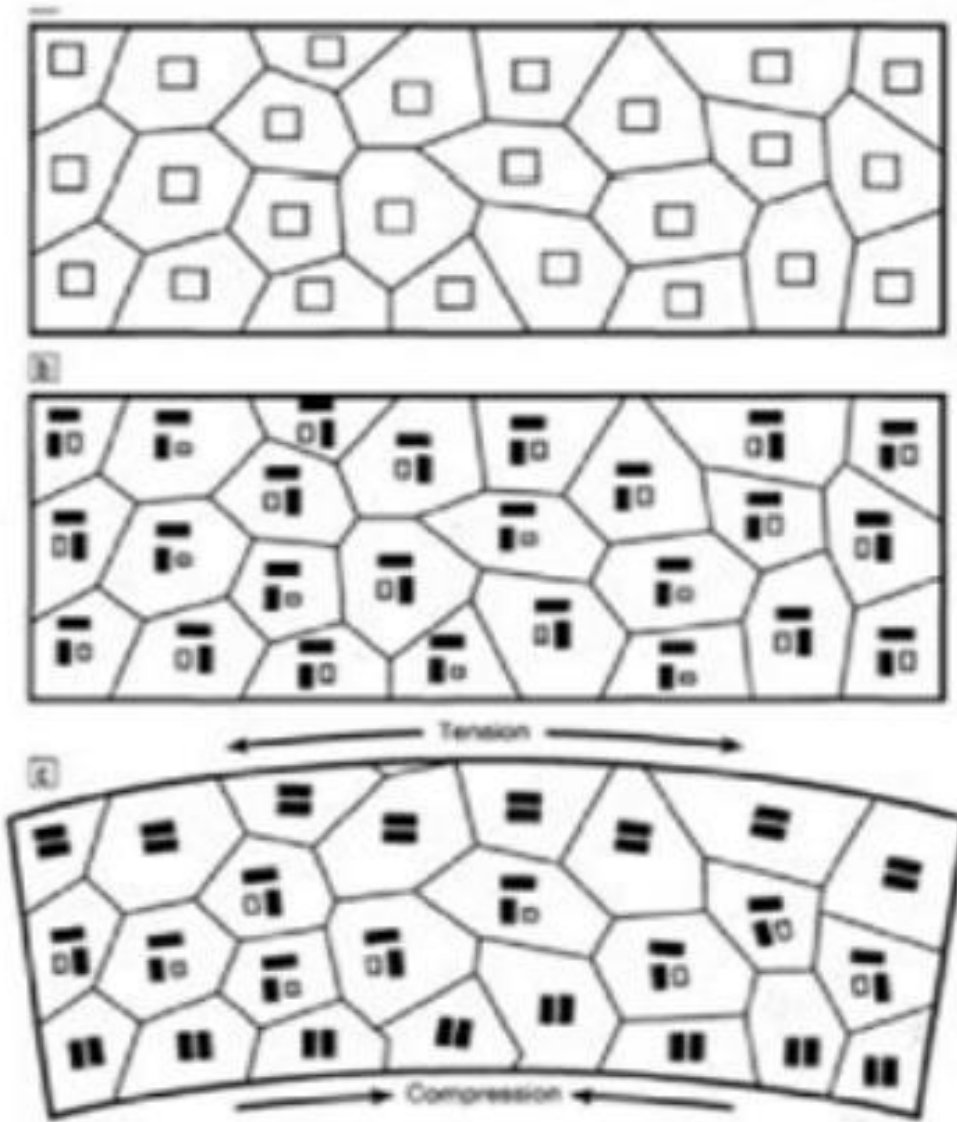
Το σχήμα 2 δείχνει πιεζοκεραμικά υλικά που είναι ευνοϊκά πιεζοηλεκτρικά υλικά λόγω του χαμηλού κόστους και του ελαφρού τους βάρους [ 6 ]. Είναι προτιμώμενα υλικά για ενεργό έλεγχο των δομικών κραδασμών. Τα πιεζοκεραμικά είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές, όπως άκαμπτο έμπλαστρο, εύκαμπτο έμπλαστρο, στοίβα, ενεργοποιητές Macro-Fiber Composite (MFC) και πιεζοκεραμικοί αποσβεστήρες τριβής [ 7 ].



**Εικόνα 2. Πιεζοκεραμικά**

### **Υλικά μνήμης**

Το Σχήμα 3 δείχνει υλικά μνήμης σχήματος που έχουν ασυνήθιστες ιδιότητες όπως το φαινόμενο μνήμης σχήματος (SME), ψευδοελαστικότητα, υψηλή ικανότητα απόσβεσης και προσαρμοστικές ιδιότητες που προέρχονται από την αναστρέψιμη συμπεριφορά μετάβασης φάσης. Αυτά τα υλικά είναι ικανά να ανιχνεύουν θερμικά, μηχανικά, μαγνητικά ή ηλεκτρικά ερεθίσματα και παρουσιάζουν ενεργοποίηση [ 8 ].



Εικόνα 3. Επάνω: Μερικώς διατεταγμένη ωστενιτική φάση υψηλής θερμοκρασίας. Μέση: Μερικώς μετασχηματισμένη μικτή ωστενιτική-μαρτενιτική φάση. Κάτω: Αλλαγές φάσης και μετακινήσεις τομέα-τοιχώματος από μηχανική καταπόνηση

Το Σχήμα 4 περιγράφει τη Nitinol (κράμα Ti-Ni) που είναι το πιο σημαντικό εμπορικό κράμα μνήμης σχήματος (SMA) και χρησιμοποιείται ευρέως στον βιοϊατρικό τομέα. Επιδεικνύει αποκλειστική απόδοση μνήμης σχήματος, επεξεργάζεται εύκολα και συνδέεται με καλή μηχανική συμπεριφορά, υψηλή αντοχή στη διάβρωση και βιοσυμβατότητα. Λεπτές μεμβράνες, ίνες, σωματίδια και πορώδεις όγκοι Ti-Ni έχουν κατασκευαστεί με επιτυχία τα τελευταία χρόνια. Τα κράματα μνήμης σχήματος Ti-Ni δεν είναι αποκλειστικά στον βιοϊατρικό τομέα. έχουν αποδείξει δυνατότητες εφαρμογής σε μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα, ευφή συστήματα και δομικά συγκροτήματα [ 8]. Τα κράματα με βάση τον χαλκό και το σίδηρο είναι επίσης ενδιαφέροντα υλικά μνήμης σχήματος λόγω του χαμηλού κόστους τους. Τα κράματα με βάση τον χαλκό κατασκευάζονται εύκολα. Ωστόσο, τα περισσότερα πολυκρυσταλλικά κράματα έχουν χαμηλή ολκιμότητα και εργασιμότητα [ 9]. Η προσθήκη άλλων μετάλλων όπως Al, Zn ή Ni στα κράματα με βάση τον χαλκό μπορεί να βελτιώσει την εργασιμότητα αυτών των υλικών, αλλά πρέπει να γίνουν

περισσότερες εξελίξεις για τη βελτίωση της θερμικής σταθερότητας. Τα κράματα με βάση τον σίδηρο, όπως τα κράματα Fe-Pt και Fe-Pd, παρουσιάζουν επαγόμενους μετασχηματισμούς μαρτενσίτη όταν εκτίθενται σε μαγνητικά πεδία. φέρουν δυναμικό εφαρμογής ως υλικά μνήμης σιδηρομαγνητικού σχήματος. Τα κεραμικά με μνήμη σχήματος όπως το γυαλί μαρμαρυγίας εμφανίζουν φαινόμενο μνήμης καθαρού σχήματος. Αυτά τα υλικά είναι ιξωδοελαστικά και διεγείρονται θερμικά. Τα φαινόμενα ψευδοελαστικότητας και μνήμης σχήματος παρουσιάζονται εάν οι μετασχηματισμοί είναι θερμοελαστικοί ή σιδηροελαστικοί ή εάν παρουσιάζουν αναστρέψιμες συμπεριφορές καταπόνησης ή ανάκτησης σχήματος. Τα κεραμικά με μνήμη σχήματος έχουν δυνατότητες για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας που ξεπερνούν τα όρια των κραμάτων μνήμης σχήματος. ωστόσο, έχουν περιορισμένη χωρητικότητα λόγω μικρών μεγεθών ανακτήσιμων στελεχών και μπορούν να παρουσιάσουν μικρορωγμές. Τα κεραμικά με μνήμη σχήματος που είναι σιδηροηλεκτρικά μπορεί να είναι καλύτερα κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές σε σχέση με τα κράματα μνήμης σχήματος. Τα κεραμικά μνήμης σιδηρομαγνητικού σχήματος είναι λιγότερο διερευνημένα επειδή παρουσιάζουν αυθόρμητη μαγνήτιση μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [10].



**Εικόνα 4. IMPEDE-FX, ένα πολυμερές μνήμης σχήματος κατά μνήμη σχήματος ιατρική για περιφερικό αγγειακό εμβολισμό**

Τα πολυμερή (SMPs) προσφέρουν μια σειρά από πιθανά τεχνικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα υλικά μνήμης σχήματος, όπως τα μεταλλικά κράματα με μνήμη σχήματος και τα κεραμικά με μνήμη σχήματος. Τα πολυμερή μνήμης σχήματος μπορούν να ανακτήσουν σχεδόν όλο τον υπολειπόμενο μετασχηματισμό κατά την επαναθέρμανση στη φάση καουτσούκ, σε αντίθεση με τα συνηθισμένα πολυμερή. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν υψηλή ανακτήσιμη καταπόνηση (έως 400%), χαμηλή πυκνότητα, ευκολία επεξεργασίας και δυνατότητα προσαρμογής της θερμοκρασίας ανάκτησης, προγραμματιζόμενη και

ελεγχόμενη συμπεριφορά ανάκτησης και, πιο σημαντικό, χαμηλό κόστος [ 11 ]. Η δημιουργία σύνθετων πολυμερών με μνήμη σχήματος ενισχύει περαιτέρω την απόδοση αυτών των υλικών και διευρύνει τις δυνατότητες εφαρμογής. Τα πολυμερή μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται επί του παρόντος στην αεροδιαστημική μηχανική, στην κλωστοϋφαντουργία, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στον ιατρικό τομέα.

### **Λειτουργικά υλικά**

Τα λειτουργικά υλικά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα οργανικών και ανόργανων υλικών και διαφέρουν από τα δομικά υλικά. Οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες είναι ευαίσθητες σε αλλαγές στις περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως θερμοκρασία, πίεση, παρουσία ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, διάδοση οπτικών κυμάτων, προσροφημένα μόρια αερίου και μεταβολές του pH. Εκτός από τα υλικά που ταξινομούνται ως έξυπνα υλικά, άλλα υλικά που διαθέτουν ορισμένες ειδικές λειτουργίες θεωρούνται ως λειτουργικά υλικά. Παραδείγματα περιλαμβάνουν το σιδηροηλεκτρικό  $\text{BaTiO}_3$  (αισθητήρας μαγνητικού πεδίου),  $\text{La}_1-x\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  (επιφανειακός αισθητήρας ακουστικών κυμάτων),  $\text{LiNbO}_3$  (αισθητήρας υγραερίου πετρελαίου),  $\text{SnO}_2$  με πρόσμειξη Pd (ανιχνευτής φωτός ημιαγωγών), CdS, CdTe (πιεζοηλεκτρικός υψηλής θερμοκρασίας),  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (αγωγός ταχέων ιόντων) και υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας [ 12 ].

### **Χρωμογόνα υλικά**

Το σχήμα 5 είναι ένα καλό παράδειγμα χρωμογειακών υλικών που καλύπτουν τις περισσότερες από τις εμφανώς εναλλασσόμενες εφαρμογές όπως υαλοπίνακες, καθρέφτες, διαφανείς οθόνες και μια ποικιλία άλλων εφαρμογών που περιλαμβάνουν οπτικές αλλαγές. Δύο κοινά χρωμογόνα φαινόμενα είναι ο φωτοχρωματισμός (αλλαγή χρώματος λόγω έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία) και ο θερμοχρωμισμός (αλλαγή χρώματος λόγω θερμοκρασίας). Τα χρωμογόνα έξυπνα υλικά περιλαμβάνουν ηλεκτροκίνητα μέσα, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτροχρωμικών υλικών, υλικών ηλεκτροφόρησης αιωρούμενων σωματιδίων, υγρών κρυστάλλων διεσπαρμένων πολυμερών και ηλεκτρικά θερμαινόμενων θερμοτροπικών [ 13]. Οι εφαρμογές για χρωμογόνα έξυπνα υλικά είναι κυρίως σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αρχιτεκτονικής, των αεροσκαφών και της απεικόνισης πληροφοριών. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι περισσότερες μεγάλες μάρκες αυτοκινήτων διαθέτουν εναλλακτικές επιλογές καθρέφτη. Αρκετές ομάδες όπως ο όμιλος Flabeg και η SAGE electrochromics επικεντρώνονται στην αγορά της αρχιτεκτονικής και εγκαθιστούν ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και φεγγίτες. Τα μελλοντικά αεροσκάφη θα χρησιμοποιούν

εναλλάξιμα παράθυρα επιβατών. Η Boeing και η Airbus έχουν κάνει τέτοιες ανακοινώσεις. Οι δύο κύριοι τομείς για την αγορά απεικόνισης πληροφοριών είναι οι καθοδικοί σωλήνες και οι υγροί κρύσταλλοι.



**Εικόνα 5. Εναλλασσόμενο κράνος μοτοσυκλέτας κατασκευασμένο από την ChromoGenics**

Το σχήμα 6 είναι ένα παράδειγμα ηλεκτροχρωμικών υλικών που ανταποκρίνονται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο αλλάζοντας τις οπτικές τους ιδιότητες. Μια αντιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου θα επαναφέρει το υλικό στην αρχική του κατάσταση. Οι εναλλάξιμοι καθρέφτες και τα παράθυρα χρησιμοποιούν αυτό το εφέ. Ο Όμιλος Flabeg έχει αναπτύξει ένα διακόπτη υαλοπίνακα που περιλαμβάνει μια μονάδα μονωμένου γυαλιού με δύο υαλοπίνακες. Η ChromoGenics της Σουηδίας αναπτύσσει ένα εύκαμπτο ηλεκτροχρωμικό σε πλαστικό για χρήση ως γείσο σε κράνη μοτοσυκλετών.



**Εικόνα 6. Οι θερμοτροπικοί υαλοπίνακες ThermoSEE της Pleotint, οι συσκευές αιωρούμενων σωματιδίων (SPDs) έχουν εφαρμογές για γυαλιά, γυαλιά και παράθυρα**

Οι υγροί κρύσταλλοι υπόκεινται σε μεγάλη έρευνα και ανάπτυξη για επίπεδες οθόνες. Ο προσανατολισμός των υγρών κρυστάλλων μεταβάλλει τις συνολικές ιδιότητες οπτικής ανακλαστικότητας του παραθύρου ή της οθόνης [ 13 ]. Τα θερμοτροπικά υλικά εμφανίζονται πιο καθαρά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και γίνονται αδιαφανή σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν φεγγίτες, κεκλιμένα τζάμια και πάνω παράθυρα. Μια ευρωπαϊκή εταιρεία που ονομάζεται Pleotint δημιούργησε ένα θερμοτροπικό που ονομάζεται ThermoSEE και η θερμοκρασία ενεργοποίησής του μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ  $-10^{\circ}\text{C}$  και  $50^{\circ}\text{C}$ .

## **Συνεχείς Ερευνητικές Δραστηριότητες, Έργα Εφαρμογών και Πρόσφατες Πρόοδοι**

### **Αστικές δομές**

Το σχήμα 7 δείχνει μια αστική δομή που ενσωματώνει έναν έξυπνο αισθητήρα. Μέχρι τώρα τα έξυπνα συστήματα επικεντρώνονταν κυρίως σε εφαρμογές μηχανολογίας και διαστημικές κατασκευές (ελαφριές και εύκαμπτες κατασκευές), αλλά υπάρχουν ενδείξεις αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την πολιτική μηχανική. Οι εφαρμογές πολιτικού μηχανικού περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της υγείας των κτιριακών κατασκευών, την αυτοεπισκευή και την ενεργοποίηση δομικών μελών [ 2 ]. Ερευνητές που εργάζονται στο Takenaka Corporation Research and Development Center στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο και στο Sumitomo Heavy Industrial Research and Development Center μελετούν τον έλεγχο απόκρισης των



κράματων μνήμης σχήματος. Οι συσκευές παθητικής απαγωγής ενέργειας για τη βελτίωση της δομικής ασφάλειας παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω καταστάσεων όπως οι σεισμοί.



**Εικόνα 7. Δοκιμαστικό Πλαίσιο τεσσάρων ορόφων**

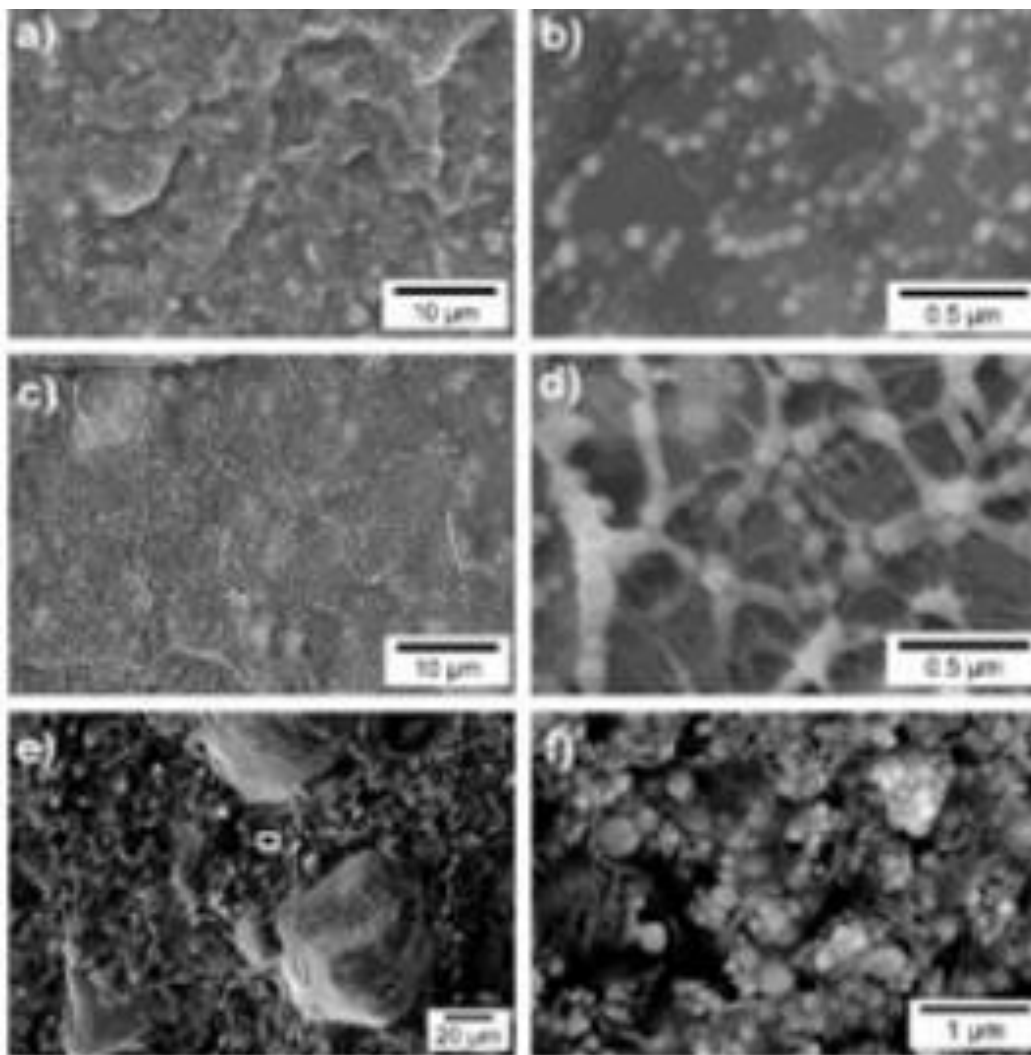
Ο έλεγχος απόκρισης με χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών δοκιμάστηκε σε ασάλινο πλαίσιο τεσσάρων ορόφων. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανακινούμενων τραπεζιών και οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές έδειξαν μέγιστο χρόνο απόκρισης που ήταν το ένα όγδοο των μη ελεγχόμενων περιπτώσεων για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτάχυνσης κάθε ορόφου [ 2 ]. Σε ένα άλλο σύνολο πειραμάτων, ένα καλώδιο μνήμης σχήματος φορτώθηκε μονότονα και επανειλημμένα σε τάση. Το μονοτονικό εφελκυστικό φορτίο και το επαναλαμβανόμενο εφελκυστικό φορτίο επέτρεψαν στους ερευνητές να υπολογίσουν τη μέγιστη καταπόνηση που σχετίζεται με τη βλάβη ενός δομικού μέλους από την ιδιότητα ηλεκτρικής αντίστασης του κράματος μνήμης σχήματος.



Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) ως συσκευές απαγωγής ενέργειας διατηρούν δυναμικό λόγω των υπερελαστικών χαρακτηριστικών τους. Το Nitinol SMA χρησιμοποιήθηκε σε ένα πείραμα κυκλικού φορτίου επειδή έχει σταθερή υστέρηση και καλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Αν και έχει την ικανότητα διάχυσης ενέργειας, έχει περιορισμένη ικανότητα διάχυσης και πρέπει να γίνουν περισσότερες εξελίξεις έως ότου τα κράματα μνήμης σχήματος γίνουν βιώσιμα και χρήσιμα σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού.

### Σύνθετα πολυμερή

Το Σχήμα 8 δείχνει μικρογραφίες SEM επιλεγμένων μιγμάτων πολυμερών. Οι ερευνητές στο Université de Lyon έχουν επικεντρωθεί στα αγωγή πολυμερή σύνθετα υλικά. Αυτά τα σύνθετα αποτελούν ένα θέμα ενδιαφέροντος για τις βιομηχανικές εφαρμογές τους σε συσκευές περιορισμού ρεύματος και αισθητήρες θερμοκρασίας. Η ομάδα διερεύνησε τρία πολυμερή: πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο και πολυ (m-ξυλενο αδιπαμίδιο).



Εικόνα 8. Μικρογραφίες SEM ομοιο- και ετερογενών πολυμερών μιγμάτων τριών πολυμερών με θραύση κατάψυξης

(α και β) HDPE (80%)+20%Ag

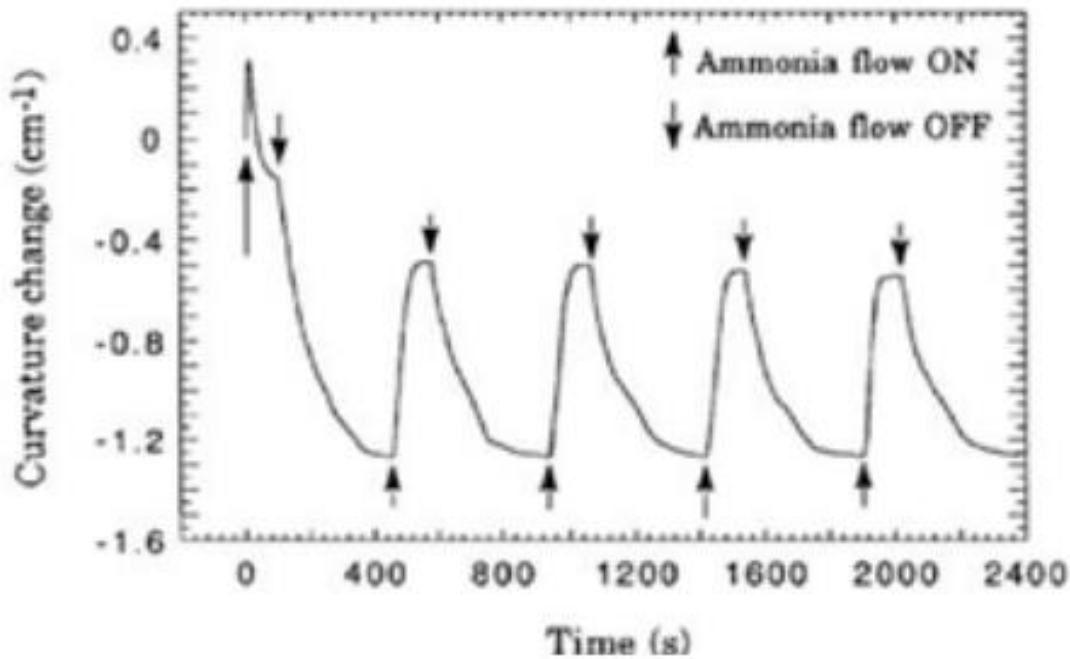
(γ και δ) ABT (80%)+20%Ag

(ε και στ) HDPE (33%)/PBT (47%)+20%Ag

Δημιουργήθηκαν ομοιογενή και ετερογενή μίγματα και το πληρωτικό στην ομοιογενή μήτρα εμφάνισε μια τάση να δημιουργεί αγωγή μονοπάτια λόγω της ομοιόμορφης κατανομής του. Το μίγμα ετερογενούς μήτρας HDPE/PBT και Ag απέδειξε την ανομοιογενή χωρική κατανομή του πληρωτικού που προκύπτει από το ότι το HDPE και το PBT είναι μη αναμίξιμα. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μη αναμίξιμα μίγματα πολυμερών μπορούν να προκαλέσουν μείωση κατά 2 φορές στο όριο διήθησης. Το σύνθετο υλικό HDPE/PBT-Ag αντιπροσώπευε 8,2 % κατ' όγκο σε σύγκριση με 17,4 % κατ' όγκο για τα μεμονωμένα εξαρτήματα και αυτό προκλήθηκε από την παρουσία του συν-συνεχούς δικτύου. Επιπλέον, η ειδική αντίσταση των πολυμερών ήταν σταθερή και χαμηλή σε θερμοκρασία δωματίου και αυξήθηκε πάνω από 10 τάξεις μεγέθους καθώς άλλαζαν από την αγωγή σε κατάσταση απομόνωσης, [12].

### **Συζευγμένα πολυμερή**

Το Σχήμα 9 απεικονίζει πώς ορισμένα συζευγμένα πολυμερή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της παρουσίας αερίων. Τα συζευγμένα πολυμερή είναι ένα άλλο έξυπνο υλικό ενδιαφέροντος για τις εφαρμογές τους ως αισθητήρες και ενεργοποιητές με αέρια. Ερευνητές στο Πανεπιστήμιο Linköping στη Σουηδία δημιούργησαν λωρίδες βιοπολυμερούς πλαστικοποιώντας ένα συζευγμένο πολυμερές με ένα στρώμα πολυμερούς υποστρώματος. Οι λωρίδες στερεώθηκαν στο ένα άκρο και το άλλο άκρο αφέθηκε να κινείται ελεύθερα και να αισθάνεται τα αέρια.

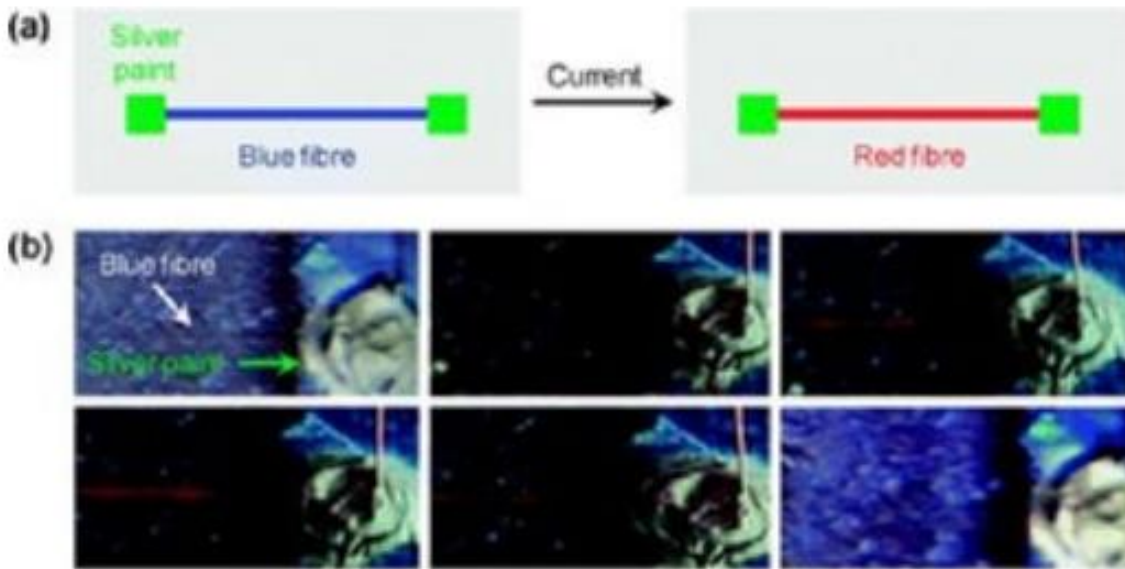


Εικόνα 9. Αλλαγή καμπυλότητας SEM μιας λωρίδας PPy/Au/PE με πρόσμιξη υπερχλωρικού ως απόκριση στη ροή αερίου αμμωνίας

Τα πειράματα έδειξαν ότι μια λωρίδα PPy/Au/PE (το PPy είναι πολυπυρρόλιο) ανιχνεύει αναστρέψιμα την αμμωνία απορροφώντας και εκροφώντας την και μετατρέπει άμεσα τις χημικές ενέργειες σε μηχανική ενέργεια. Επιπλέον, μια λωρίδα που χρησιμοποιεί πολυθεοφένιο (PT) αντί για PPy μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αίσθηση του ιωδίου. Ωστόσο, αρχικά υφίσταται συρρίκνωση πριν από τη διόγκωση και αυτή η διόγκωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους αλκυλ υποκαταστάτες των πολυμερών.

Η μέθοδος της δέσμης κάμψης έχει προσφέρει έναν νέο τρόπο για την εκμετάλλευση συζευγμένων πολυμερών ως νέους αισθητήρες και ενεργοποιητές λόγω της ικανότητάς τους να μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μέθοδος παρέχει επίσης έναν ευαίσθητο και αξιόπιστο τρόπο μέτρησης των επιτόπιων αλλαγών όγκου ή διαμορφωτικών αλλαγών σε συζευγμένα πολυμερή κατά τη διάρκεια του ντόπινγκ/αναίρεσης ή άλλων αλληλεπιδράσεων με αέρια [ 14 ].

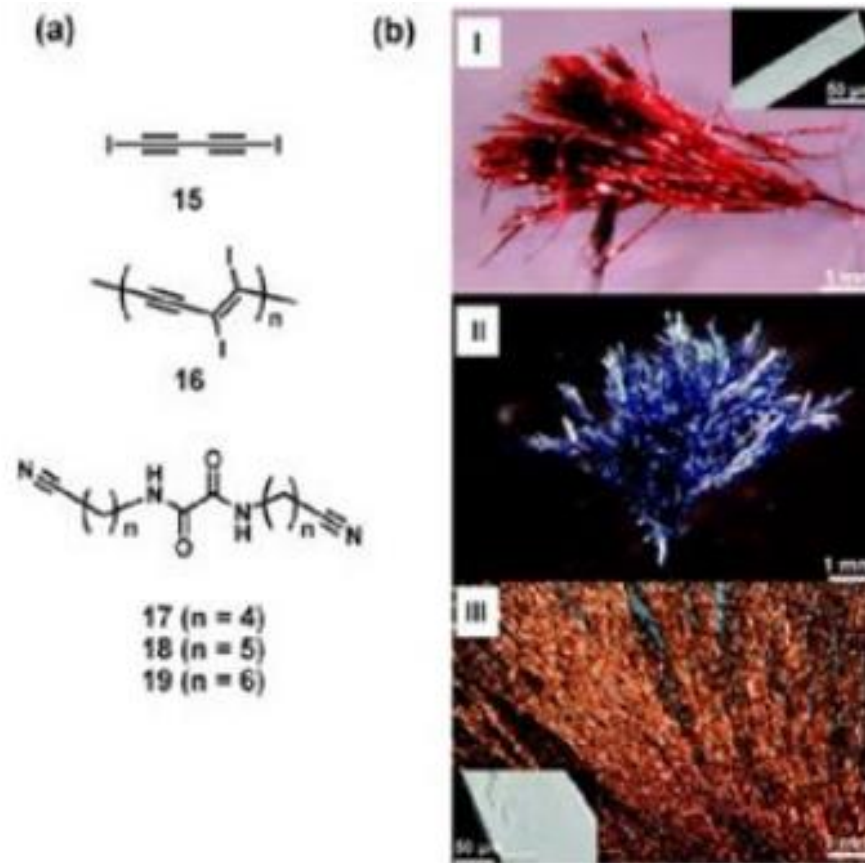
Η εμφάνιση ηλεκτροχρωμισμού στα PDA απεικονίζεται στο Σχήμα 10. Τα πολυδιακετυλένια (PDA) είναι συζευγμένα πολυμερή που έχουν μια ποικιλία δυνατοτήτων αίσθησης και ανίχνευσης. Αποτελούν σημαντικό ερευνητικό πεδίο λόγω των ενδιαφέρουσες οπτικές, φασματικές, ηλεκτρονικές και δομικές ιδιότητές τους. Οι δομικές ποικιλομορφίες των PDA έχουν προαναγγείλει σαφείς εφαρμογές σε πολλούς βασικούς τομείς και υπάρχει συνεχής ανακάλυψη νέων συνθέσεων PDA. Τα πολυδιακετυλένια έχουν ενδιαφέρουσες δομικές εκδηλώσεις όπως λιποσώματα, σωλήνες, ίνες, οργανικά/ανόργανα ενσωματωμένα υβρίδια και σύνθετες δομές. Τα PDA βρίσκονται επί του παρόντος σε ανάπτυξη ως βασικά στοιχεία αποτελεσματικών αισθητήρων, συστημάτων απεικόνισης και απεικόνισης [ 15 ].



Εικόνα 10. Απεικόνιση ηλεκτροχρωμισμού σε ίνα PDA που συνδέεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Η μπλε ίνα (πάνω-αριστερά) μετατρέπεται σε κόκκινη (πάνω-δεξιά) 1 δευτερόλεπτα μετά την ενεργοποίηση του ρεύματος. 2 δευτερόλεπτα μετά την απενεργοποίηση του ρεύματος (κάτω-αριστερά) η κόκκινη ίνα επιστρέφει στο μπλε (κάτω-δεξιά). Οι εικόνες αποκτήθηκαν με διαδοχικά βήματα 1 δευτερολέπτου

Εξετάζοντας τα PDA στην πρώτη διάσταση, οι ηλεκτροϊονοποιημένες ίνες που είναι ενσωματωμένες σε PDA εμφανίζουν διαφορετικές χρωματομετρικές αποκρίσεις κατά την έκθεση σε οργανικούς διαλύτες όπως η βενζίνη. Το PDA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας σε πραγματικό χρόνο για την ανίχνευση της ποιότητας της βενζίνης. Οι ερευνητές δημιούργησαν επίσης σύνθετα υλικά νανοσωλήνων άνθρακα-PDA για να εξετάσουν εάν το PDA μπορεί να παρουσιάσει ηλεκτροχρωμική συμπεριφορά εξερευνώντας την επικάλυψη νανοσωλήνων άνθρακα. Οι καθαρές δομές PDA έχουν πολύ χαμηλή αγωγιμότητα [ 15]. Η εφαρμογή ρεύματος στις σύνθετες δομές παράγει αναστρέψιμες χρωματικές μεταβάσεις, κάτι που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή οι δομές PDA είναι γνωστό ότι εμφανίζουν μη αναστρέψιμες θερμοχρωμικές αλλαγές. Η απόκριση των σύνθετων PDA/CNT σε διάφορα ερεθίσματα όπως θερμότητα, μηχανική τριβή και χημικές οργανικές ενώσεις στην ίδια μελέτη δείχνει τη δυνατότητα χρήσης σύνθετου υλικού ως ενεργού υλικού για αισθητήρες και ενεργοποιητές [ 16 ].

Το Σχήμα 11 δείχνει πώς τα δισδιάστατα PDA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οπτική παρακολούθηση της κατανομής θερμότητας. Τα δισδιάστατα PDA αποδεικνύονται ότι είναι μια απλή και αποτελεσματική εφαρμογή για την παρακολούθηση της θερμικής κατανομής και των σημείων πολλαπλών αστοχιών που προέρχονται από θερμότητα σε λειτουργικές συσκευές απαγωγής θερμότητας, όπως συσκευές ημιαγωγών λειτουργίας. Ακόμη πιο ανώτερα είναι τα τρισδιάστατα PDA λόγω της αυξημένης επιφάνειας και των θέσεων αλληλεπίδρασης πολλαπλών σημείων για εφαρμογή αισθητήρα [ 17 ].



Εικόνα 11. Απεικόνιση πολυδιάστατου PDA (α) Μοριακές δομές του PDA 16, του προδρόμου του δι-ιδιοβουταδινίου 15 και των βασικών μορίων ξενιστή Lewis (β) Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου συν-κρυστάλλων που παρασκευάζονται από τις αλληλεπιδράσεις 15 με 17 μόρια ξενιστή (I), 18 (II) και 19 (III)

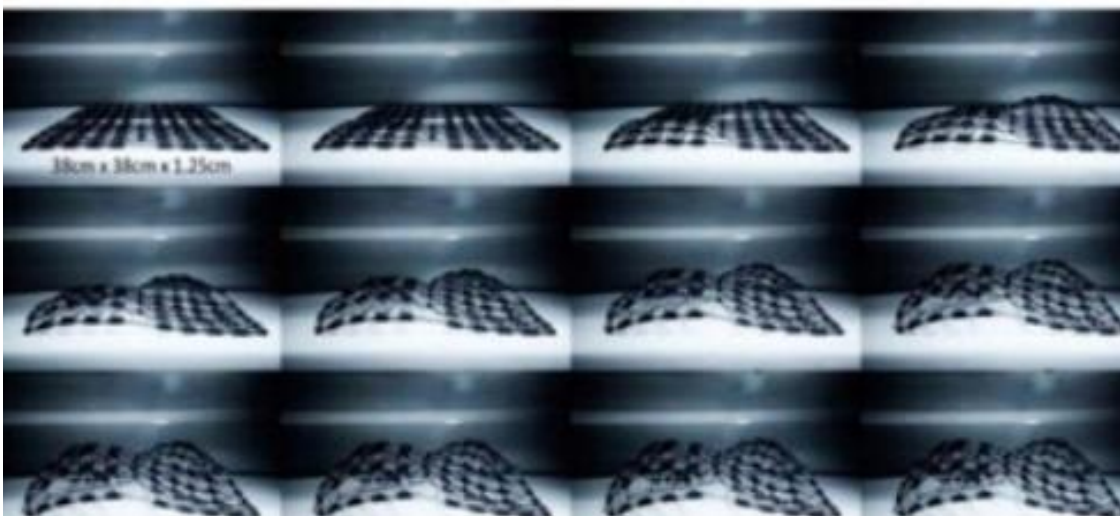
Μια άλλη ομάδα ανέπτυξε μια μέθοδο παρασκευής κρυστάλλων PDA και όλοι οι αναπτυγμένοι κρύσταλλοι αρχικά εμφάνιζαν μπλε χρώμα μετά τη σύνθεση αλλά άλλαξαν χρώμα μετά από μια εβδομάδα σε θερμοκρασία δωματίου, ανάλογα με το μήκος των πλευρικών αλυσίδων των υλικών ξενιστών [ 18 ]. Παρατηρήθηκε ότι οι τρισδιάστατοι σχηματισμοί μπορούν να παρέχουν ένα σαφές πλεονέκτημα στη βελτίωση της επιφάνειας για εφαρμογές ανίχνευσης, ενώ τα φιλμ 2-D μπορούν να παρέχουν ανώτερες επικαλύψεις επιφανειών για τεχνολογίες απεικόνισης και απεικόνισης.

Υπάρχει ακόμη ένα εμφανές κενό στην πλατφόρμα αισθητήρων και στις τεχνολογίες οθόνης που επιδεικνύονται σε εργαστηριακό επίπεδο και σε πρακτικές συσκευές που βασίζονται σε PDA που χρησιμοποιούνται σε καθημερινές εφαρμογές. Ωστόσο, τα PDA χρησιμοποιούνται ήδη σε εφαρμογές όπως η ανίχνευση μόλυνσης της βενζίνης και των Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (VOC), ως ανιχνευτές κατανομής θερμοκρασίας, για ανάλυση αστοχιών ηλεκτρονικών συσκευών και ως πρόδρομοι μελανιού σε εφαρμογές επικύρωση/επικύρωσης ταυτότητας. Οι μελέτες σχετικά με τον ηλεκτροχρωμισμό και τον

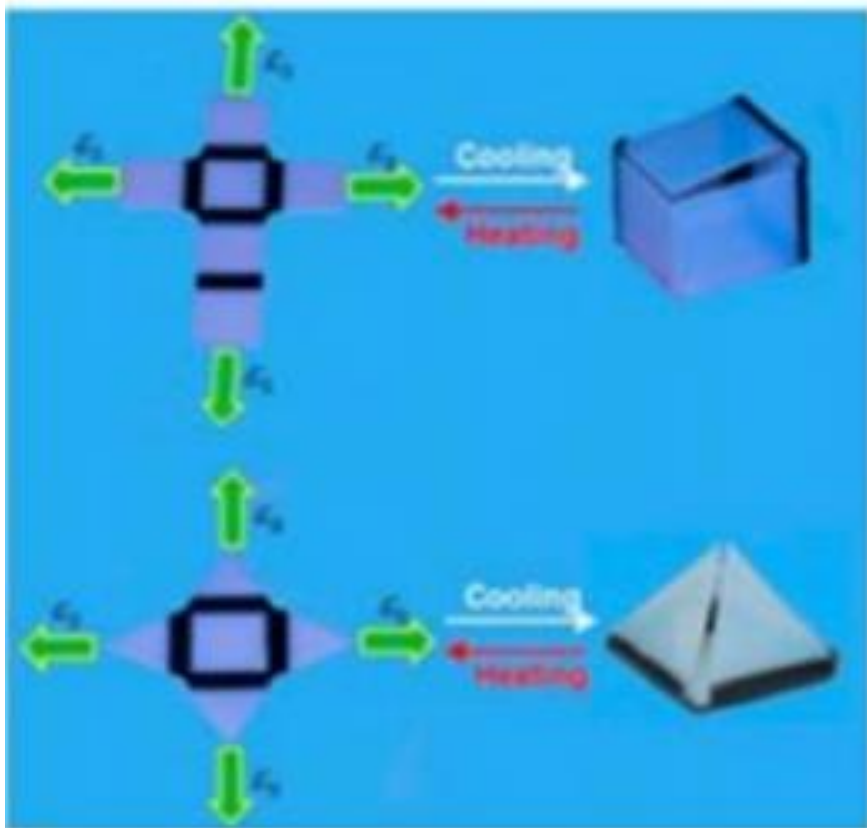
μαγνητοχρωμισμό των PDA βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο, αλλά πιστεύεται ότι τα PDA θα βρουν πολλές νέες χρήσεις σε επιστημονικές και μηχανικές εφαρμογές [ 16 ].

### Τρισδιάστατη εκτύπωση

Τα σχήματα 12 και 13 απεικονίζουν τη συμπεριφορά τάνυσης και αναδίπλωσης ορισμένων τρισδιάστατων εκτυπωμένων υλικών. Η Σχολή Μηχανολόγων και Αεροδιαστημικής Μηχανικής (MAE), το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Nanyang (NTU) και το Ινστιτούτο Αθλητικής Έρευνας (NTU) ερευνούν την κατασκευή προσθέτων, κοινώς γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση έξυπνων υλικών και δομών [ 5 ]. Τα 4D τυπωμένα έξυπνα υλικά είναι κομμάτια που κατασκευάζονται με πρόσθετα με την ικανότητα να ανταποκρίνονται σε εφαρμοζόμενα εξωτερικά ερεθίσματα αλλάζοντας το σχήμα ή τις ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου. Οι διεργασίες παραγωγής πρόσθετων που δεν παρουσιάζουν συμπεριφορές όπως αυτοανίχνευση, αυτοενεργοποίηση ή αλλαγή σχήματος θεωρούνται μη έξυπνες. Γίνεται έρευνα στην πρόσθετη κατασκευή έξυπνων νανοσύνθετων υλικών, υλικών μνήμης σχήματος, αυτοεξελισσόμενων δομών και ενεργοποιητών.



Εικόνα 12. Σύνθετο δισδιάστατο στοιχείο πολλαπλών υλικών που παρουσιάζει τέντωμα και δίπλωμα



Εικόνα 13. Ενεργό κουτί origami και σχήματα πυραμίδας πριν και μετά το αυτοδιπλούμενο

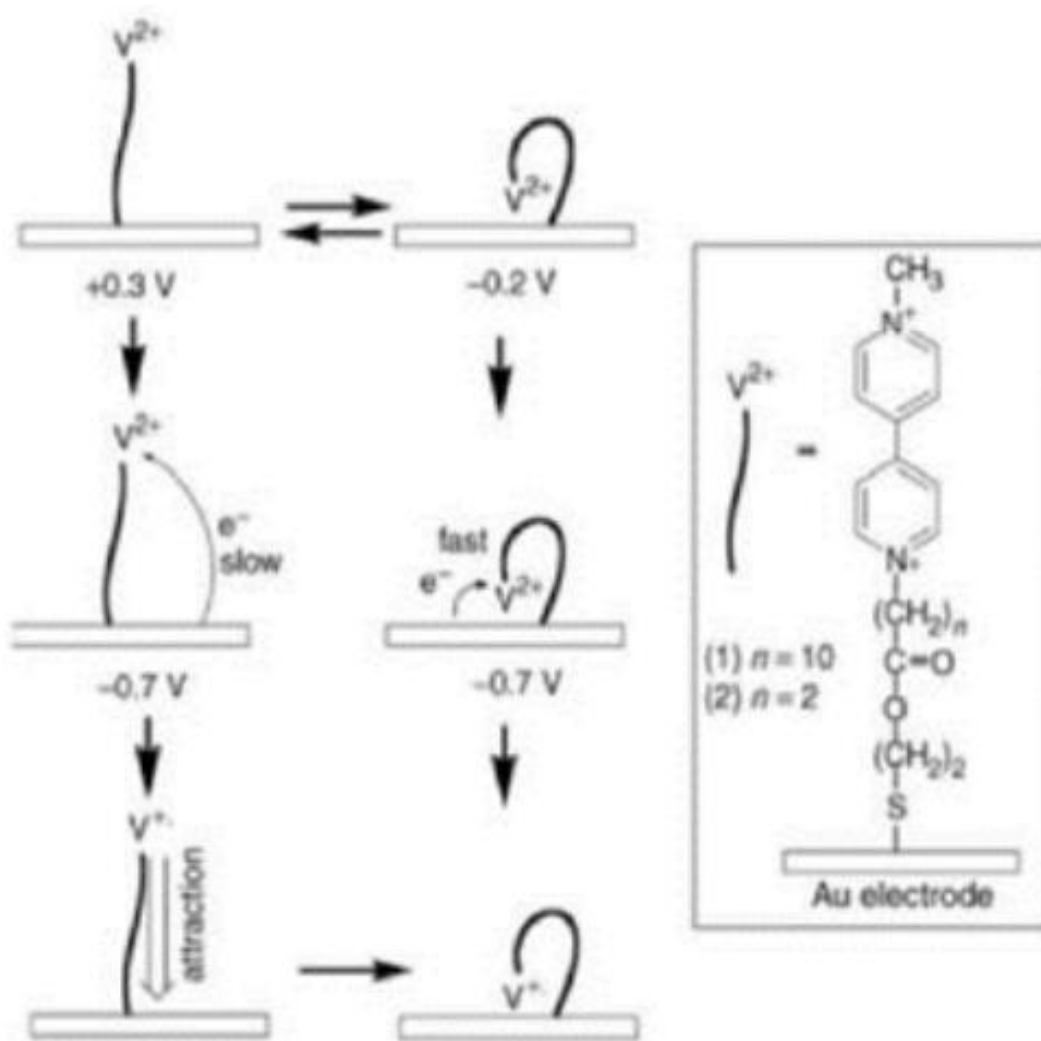
Υπάρχουν επίσης πολλές τεχνολογίες που είναι ήδη διαθέσιμες για την κατασκευή προσθέτων. Η εκτύπωση με εκτόξευση μελάνης είναι παρόμοια με την εκτύπωση με έγχυση μελάνης, η τεχνολογία Selective Laser Melting (SLM) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης με βάση τη σκόνη που χρησιμοποιεί λέιζερ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για να λιώσει στρώματα μεταλλικής σκόνης προκειμένου να δημιουργήσει μια πυκνή και ομοιογενή τρισδιάστατη μεταλλική δομή. Μια άλλη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης, η Digital Projection Printing (DPP) προσφέρει υψηλή ανάλυση, αναπαραγωγιμότητα και ακρίβεια. Η 4D εκτύπωση έχει ορισμένους περιορισμούς επί του παρόντος και αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως περιορισμοί τεχνολογίας, υλικού και σχεδιασμού. Η 4D εκτύπωση πολλαπλών έξυπνων υλικών ή ένας συνδυασμός έξυπνων υλικών και συμβατικών υλικών απαιτεί γνώση σχεδιασμού, γνώση υλικού και γνώση διαδικασίας. Μια άλλη μοντέρνα έρευνα στην κατασκευή προσθέτων είναι η 4D bio printing.<sup>8 , 19 ]</sup>.

### Βιοϋλικά και βιοτεχνολογία

Το Σχήμα 14 απεικονίζει πώς μπορεί να επιτευχθεί και να χρησιμοποιηθεί η μοριακή κίνηση χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό δυναμικό. Η πρόσφατη πρόοδος σε διάφορους τομείς της βιοτεχνολογίας, όπως σε διάφορους τομείς της βιοτεχνολογίας, όπως η μικρορευστοποίηση, η μηχανική ιστών και η κυτταρική



βιολογία, έχει δημιουργήσει μεγάλη ζήτηση για υποστρώματα που μπορούν να υποστούν καθορισμένη αναδιαμόρφωση με το χρόνο. Ως αποτέλεσμα, η τελευταία έρευνα σε υλικά με δυναμικά ελεγχόμενες ιδιότητες επιφάνειας οδήγησε σε μια ποικιλία νέων έξυπνων σχεδίων επιφανειών [ 20 ]. Η εναλλαγή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορα μέσα: ηλεκτροχημικές προσεγγίσεις, φωτοεπαγωγή, αλλαγή θερμοκρασίας ή pH, μηχανικοί έλεγχοι και ηλεκτροκίνητη διαμόρφωση.



Εικόνα 14. Μοριακή κίνηση που προκαλείται από δυνάμεις λόγω της οξειδοαναγωγικής αντίδρασης μιας μονοστιβάδας διπυριδινίου σε ένα ηλεκτρόδιο χρυσού

Τα τρέχοντα «βιομιμητικά» υλικά έρχονται σε αντίθεση με προηγούμενες εκδόσεις βιολογικών υλικών που δεν είχαν την ικανότητα να υποστούν καθορισμένη αναδιαμόρφωση με το χρόνο. Θα απαιτούνται έξυπνα σχέδια επιφανειών κατά τη μίμηση της προσέγγισης της φύσης για δυναμικά ελεγχόμενο σχηματισμό ιστών και διαφοροποίηση των κυττάρων. Αυτά τα δυναμικά ελεγχόμενα υποστρώματα μπορεί τελικά να οδηγήσουν σε νέα βιοϋλικά με μοναδικές δομές και βιολογικές λειτουργίες. Οι πιθανές εφαρμογές των έξυπνων επιφανειών μπορεί να περιλαμβάνουν υποστρώματα για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων



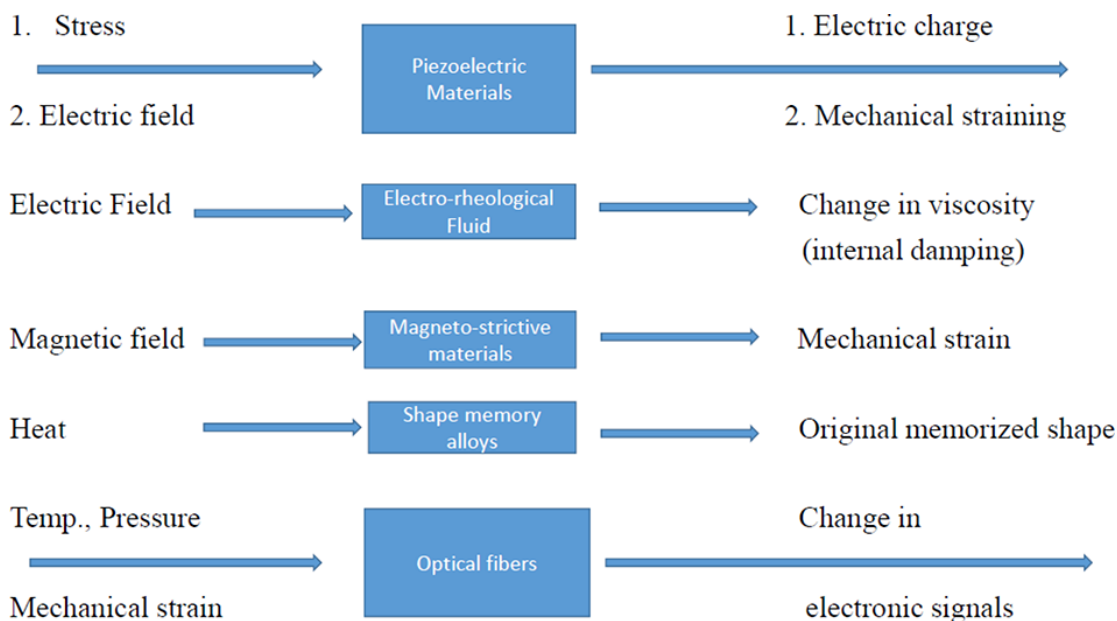
κυττάρου/κυττάρου και κυττάρου/πρωτεΐνης, επαναφορτιζόμενες επιφάνειες πλατφόρμας για βιοαισθητήρες με ρυθμιζόμενο δυναμικό εύρος, λειτουργικές μονάδες σε μικρορευστικές συσκευές (π.χ. βαλβίδες ή δεξαμενές) και έξυπνα ικρίωματα για μηχανική ιστών [ 20]. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη δημιουργία βιοϋλικών σχετίζεται με την ακριβή πρόβλεψη του σχηματισμού αυτοσυναρμολογούμενων δομών μεγάλης κλίμακας. Με την έλευση των βασικών τεχνολογικών προόδων στην απεικόνιση, τα πεπτίδια άρχισαν πρόσφατα να αξιοποιούνται για την πιθανή χρήση τους ως βιοϋλικά, όπως νημάτια και ινίδια, υδρογέλες, επιφανειοδραστικά και πεπτιδικά υβρίδια [ 21 ]. Τα πεπτίδια προσφέρουν ελκυστικά χαρακτηριστικά, κυρίως λόγω της λεπτομερούς κατανόησής μας για την ικανότητά τους να αναδιπλώνονται σε συγκεκριμένες δομές και την πλούσια χημεία με την οποία η δομή και η λειτουργία τους μπορούν να χειριστούν για περιβαλλοντική απόκριση [ 22 , 23 ].

Τα πεπτίδια προσφέρουν πολλές δυνατότητες και έχουν ευνοϊκές ιδιότητες όπως βιοσυμβατότητα, ανοσογονικότητα και βιοαποδομησιμότητα, τα οποία τα μετατρέπουν σε μη τοξικά απόβλητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πυρήνων και την καθοδήγηση της ανάπτυξης ορυκτών, ως ικρίωματα για την αναγέννηση των ιστών, συμπεριλαμβανομένης της επισκευής του χόνδρου και της προώθησης της ανάπτυξης των νευρικών κυττάρων. Έχουν τη δυνατότητα για ελαχιστοποιημένα ηλιακά κύτταρα, οπτικές συσκευές, ηλεκτρονικές συσκευές και για την ανάπτυξη μοριακών μηχανών ή ρομπότ που μπορούν να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν ως απόκριση σε ένα σήμα [ 21 ].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ

### 4.1. Εισαγωγή

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ο αριθμός των επιβατών θα διπλασιαστεί περίπου το 2036. Συνολικά 7,8 δισεκατομμύρια ετησίως σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών. Για να ολοκληρωθεί αυτή η απαίτηση, η αεροδιαστημική βιομηχανία υποτίθεται ότι καταβάλλει μεγάλες προσπάθειες συνεχώς. Τον Ιούλιο του 2018, η Airbus προέβλεψε την ανάγκη για περίπου 37.400 νέα αεροσκάφη με κόστος 5,8 τρισεκατομμυρίων δολαρίων τα επόμενα 20 χρόνια (Ματθαίος, 2018). Για έναν τόσο τεράστιο αριθμό επιβατών και τη ζήτηση για το αεροσκάφος, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για προηγμένη τεχνολογία για να καλύψει τις απαιτήσεις οικονομικά με ασφάλεια. Ανάμεσα στα διάφορα μέρη/εξαρτήματα των αεροδιαστημικών βιομηχανιών, το υλικό είναι ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά. Πολλοί τύποι υλικών χρησιμοποιούνται στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες, αλλά τα έξυπνα υλικά κερδίζουν συνεχώς σημασία λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Βασικά, τα έξυπνα υλικά είναι συστατικά νέας γενιάς που υπερβαίνουν τα συμβατικά λειτουργικά και δομικά υλικά. Αυτά τα υλικά ονομάζονται έξυπνα λόγω της αυτοανίχνευσης, της αυτοπροσαρμογής, των δυνατοτήτων μνήμης και των πολλαπλών λειτουργιών τους (Ritter, 2007). Τα χαρακτηριστικά αυτοπροσαρμογής των έξυπνων υλικών έχουν μεγάλη αξία για την ενσωμάτωση των προσαρμογών των έξυπνων υλικών. Σήμερα, υπάρχει μεγάλη ζήτηση για τα έξυπνα υλικά σε διάφορες βιομηχανίες λόγω των δυνατοτήτων τους να αλλάζουν τις φυσικές ιδιότητες με ακριβή τρόπο ως αντίδραση στην αλλαγή των περιβαλλοντικών παραγόντων (ανταποκρίσεις ερεθισμάτων). Αυτοί οι παράγοντες είναι η θερμοκρασία, το στρες, τα μαγνητικά πεδία, οι χημικές ουσίες, ο ηλεκτρισμός, η πυρηνική ακτινοβολία, η οξύτητα και η υδροστατική πίεση. Οι αλλαγές μπορεί να είναι στο μέγεθος και το σχήμα των αντικειμένων, την ακαμψία, τον περιορισμό και το ιξώδες (Schwartz, 2002). Όλες αυτές οι αλλαγές είναι υπεύθυνες για την παροχή των διαφόρων απαραίτητων λειτουργιών των έξυπνων υλικών σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα κοινά έξυπνα υλικά και οι σχετικές αποκρίσεις ερεθίσματος φαίνονται στο Σχήμα 1.



Εικόνα 15. Τα κοινά έξυπνα υλικά και οι σχετικές αποκρίσεις ερεθισμάτων

Τα έξυπνα υλικά ονομάζονται επίσης έξυπνα λόγω της πνευματικής τους απόδοσης κατά τις περιβαλλοντικές παραλλαγές. Η ευφυΐα αυτών των υλικών έγκειται στα γεγονότα των πολλαπλών εφαρμογών στη δομική, αεροδιαστημική, βιονική, μηχανική και περιβαλλοντική μηχανική (Bashir, 2017· Addington and Daniel, 2005). Επιπλέον, αυτά τα υλικά μπορούν να ανιχνεύσουν τα σφάλματα και τις ρωγμές και λειτουργούν ως διαγνωστικά εργαλεία και, κατά συνέπεια, ικανότητες αυτοεπιδιόρθωσης - που ονομάζεται αποτέλεσμα αυτοεπιδιόρθωσης. Στην αεροδιαστημική μηχανική, οι περισσότερες από τις εφαρμογές πραγματοποιούνται σε ανοιχτό περιβάλλον με έκθεση σε διάφορες αλλαγές και, ως εκ τούτου, τα έξυπνα υλικά κερδίζουν μεγάλη προσοχή στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει μεγάλη ζήτηση για έξυπνα υλικά, σχετικές δομές και όργανα στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Πραγματοποιήθηκε διεξοδική έρευνα της βιβλιογραφίας και δεν βρέθηκε άρθρο σχετικά με την πρόοδο των έξυπνων υλικών στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες κατά την τελευταία δεκαετία. Συνειδητοποιήθηκε επίσης ότι υπάρχουν κάποιες πρόοδοι στα έξυπνα υλικά στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες τα τελευταία χρόνια. Ως εκ τούτου, καταβάλλονται προσπάθειες για τη συγγραφή ενός άρθρου για τις τελευταίες εξελίξεις και εφαρμογές των έξυπνων υλικών στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Αυτό το άρθρο περιγράφει την ταξινόμηση, την αρχή λειτουργίας, τις εφαρμογές, τις πρόσφατες εξελίξεις (νανο-έξυπνα υλικά) και τις μελλοντικές προοπτικές. Σίγουρα, αυτό το άρθρο θα είναι πολύ χρήσιμο για ακαδημαϊκούς, ερευνητές και τεχνοκράτες που εργάζονται στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες.

## 4.2. Ταξινόμηση έξυπνων υλικών

Η ταξινόμηση των έξυπνων υλικών βασίζεται στις ιδιότητές τους. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες που αξιοποιούνται είναι θερμικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές κ.λπ. Τα έξυπνα υλικά ταξινομούνται σύμφωνα με τις προσεγγίσεις των Addington, Schodek και Ritter. Αυτά τα υλικά ταξινομούνται με βάση τις αλλαγές που συμβαίνουν στο σχήμα, τη φάση, το χρώμα, την ενέργεια, την ύλη, την πρόσφυση και τη ρεολογία. Δεν είναι δυνατό να συζητήσουμε την ταξινόμηση όλων αυτών των υλικών, αλλά τα πιο σημαντικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες συζητούνται εν συντομία.

#### **4.2.1. Πιεζοηλεκτρικά υλικά**

Αυτά είναι τα υλικά που αντιδρούν στην αλλαγή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Αυτά είναι σχετικά γραμμικά σε χαμηλά πεδία και διπολική (θετική και αρνητική τάση) που εμφανίζει υστέρηση. Τα υλικά αυτά είναι πολυμερικών και κεραμικών τύπων. Αυτά έχουν ιδιότητες μεγάλου εύρους ζώνης, ηλεκτρομηχανικής απόκρισης, υψηλής παραγωγικής δύναμης και σχετικά χαμηλής ισχύος απαιτήσεις. Αυτά τα υλικά υφίστανται μηχανικές αλλοιώσεις κατά την αλλαγή του ηλεκτρικού πεδίου (Εικόνα 2). Αυτά παράγουν τάσεις όταν ασκείται πίεση. Αντίθετα, εάν εφαρμόζεται τάση, δημιουργείται τάση στα υλικά. Κατά συνέπεια, μια κατασκευή από αυτά τα υλικά μπορεί να λυγίσει, να διασταλεί και να διπλωθεί εφαρμόζοντας τάση. Αυτά έχουν καλές εφαρμογές στις μαγνητικές κεφαλές, τις συσκευές οπτικής παρακολούθησης, τους εκτυπωτές dot-matrix, τα στερεοφωνικά ηχεία υψηλής συχνότητας, τα πληκτρολόγια υπολογιστών, τα μικρόφωνα, τους μετατροπείς, τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές και τους αναφλεκτήρες για ψησταριές αερίου. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα πιεζοκεραμικά (π.χ. τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος [PZT]), ο νιοβικός εστέρας μαγνησίου και το πολυμερές φθοριούχο πολυβινυλιδένιο. Τα άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα σύνθετα υλικά  $PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$ -PZT,  $Bi_4Ti_3O_{12}$ -BiT και PZT-BiT. Αυτά παρουσιάζονται συχνά σε λεπτά φύλλα και μπορούν εύκολα να αγκυρωθούν ή να στερεωθούν στις σύνθετες δομές ή να φορτωθούν για να σχηματίσουν ξεχωριστούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές.

#### **4.2.2. Μαγνητοσυσταλτικά υλικά**

Αυτά είναι τα υλικά που αντιδρούν ενάντια στην αλλαγή στις μαγνητικές ιδιότητες. Αυτά τα υλικά είναι μονοπολικά και μη γραμμικά, παρουσιάζοντας κάποια υστέρηση αλλά μικρότερη από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Αυτά τα υλικά υφίστανται μηχανική καταπόνηση και λειτουργούν ως ενεργοποιητές και αισθητήρες. Αυτά τα υλικά παράγουν χαμηλές παραμορφώσεις και μέτριες δυνάμεις σε ποικίλο εύρος συχνοτήτων. Αυτά είναι τα καλύτερα υλικά για τους ενεργοποιητές λόγω του απαιτούμενου πηνίου και της μαγνητικής διαδρομής επιστροφής. Γενικά, αυτά τα υλικά περιέχουν αισθητήρες και ενεργοποιητές και είναι από νικέλιο, σίδηρο και κοβάλτιο. Εν συντομία, αυτά τα υλικά λειτουργούν ως μόνιμες μαγνητικές ράβδοι. Οι

κύριες εφαρμογές αυτών των υλικών περιλαμβάνουν κινητήρες και υδραυλικούς ενεργοποιητές και μορφοτροπείς σόναρ υψηλής ισχύος μικρής συχνότητας. Το πιο γνωστό μαγνητοσυσταλτικό υλικό είναι η Terfenol-D, η οποία επιμηκύνεται όταν εκτίθεται στο μαγνητικό πεδίο.

#### **4.2.3. Υλικά που ανταποκρίνονται στη θερμότητα**

Αυτά είναι τα υλικά που αντιδρούν στην αλλαγή της θερμοκρασίας. Αυτά τα υλικά ονομάζονται επίσης ως ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Γενικά, αυτά είναι πολυμερή και παρουσιάζουν ένα κενό αναμειξιμότητας στο διάγραμμα θερμοκρασίας-σύστασης τους. Αυτά τα υλικά είναι πολυμερή με μνήμη σχήματος και κράματα μνήμης σχήματος (SMA) και μπορούν να αλλάξουν σε διαφορετικά σχήματα με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Το Nitinol είναι ένα κράμα νικελίου και τιτανίου και λειτουργεί ως αντιδιαβρωτικό συγκρίσιμο με το ανοξείδωτο χάλυβα. χρήσιμο για πολλές εφαρμογές. Οι κύριες εφαρμογές τέτοιων τύπων κραμάτων είναι σε σούπερ ελαστικούς σκελετούς γυαλιών και θερμοστάτη hot-pot. Οι κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν θερμοστάτη, αεροσκάφη, αμορτισέρ, σπασίματα και αποσβεστήρες αυτοκινήτου.

#### **4.2.4. Σχηματισμός κραμάτων μνήμης**

Τα SMA είναι τα υλικά που ανήκουν στην κατηγορία υλικών που ανταποκρίνονται στη θερμότητα. Αυτά τα υλικά αντιδρούν στην απόκριση στη θερμοκρασία. Αλλάζουν τα σχήματα με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Παραμορφώνονται στις μαρτενιτικές τους συνθήκες και ανακτούν το αρχικό τους σχήμα στις συνθήκες ωστενίτη όταν θερμαίνονται. Το αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι οι μεγάλες αλλαγές στο μέτρο ελαστικότητας κατά τη θέρμανση πάνω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, δηλαδή δύο έως τέσσερις φορές την τιμή χαμηλής θερμοκρασίας. Μια ποικιλία κραμάτων έχει βρεθεί ότι δείχνει αυτό το αποτέλεσμα με επαναλαμβανόμενες θερμικές επεξεργασίες. Παραδείγματα είναι η νιτινόλη (κράμα Ni-Ti), NiTiCu, CuAlNi, CuZnAl, Fe-Pt και Au-Cd. Στη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ορισμένες εταιρείες άρχισαν να παράγουν υλικά Ni-Ti, τα διάφορα εξαρτήματα και πολλά άλλα προϊόντα (DesRoches, 2002). Αυτά είναι τα καλύτερα υλικά για την κατασκευή ενεργοποιητών λόγω της δυνατότητας επίτευξης μεγάλων μετατοπίσεων και δυνάμεων διέγερσης. Αυτά τα υλικά είναι διαθέσιμα στα τυπικά αποθέματα συρμάτων, ράβδων, σωλήνων, ελατηρίων, λωρίδων και φύλλων.

#### **4.2.5. Ηλεκτροσυσταλτικά υλικά**

Αυτά είναι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αλλά οι μηχανικές αλλαγές είναι ευθέως ανάλογες με το τετράγωνο του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτά είναι επίσης πολύ ευαίσθητα στη θερμοκρασία αλλά παρουσιάζουν μικροσκοπική υστέρηση. Σε αυτά τα υλικά οι εξαρθρώσεις είναι πάντα στην ίδια κατεύθυνση. Το πιο σημαντικό παράδειγμα είναι το νιοβικό μαγνήσιο. Απαιτεί ένα ηλεκτρικό πεδίο για να προκαλέσει επαγόμενη τάση και έχει την ίδια ικανότητα επαγόμενης τάσης με τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Αυτά είναι διαθέσιμα με τη μορφή στοίβων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν εύκολα οποιαδήποτε συσκευή.

#### **4.2.6. Ρεολογικά υλικά**

Αυτά είναι υγρά υλικά που αντιδρούν στην αλλαγή των ηλεκτρικών ή μαγνητικών ή και των δύο ιδιοτήτων. Αυτά ονομάζονται επίσης ηλεκτρορεολογικά ρευστά και μαγνητορεολογικά ρευστά σύμφωνα με τις αλλαγές λόγω της αλλαγής στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Οι αντιδράσεις αυτών των υλικών έναντι των ερεθισμάτων είναι πολύ γρήγορες. Οι αλλαγές είναι στη δυναμική των υγρών και στερεών φάσεων. Οι κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν αμορτισέρ, σπασίματα και αποσβεστήρες αυτοκινήτου.

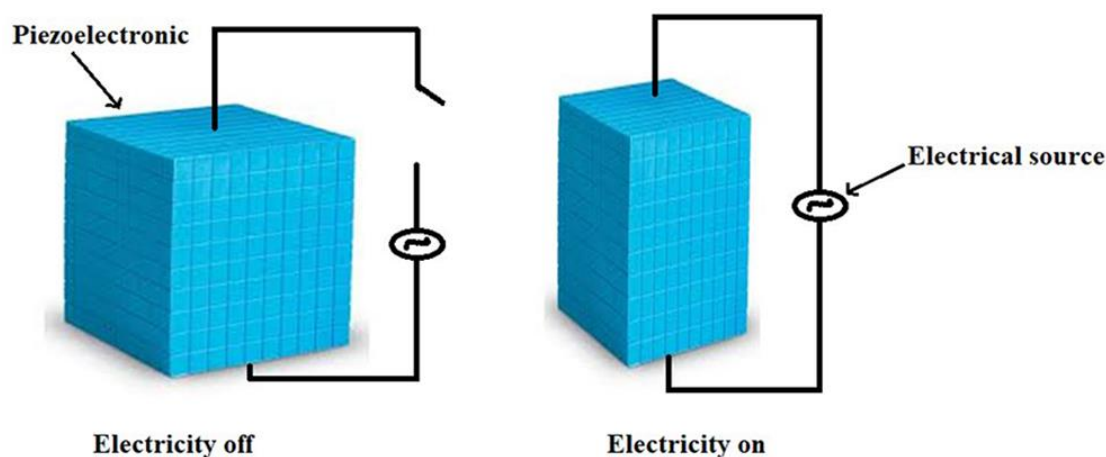
#### **4.2.7. Φωτοχρωμικά υλικά**

Αυτά είναι τα υλικά που αντιδρούν στην αλλαγή των οπτικών ιδιοτήτων. Οι κύριες εφαρμογές περιλαμβάνουν οθόνες υγρών κρυστάλλων, μπαταρίες λιθίου και άλλες ηλεκτροχρωμικές συσκευές. Τα σημαντικότερα φωτοχρωμικά υλικά είναι τα σπειροπυράνια, τα ναφθοπυράνια, οι σπειροξαζίνες, τα χρωμένα, οι σπειροδιϋδροϊνδολιζίνες, οι φουλγίδες, τα διαρυλαιθένια, η βακτηριοροδοψίνη και οι αζω ενώσεις. Οι διάφοροι τύποι έξυπνων υλικών με είσοδο και έξοδο δίνονται στον Πίνακα 1.

### **4.3. Εργασία στα έξυπνα υλικά**

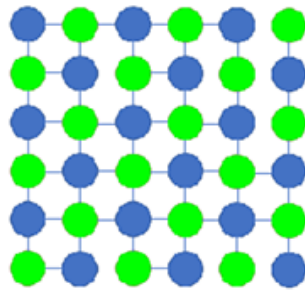
Ουσιαστικά, τα έξυπνα υλικά δρουν ενάντια σε ορισμένες επιδράσεις όπως ο ηλεκτρισμός, η πίεση, η θερμοκρασία, το φως, τα μαγνητικά πεδία, η οξύτητα και τα μηχανικά φορτία. Οι αποκρίσεις των έξυπνων υλικών παρατηρούνται ως προς την αλλαγή στο σχήμα, το ιξώδες, τη σύνθεση, το χρώμα κ.λπ. Βασικά, οι έξυπνες δομές περιλαμβάνουν πέντε βασικά στοιχεία, δηλαδή δομικό υλικό, καταναμημένους αισθητήρες και ενεργοποιητές, ηλεκτρονικά κλιματισμού ισχύος και στρατηγικές ελέγχου. Αυτά τα υλικά λειτουργούν αλλάζοντας τις φυσικές τους ιδιότητες. Η πρώτη έξυπνη παρατήρηση μετασχηματισμού υλικού καταγράφηκε το 1932 σε χρυσό-κάδμιο. Αργότερα, οι Hodgson και Brown (2000) παρατήρησαν το

φαινόμενο μετασχηματισμού και μνήμης σχήματος σε κράμα νικελίου-τιτανίου στο Naval Ordnance Laboratory.

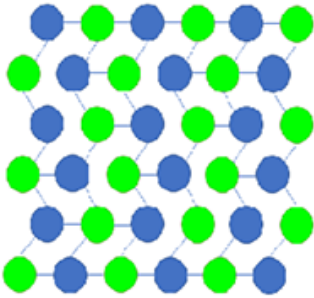


Εικόνα 16. Πιεζοηλεκτρικό υλικό που δείχνει την ανταλλαγή ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας

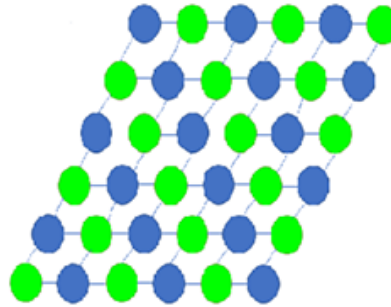
Βασικά, τα υλικά μπορεί να υπάρχουν σε δύο διαφορετικές φάσεις σε διάφορες θερμοκρασίες. Αυτοί είναι ο ωστενίτης (υπάρχει σε υψηλή θερμοκρασία) και ο μαρτενσίτης (υπάρχει σε χαμηλή θερμοκρασία). Αυτές οι δύο φάσεις μετασχηματίζονται η μία στην άλλη στην εξωτερική θερμοκρασία ή μεταβάλλεται η κατάσταση τάσης. Εξάλλου, ο μαρτενσίτης υπάρχει σε δύο διαφορετικές μορφές, δηλαδή διδυμοποιημένο και αποσυνδεδεμένο (Εικόνα 3). Τα έξυπνα υλικά παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια των μετασχηματισμών. Αυτά είναι το εφέ υπερ-ελαστικότητας, το εφέ μνήμης σχήματος και το εφέ μνήμης αμφίδρομης κατεύθυνσης. Τα υλικά υπερ-ελαστικότητας έχουν επίσης κάποιες άλλες σημαντικές ιδιότητες, όπως υστερητική απόσβεση, εξαιρετικές ιδιότητες κόπωσης, πολύ αξιόπιστη ικανότητα απαγωγής ενέργειας μέσω επαναλαμβανόμενης μετατροπής φάσης και καλή αντοχή στη διάβρωση. Ο ωστενίτης εμφανίζεται σε χαμηλή τάση ενώ μετατρέπεται σε αποσυνδεδεμένο μαρτενσίτη σε υψηλή καταπόνηση. Το σχήμα 4(α) απεικονίζει μια συνήθη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης έξυπνων υλικών σε αυτές τις δύο φάσεις. Το σχήμα 4(β) απεικονίζει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης των συνηθισμένων αλλαγών φάσης έξυπνων υλικών υπερ-ελαστικότητας υπό πίεση. Το ανώτερο οροπέδιο παρουσιάζει μεταβολή της πίεσης από ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ενώ το κάτω πλάτωμα δείχνει το αντίστροφο φαινόμενο με απελευθέρωση πίεσης. Τα υλικά υπερ-ελαστικότητας έχουν επίσης κάποιες άλλες σημαντικές ιδιότητες όπως υστερητική απόσβεση, ιδιότητες κόπωσης, αξιόπιστη ικανότητα ενεργειακής ακράτειας μέσω επαναλαμβανόμενου μετασχηματισμού φάσης και εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση.



**Austenite**



**Twinned martensite**



**Detwinned martensite**

Εικόνα 17. Οι διαφορετικές φάσεις των έξυπνων υλικών

Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών υλικών, η ιδιότητα του μορφοτροπέα μεταξύ μηχανικής καταπόνησης και ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στην κρυσταλλική δομή. Σε έναν κρύσταλλο, κάθε μόριο είναι πολωμένο έχοντας το ένα άκρο φορτισμένο αρνητικά και το άλλο θετικά φορτισμένο, δηλαδή ακριβώς όπως ένα δίπολο. Αυτή η διάταξη επηρεάζεται από τις αλλαγές στη μηχανική καταπόνηση και το ηλεκτρικό πεδίο, που οδηγεί στην ιδιότητα του μετατροπέα. Εν συντομία, η απλή ιδέα του πιεζοηλεκτρισμού είναι να αλλάξει η ευθυγράμμιση της πόλωσης των μορίων. Είναι γνωστό ότι οι έξυπνες κατασκευές κατασκευάζονται από διαφορετικούς συνδυασμούς έξυπνων υλικών. Βασικά, αυτές οι έξυπνες δομές περιλαμβάνουν την κατανομή των ενεργοποιητών και των αισθητήρων, των επεξεργαστών, της λογικής ελέγχου και των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι διάφορες έξυπνες δομές συζητούνται παρακάτω.

#### 4.3.1. Προσαρμοστικές δομές

Αυτές είναι οι δομές που έχουν την κατανομή των ενεργοποιητών για να αλλάζουν τα χαρακτηριστικά με προκαθορισμένο τρόπο. Περιλαμβάνουν συμβατικά φτερά αεροσκαφών με πτερύγια και πτερύγια και πτερύγια ρότορα με σερβο πτερύγια.

#### 4.3.2. Αισθητηριακές δομές



Αυτές είναι οι δομές που έχουν την κατανομή των αισθητήρων για την εξέταση των χαρακτηριστικών της δομής, δηλαδή καταπόνηση, θερμοκρασία, ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, μετατόπιση, ζημιά και επιτάχυνση.

#### **4.3.3. Ελεγχόμενες κατασκευές**

Αυτές είναι οι δομές που έχουν την κατανομή των αισθητήρων και των ενεργοποιητών. Αυτά χρησιμοποιούνται για την ενεργή ρύθμιση των χαρακτηριστικών της δομής.

#### **4.3.4. Ενεργές δομές**

Αυτές είναι οι δομές που έχουν την κατανομή των ενσωματωμένων αισθητήρων και ενεργοποιητών. Αυτά έχουν φέρουσα ικανότητα, δηλαδή δομική λειτουργικότητα.

#### **4.3.5. Ευφυείς ή έξυπνες δομές**

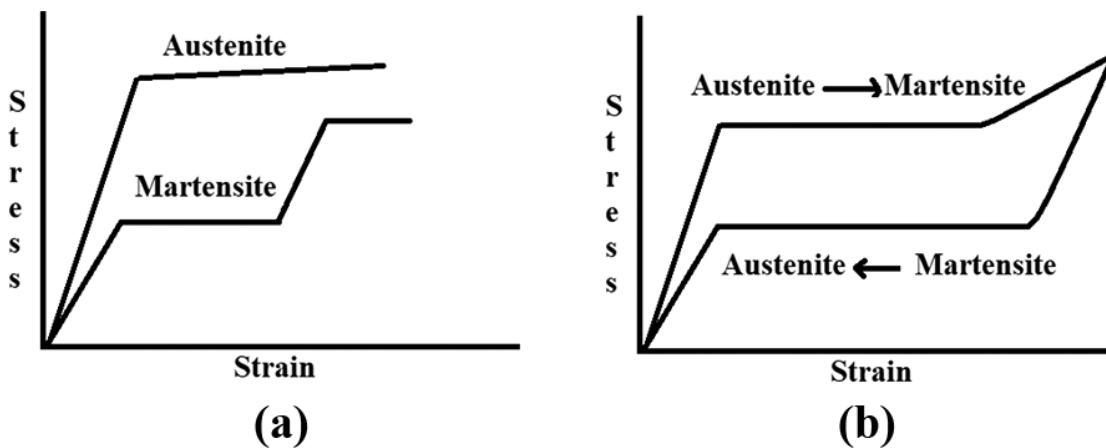
Αυτές είναι οι δομές που έχουν ένα υποσύνολο ενεργών δομών. Αυτά χρησιμοποιούνται για την εξαιρετικά ενσωματωμένη λογική ελέγχου και ηλεκτρονικά ισχύος.

### **4.4. Εφαρμογές**

Οι εφαρμογές των έξυπνων υλικών και κατασκευών αυξάνονται συνεχώς σε διάφορους τομείς όπως κατασκευές πολιτικών κατασκευών, συστήματα αυτοκινήτων, ρομποτικά συστήματα, διαστημικά οχήματα, αεροσκάφη με περιστροφικά φτερά, αεροσκάφη σταθερής πτέρυγας, εργαλειομηχανές, θαλάσσια συστήματα και ιατρικά συστήματα. Οι αυξημένες χρήσεις είναι μέσω τεχνολογικών επαναστάσεων σε ενεργοποιητές, αισθητήρες, απόσβεση κραδασμών, απορρόφηση κραδασμών, έλεγχο σχήματος, σταθερότητα και αύξηση απόσβεσης, δομική ακεραιότητα, λειτουργική συντήρηση, αυτόματο διακόπτη on-off, επεξεργασία εικόνας και επιστρώσεις λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών αυτών των υλικών όπως αυτοπροσαρμογή, αυτοανίχνευση, αυτοπροσαρμογή, μνήμη και πολλαπλές λειτουργίες. Αυτά τα υλικά μπορούν να ανιχνεύσουν σφάλματα και ρωγμές και, ως εκ τούτου, είναι χρήσιμα ως διαγνωστικά εργαλεία. Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιδιόρθωση της βλάβης κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε μηχανικής λειτουργίας – το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο αυτοεπιδιόρθωσης (Liang and

Rogers, 1992· Ghandi, 1995· Sooushian and Hsu, 1997· Lagoudas et al., 1999). Φυσικά, αυτά τα υλικά έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, αλλά σε αυτό το άρθρο, θα γίνουν προσπάθειες να περιοριστούν οι εφαρμογές τους μόνο στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών αεροσκαφών δίνονται στον Πίνακα 2 ενώ ο Πίνακας 3 συνοψίζει διάφορα έξυπνα υλικά που χρησιμοποιούνται στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες.

Οι αεροδιαστημικές βιομηχανίες αντιμετωπίζουν μεγάλη οικονομική πίεση για να μειώσουν το κόστος, αυξάνοντας την απόδοση και διατηρώντας σημαντικά πρότυπα προστασίας. Ως εκ τούτου, η αμυντική βιομηχανία, οι εμπορικές αεροπορικές εταιρείες και οι βιομηχανίες εξερεύνησης του διαστήματος αναζητούν έξυπνα υλικά για αυτούς τους σκοπούς. Αυτά θα πρέπει να είναι συνεπή, στιβαρά και να πληρούν τις απαιτήσεις άκρως εξειδικευμένων εφαρμογών. Τα έξυπνα υλικά έχουν καλές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές. Οι εφαρμογές μηχανικής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αισθητήρες ή συσκευές ανίχνευσης και κινητήρες και ενεργοποιητές. Η ευφυΐα αυτών των υλικών αναπτύσσεται με την αλλαγή της σύνθεσης τους, την ειδική επεξεργασία, την πρόκληση ελαττωμάτων και την τροποποίηση των μικροδομών.



**Notes:** (a) Stress-strain curve; (b) superelastic behavior

Εικόνα 18. Σχέση στελέχους-στρες ωστενίτη και μαρτενσίτη

Τα έξυπνα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ως φέροντες ενεργοποιητές σε ορισμένες σύνθετες κατασκευές όπως πτερύγια αεροσκαφών και πτερύγια ρότορα (Liang et al., 1996; Garner et al., 1999; Jardine et al., 1996). Υπάρχουν έξυπνα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση των κραδασμών και τις διαφορές στο σχήμα των πτερυγίων του ρότορα ελικοπτέρου. Στην Boeing χρησιμοποιείται τεχνολογία έξυπνου ρότορα που ενεργοποιείται από υλικό, η οποία μειώνει περίπου 80% τους κραδασμούς, βελτιώνοντας την απόδοση της πτήσης. Η Airbus Helicopters SAS (πρώην Eurocopter Group) έχει επίσης αναπτύξει παρόμοια συστήματα. Ομοίως, παράγονται διάφορες προσαρμοστικές επιφάνειες ρυθμιστή για τα φτερά του αεροπλάνου. Επίσης, πρόσφατα, η έρευνα συνεχίζεται για να δώσει έμφαση στις νέες τεχνικές ελέγχου για έξυπνα υλικά και στις διαδικασίες σχεδιασμού για τις θέσεις των ενεργοποιητών και των αισθητήρων. Οι άλλες εφαρμογές ασχολούνται με την ικανότητα ρύθμισης της αεροελαστικής μορφής ενός

πτερυγίου αεροσκάφους για μείωση της έλξης και αύξηση της απόδοσης εργασίας, ρύθμιση κραδασμών των ελαφρών δομών δορυφόρων και παρατήρηση της δομικής αξιοπιστίας σε διαστημικές δομές και αεροσκάφη.

Τα πιεζοηλεκτρικά και τα διηλεκτρικά υλικά (ηλεκτροκεραμικά υλικά) χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αισθητήρων και μετατροπέων αεροδιαστημικής όπως γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα. Τα γυροσκόπια χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του βήματος των αεροσκαφών, της επιτάχυνσης, των δορυφόρων και των πυραύλων, ενώ τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις κραδασμών. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των επιπέδων των δεξαμενών καυσίμου. Για παράδειγμα, το Boeing 777 έχει πιεζοκεραμικό υλικό σε 60 δεξαμενές καυσίμου υπερήχων. Τα έξυπνα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη λόγω της ικανότητάς τους να αντέχουν υψηλούς κραδασμούς και μηχανικούς κραδασμούς και διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Αυτά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων αεροσκαφών, όπως συναρμολόγηση γραμμής καυσίμου, θερμοστοιχεία και κινητήρες αεριοστροβίλων. Η αλουμίνα χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξαρτημάτων αεροσκαφών για αντοχή σε θερμικές κρούσεις και υψηλή θερμοκρασία, που εμφανίζονται κατά την ανάφλεξη με πλάσμα. Επιπλέον, η αλουμίνα είναι ελαφριά σε βάρος και μειώνει το κόστος που σχετίζεται με την εκτόξευση δορυφόρων. Ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής μπορεί να εκτελέσει έναν μηχανισμό του συστήματος ελέγχου αυξάνοντας την ικανότητα ελιγμών και την απόδοση λόγω της καλής ευελιξίας. Επιπλέον, αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται για τη μείωση των κραδασμών και του θορύβου στο αεροσκάφος. Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται ως ασπίδες θερμότητας για πυροπροστασία και θερμομόνωση σε αεροσκάφη και διαστημικά λεωφορεία επειδή αντέχουν στη θερμότητα και είναι ελαφριές και δεν διαβρώνονται. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν υψηλή θερμοκρασία τήξης, ελαστικότητα, αντοχή σε εφελκυσμό και χημική αδράνεια. Επιπλέον, τα παρμπρίζ των αεροσκαφών θερμαίνονται από μια διαφανή κεραμική επίστρωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας που είναι ενσωματωμένη στο γυαλί για να διατηρούνται καθαρά από την ομίχλη και τον πάγο.

Τα SMA χρησιμοποιούνται για την υπέρβαση των ορίων των κανονικών σχεδίων φτερών αεροπλάνου. Γενικά, τα φτερά για υψηλές ταχύτητες δεν λειτουργούν σε χαμηλή ταχύτητα και αντίστροφα. Αλλά η ενσωμάτωση των SMA στα φτερά του αεροπλάνου μπορεί να λύσει αυτό το πρόβλημα. Τα SMA έχουν καλό μέλλον να χρησιμοποιηθούν στη δομή των φτερών για την ελαχιστοποίηση των αεροδυναμικών απωλειών και τη μεγιστοποίηση της συμφωνίας ταχύτητας-φτερό. Αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για μείωση του ήχου, μείωση φορτίου και για την κάλυψη των αναγκών κίνησης των ελικοπτέρων. Οι Dong et al. (2008) ανέφερε την εφαρμογή του SMA ως ενεργοποιητή για μια προσαρμοστική αεροτομή. Τα ελατήρια SMA χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση με ακρίβεια ορισμένων σημείων στα δέρματα για να φτάσουν στην αεροτομή στόχο. Παρατηρήθηκε ότι η SMA θα μπορούσε να έχει καλά αποτελέσματα ενεργοποίησης, με βάση τις μελέτες προσομοίωσης. Ομοίως, οι Hutaree et al. (2008) ανέφερε ένα δείγμα μιας δομής έξυπνης ενεργοποίησης για μια προσαρμοστική αεροτομή ρυθμίζοντας τα πτερύγια. Τα

ελατήρια SMA ήταν ακίνητα σε έναν ακροδέκτη στο κιβώτιο πτερυγίων προς το κύριο άκρο της αεροτομής ενώ το άλλο άκρο εμπλέκεται επαπτομενικά σε έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο στερεωμένο στο πτερύγιο. Οι ενεργοποιητές ελατηρίου ελέγχονταν με την παροχή ενός εφαρμοζόμενου ρεύματος. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το δείγμα που παρασκευάστηκε έδειξε μια εύρωστη προοπτική για μελλοντικές χρήσεις.

#### **4.5. Νανοτεχνολογία και έξυπνα υλικά**

Φυσικά, η νανοτεχνολογία έχει αναδειχθεί σε ανεξάρτητο ερευνητικό πεδίο (Ali, 2012, 2018). Ωστόσο, πρόσφατα, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στα έξυπνα υλικά για την ενίσχυση της απόδοσής τους και των νέων σχεδίων ή/και εφαρμογών τους. Η νανοτεχνολογία είναι ένα εργαλείο που οδηγεί τα έξυπνα υλικά στο επόμενο επίπεδο. Τα έξυπνα υλικά με δυνατότητα νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν ανώτερη απόδοση στις λειτουργίες τους (Coyle et al., 2007). Οι αποκρίσεις ερεθισμάτων των νανοϋλικών είναι καλύτερες από το συμβατικό έξυπνο υλικό λόγω του μικρού μεγέθους, των επιφανειοδραστικών θέσεων και, μερικές φορές, της μεγαλύτερης επιφάνειας (Dahman et al., 2017). Αυτά τα χαρακτηριστικά αντιλαμβάνονται την αλλαγή στο περιβάλλον ακόμα και σε χαμηλό μέγεθος. Τα πλεονεκτήματα των έξυπνων και νανο-υλικών είναι τα παρακάτω:

Βελτιστοποίηση των αποκρίσεων σύνθετων συστημάτων. Αυτό πραγματοποιείται με τη δημιουργία συστημάτων έγκαιρης προφύλαξης, την αύξηση του εύρους καταστάσεων επιβίωσης ή/και την παροχή προσαρμοστικών απαντήσεων για τη διαχείριση απροσδόκητων καταστάσεων και συνθηκών.

Ελαχιστοποίηση της αλλαγής των αποκρίσεων, αύξηση της ακρίβειας και παροχή καλού ελέγχου του συστήματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση των σχεδίων και των επιδόσεων για ειδικές εφαρμογές.

Βελτίωση της λειτουργικότητας του συστήματος με κατάλληλη αμυντική συντήρηση και βελτιστοποίηση παρουσίας.

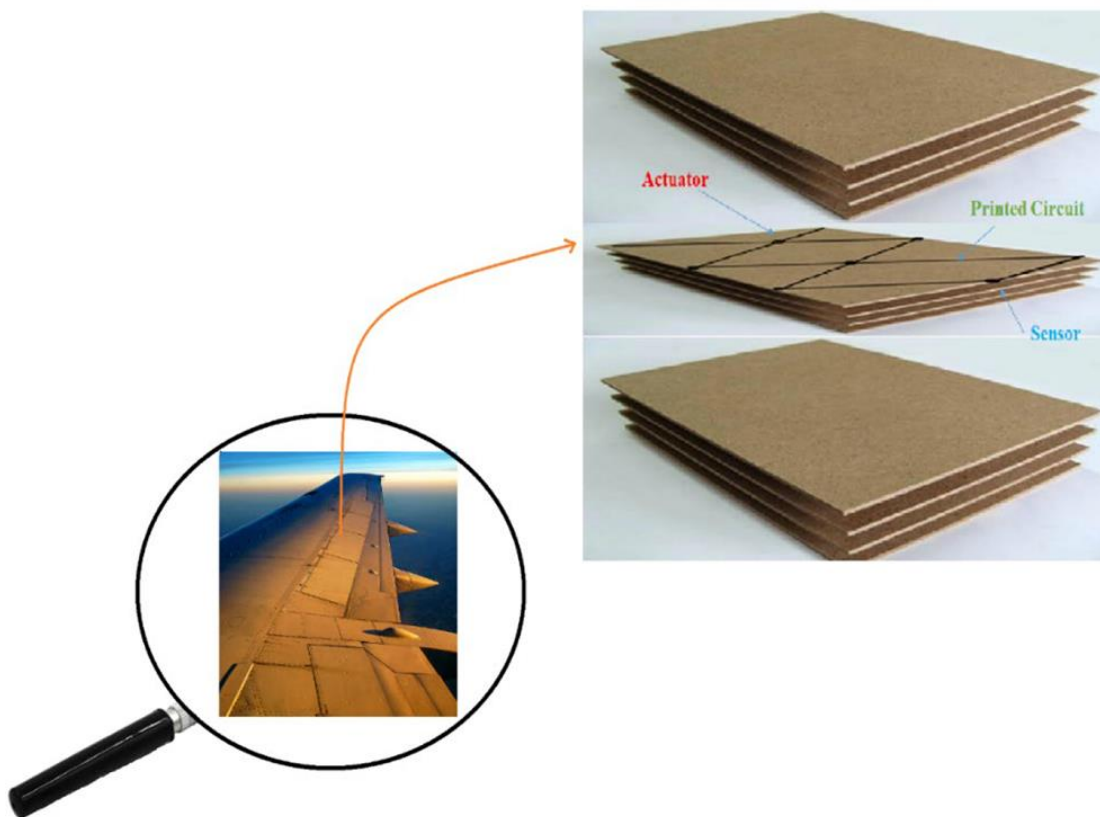
Αξιοσημείωτη επίδραση στις τεχνικές μηχανικής και επεξεργασίας.

Βελτίωση στην παρακολούθηση της υγείας του συστήματος και καλός έλεγχος της δυναμικής και εθισμού του.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά θα ανοίξουν την είσοδο στη χρήση περισσότερων νανο-έξυπνων υλικών για πολλαπλές εφαρμογές στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες.

Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων των νανοϋλικών και των χαρακτηριστικών των έξυπνων υλικών είναι οι καλύτεροι συνδυασμοί για να επιτύχετε τα ύψη στην επιτυχία. Αυτά τα υλικά θα δημιουργήσουν καινοτομία στην αεροδιαστημική μηχανική. Για παράδειγμα, το σώμα του αεροσκάφους και οι δορυφόροι από ένα

νανοέξυπνο υλικό θα μπορούσαν ενδεχομένως να αλλάξουν την υφή της επιφάνειας ανάλογα με τη θερμοκρασία, την πίεση, το ηλεκτρικό ρεύμα και άλλα χαρακτηριστικά. Τα έξυπνα νανοϋλικά (ειδικά τα σύνθετα υλικά), που περιλαμβάνουν αισθητήρες και ενεργοποιητές στα στρώματα των σύνθετων υλικών μπορούν να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε ρωγμή στο αεροσκάφος. Τα έξυπνα νανοϋλικά μπορούν να παρασκευαστούν με πολυεπίπεδη σύνθεση και τεχνικές τυπωμένων κυκλωμάτων. Οι Ihn και Chang (2004) ανέπτυξαν αυτό το είδος τεχνικής χρησιμοποιώντας έξυπνα στρώματα για να ανιχνεύσουν και να παρακολουθήσουν την ανάπτυξη κρυφών ρωγμών κόπωσης χρησιμοποιώντας ένα ενσωματωμένο δίκτυο πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων/ενεργοποιητών. Ομοίως, ο Akhras (2012) χρησιμοποίησε έξυπνα και νανο-συστήματα για εφαρμογές σε μη καταστροφική αξιολόγηση και προοπτικές. Σε αυτό το σύστημα, οι ενεργοποιητές διεγείρουν το σύνθετο υλικό και παράγουν κύματα όταν αναπτύσσεται μια ρωγμή. Αυτά τα κύματα γίνονται αισθητά και ανιχνεύονται από τον πιλότο για να ειδοποιήσει την απαραίτητη ενέργεια. Τα SMA κατασκευάζονται σε ένα νανο-πλαίσιο για φτερά για να χτυπούν με τρόπους παρόμοιους με τα πουλιά (Εικόνα 5). Οι Li et al. (2009) περιέγραψαν τους διαφορετικούς τρόπους παρασκευής νανοσωματιδίων χρυσού τροποποιημένου με πολυμερή. Οι συγγραφείς μελέτησαν τις θερμικές και ευαισθησίες τους στο pH. Τέτοια νανοϋλικά μπορεί να είναι σημαντικά για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μελλοντικών νανοηλεκτρονικών και νανο-αισθητήρων. Ο συγγραφέας περιέγραψε τις αλλαγές στη μορφολογία των νανοσωματιδίων χρυσού ως απόκριση αλλαγής του pH (Εικόνα 6).

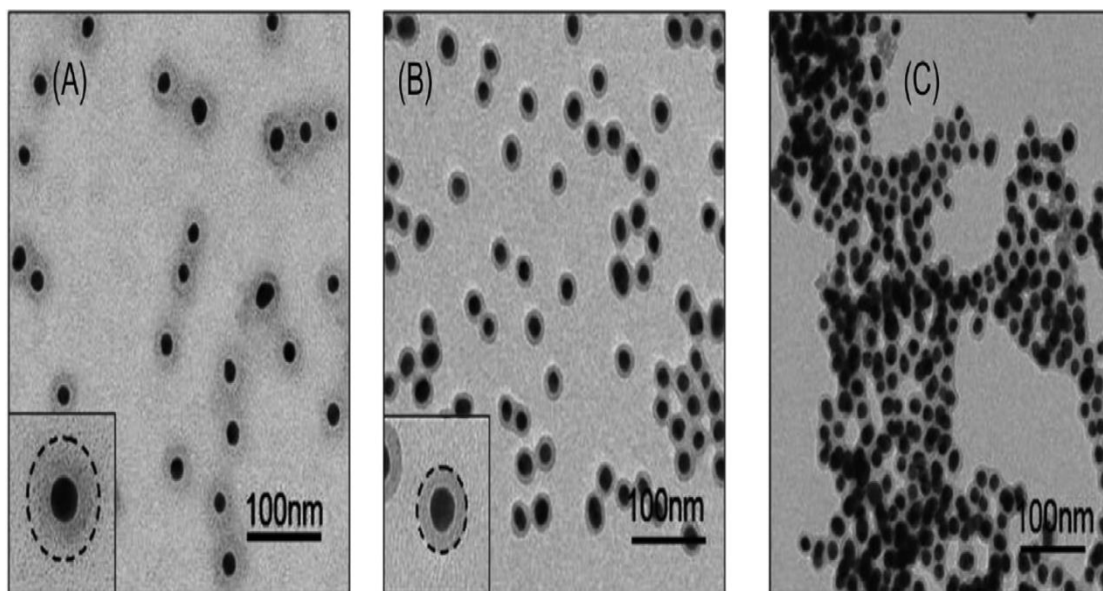


**Note:** Reproduced with permission

Εικόνα 19. Η ενσωμάτωση έξυπνων νανοϋλικών σε σύνθετη δομή με χρήση τεχνολογίας τυπωμένου κυκλώματος

Οι Kuilla et al. (2010) ετοίμασε πιεζοαντιστατικό έξυπνο νανοϋλικό με βάση το γραφένιο και δοκίμασε τα πιεζοαντιστικά χαρακτηριστικά του για να ανακαλύψει μια πιθανή εφαρμογή στους αισθητήρες με βάση το γραφένιο. Οι συγγραφείς συνέκριναν τα αποτελέσματα με αισθητήρες καταπόνησης CNTs. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, παρατηρήθηκε ότι η απόκριση καταπόνησης του αισθητήρα γραφενίου/εποξειδούς ήταν καλύτερη από τα CNT και επίσης συμμετρική και μαζί με αναστρέψιμη συμπεριφορά. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά γραφενίου παρουσίασαν υψηλότερο συντελεστή μέτρησης από το μετρητή τάσης που κατασκευάστηκε από φιλμ γραφενίου υψηλής ποιότητας. Ο συντελεστής υψηλού εύρους μπορεί να οφείλεται στις μεγαλύτερες περιοχές αλληλεπίδρασης μεταξύ των νανοπληρωτικών υλικών γραφενίου λόγω της δισδιάστατης δομής τους. Οι Csetneki et al. (2006) ανέπτυξαν νέες σύνθετες μεμβράνες γέλης με νανο-κανάλια, τα οποία μπορούν να ρυθμίσουν τη διαπερατότητα της μεμβράνης ως απόκριση στα εξωτερικά ερεθίσματα. Με αυξημένη θερμοκρασία, η διαπερατότητα της μεμβράνης αυξήθηκε. Τα κανάλια έχουν μια καλά διατεταγμένη σειρά από σωματίδια μαγνητικού λατέξ πολυστυρενίου, τα οποία υπέστησαν μεταβολή σε όγκο σε αντίδραση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Ventura et al. (2017) περιέγραψε την ψηφιοποίηση υλικών που ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα μέσω ενσωμάτωσης ενός δικτύου αγωγίων νανοϋλικών σε μια ελαστομερή μήτρα. Οι αισθητήρες με ένα ευρύ φάσμα ικανοτήτων ανίχνευσης γίνονται πολλά υποσχόμενοι. Οι συγγραφείς παρακολούθησαν τον ρυθμό και τον βαθμό της διαστολής του υλικού - όπως σε σήτες άμμου ή συσκευαστές. Οι συγγραφείς ισχυρίστηκαν ότι η αναπτυγμένη προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της υποβάθμισης, την κατάσταση ανάπτυξης του εργαλείου και την ανίχνευση χημικών. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι συγγραφείς υποστήριζαν την ανίχνευση της παρουσίας νερού, λαδιού ή ακριβών χημικών ουσιών χρησιμοποιώντας το έργο τους.

Οι Hwang et al. (2013) ανέφερε την παρασκευή νανο-έξυπνου υλικού από νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs), νανοαιμοπεταλίων αποφλοιωμένου γραφίτη (xGnPs) και αιμοπεταλίων νανο-γραφενίου (NGPs). Οι συγγραφείς ετοίμασαν αυτά τα φύλλα διαφόρων πλευρικών διαστάσεων και μηκών χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνθέσεις και συνδυασμούς. Αυτά τα υλικά έδειξαν χαρακτηριστικά πιεζοαντοχής και έδειξαν μια διακύμανση στην ηλεκτρική αντίσταση κατά την εφαρμογή της τάσης. Οι διακυμάνσεις της αντοχής στην εξάρτηση από την παραμόρφωση ήταν κατευθυντικής φύσης. Τα διαφορετικά μείγματα μεγέθους xGnP, μήκους MWCNT και αναλογίας MWCNT-to-xGnP/NGP έδειξαν διάφορες συγκεκριμένες επιφάνειες και αλληλεπιδράσεις νανοσωματιδίων. Οι συγγραφείς ισχυρίστηκαν ότι αυτά χρησιμεύουν ως σημαντικοί παράγοντες για τη ρύθμιση της ευαισθησίας των υβριδικών φύλλων. Η ευαισθησία ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος των φύλλων.



Notes: (a) pH: 3.1; (b) pH: 4.4; (c): pH: 7.5. Reproduced with permission

Εικόνα 20. Αλλαγή στη μορφολογία των νανοσωματιδίων χρυσού

#### 4.5.1. Σύνθεση νανο-έξυπνων υλικών

Τα έξυπνα νανοσωματίδια παράγονται με φυσικές διαδικασίες, που βασίζονται στην κατασκευή σωματιδίων από προσυνθεμένα πολυμερή (διασταυρούμενη σύνδεση μεταξύ πολυμερών και πυρήνων). Η δεύτερη μέθοδος είναι μια χημική σύνθεση νανοσωματιδίων με ετερογενή πολυμερισμό. Μερικές μέθοδοι συζητούνται παρακάτω.

#### 4.5.2. Προσρόφηση πολυμερών σε νανοσωματίδια

Αυτή είναι η κλασική και απλή μέθοδος για την παρασκευή νανοσωματιδίων που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα. Σε αυτή την προσέγγιση, ένα πολυμερές προσροφάται στην επιφάνεια των σωματιδίων και ελέγχει τις αλληλεπιδράσεις στο κολλοειδές εναιώρημα λόγω διαφορετικών επιδράσεων (ηλεκτροστατικό, στερικό, γεφύρωση εξάντλησης και μηχανισμοί).

#### 4.5.3. Αμφίφιλα μπλοκ συμπολυμερή και μικκύλια αυτοσυναρμολόγηση

Τα μπλοκ συμπολυμερή κάνουν διαφορετικούς τύπους αυτοσυναρμολογούμενων διατάξεων από μικκύλια έως σταθερές διπλές στοιβάδες (υπόκεινται στην εκλεκτικότητα του διαλύτη). Η διόγκωση και η συσσώρευση των σωματιδίων προέκυψε λόγω συμβατότητας με διαλύτη. Οι κοινές φυσικές αποκλίσεις

μέσα στα σωματίδια είναι στο συλλογικό μέγεθος. Οι αλλαγές στη συλλογική αρχιτεκτονική, τη δομή και τις αποκρίσεις των ερεθισμάτων σε ιοντική ισχύ, pH, θερμικά και οξειδοαναγωγικά ερεθίσματα είναι μεταξύ εκείνων που συνήθως μετρώνται περισσότερο. Παραδείγματα είναι η ροή διάτμησης, η ιοντική ανταλλαγή και η οσμωτική κρούση. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της σύνθεσης νανο-έξυπνων υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

#### **4.6. Μελλοντικές προοπτικές**

Τα έξυπνα υλικά θα είναι πιθανώς το πιο πρόσφατο άνοιγμα της ανθρωπότητας για ένα σημαντικό άλμα προς ένα ελπιδοφόρο μέλλον. Αυτός ο αιώνας θα κυριαρχείται από μια μεγάλη ποικιλία έξυπνων υλικών. Αυτά θα είναι τα υλικά αιχμής στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης έξυπνων υλικών για την κατασκευή αεροσκαφών με δυνατότητα αλλαγής του σχήματός τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές. Υπάρχει επίσης μεγάλη ζήτηση υλικών ελαστομερούς μήτρας και δομών CMT για τεχνολογία μορφοποίησης. Οι ιδιότητες των έξυπνων υλικών δέχονται τις προκλήσεις στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Επομένως, η έρευνα για τα έξυπνα υλικά είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο. Σίγουρα, η αγορά έξυπνων υλικών θα αυξηθεί στο μέλλον. Η σημασία των έξυπνων υλικών θα προσελκύσει τους ερευνητές στην επίλυση προβλημάτων αεροδιαστημικής μηχανικής. Αναμένεται καινοτόμος έρευνα για την κατασκευή των επιφανειών ελέγχου και των προσαρμοστικών πτερυγίων, που μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την ικανότητα ελιγμών. Υπάρχει μεγάλη ανάγκη να αναπτυχθούν συμπαγή έξυπνα υλικά για τον έλεγχο του θορύβου και του ελέγχου των κραδασμών.

Παρά τη μεγάλη ζήτηση και τις μελλοντικές εφαρμογές έξυπνων υλικών, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις στην ανάπτυξη έξυπνων υλικών. Αυτές είναι οι ιδιότητες και η ανέξοδη τιμή. Οι ερευνητές υποτίθεται ότι βελτιώνουν την ποιότητα χωρίς αύξηση του κόστους. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη να γίνουν εφικτές οι έξυπνες κατασκευές αναπτύσσοντας εξαιρετικά έξυπνα υλικά, ευκολία αγκυρώσεως σε πολυστρωματικές κατασκευές, ζεύξεις μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων, αύξηση της απόδοσης σε χαμηλή τιμή και προόδους στη μικροηλεκτρονική, την επεξεργασία πληροφοριών και την τεχνολογία αισθητήρων.

Στις μέρες μας, η νανοτεχνολογία αποκτά σημασία σε σχεδόν κάθε τομέα της ζωής. Η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου χρησιμοποιεί ήδη νανο-έξυπνα υλικά που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα για τις πολυάριθμες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των διογκώσιμων ελαστομερών σε αντιδραστικούς συσκευαστές και των επεκτάσιμων οθονών που ενεργοποιούνται με θερμότητα/ρευστό. Οι έξυπνες περιβαλλοντικά ευαίσθητες νανο-υδροπηκτές με την ικανότητα να αισθάνονται αλλαγές στο pH, τη θερμοκρασία ή τη συγκέντρωση του μεταβολίτη μπορούν να απελευθερώσουν το φορτίο τους ως αποτέλεσμα μιας τέτοιας αλλαγής. Τα έξυπνα νανοϋλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε SMA. Αυτά



μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμα υλικά για την αλλαγή του σχήματος των φτερών για την ανάγκη για ομαλή και οικονομική απόδοση. Τα έξυπνα νανοϋλικά είναι η ανάγκη για το μέλλον και αυτά θα πρέπει να προετοιμαστούν με πιο προηγμένο τρόπο για να καλύψουν τις ανάγκες της μελλοντικής αεροδιαστημικής τεχνολογίας. Το μέλλον αναζητά αυτόματη ανάλυση ζημιών, αμορτισέρ, αυτοίαση και θερμικό μετριάσμο μέσω νανο-έξυπνων υλικών. Τα νανο-έξυπνα υλικά θα είναι εξαιρετικά ωφέλιμα και χρήσιμα σε μελλοντικές διαστημικές αποστολές και σίγουρα θα βοηθήσουν να κάνουμε τα όνειρά μας πραγματικότητα. Αλλά τα νανοέξυπνα υλικά είναι απλώς νέα και, ως εκ τούτου, μόνο λίγα βιομηχανικά προϊόντα είναι διαθέσιμα στην αγορά. Λόγω των περιορισμών για τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, μπορεί να χρειαστούν πολλά χρόνια για να περάσει ένα προτεινόμενο νανοϋλικό από τη σύλληψη στην επιθυμητή εφαρμογή.

Η ανάπτυξη έξυπνων υλικών είναι ένας διεπιστημονικός τομέας. Τα έξυπνα υλικά είναι τα υλικά νέας γενιάς, τα οποία έχουν μεγάλο λανθάνοντα χαρακτήρα για να εισάγουν μια επανάσταση σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των αεροδιαστημικών βιομηχανιών. Η κατασκευή των νανο-έξυπνων υλικών και η κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας θα βελτιώσει τις ιδιότητες και τις εφαρμογές στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες. Τα νανο-έξυπνα υλικά θα είναι πολύ χρήσιμα στις διαστημικές μας αποστολές. Αυτά μπορεί να είναι τα υλικά εκκίνησης για την έναρξη της ζωής σε άλλους πλανήτες. Αυτά τα έξυπνα υλικά είναι η ελπίδα του μέλλοντος και, σίγουρα, θα βελτιώσουν την ποιότητα της ζωής μας. Για μια πραγματική επανάσταση στις αεροδιαστημικές βιομηχανίες, απαιτούνται συλλογικές προσπάθειες μεταξύ των ακαδημαϊκών, των ερευνητών, των μηχανικών και των σχεδιαστών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

Η πιεζοηλεκτρική διαδικασία είναι επίσης αναστρέψιμη, επομένως εάν εφαρμόσετε ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτά τα υλικά, στην πραγματικότητα θα αλλάξουν ελαφρώς σχήμα (μέγιστο 4%).

Συνήθως στη Μηχανολογία η χρήση τους γίνεται σε:

1. Μετρητές καταπόνησης
2. Ελεγκτής τραχύτητας επιφάνειας.
3. Ψηφιακός εξοπλισμός μέτρησης βάρους
4. Συσκευές μέτρησης πίεσης
5. συσκευές μέτρησης θερμοκρασίας

Ορισμένοι πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες σε Βιομηχανικές Εφαρμογές είναι οι ακόλουθοι:

Αισθητήρες κρουστικού κινητήρα — Οι κατασκευαστές κινητήρων αντιμετωπίζουν συνεχώς προκλήσεις που σχετίζονται με τον έλεγχο των παραμέτρων του κινητήρα. Κάτω από λάθος συνθήκες, οι βενζινοκινητήρες είναι ευαίσθητοι σε ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που είναι γνωστό ως έκρηξη. Όταν συμβεί έκρηξη, το φορτίο αέρα/καυσίμου εκρήγνυται αντί να καίγεται ομαλά, προκαλώντας ζημιά στον κινητήρα. Ιστορικά, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι περισσότεροι κατασκευαστές σχεδίασαν κινητήρες με συντηρητικά λειτουργικά περιθώρια σε βάρος της απόδοσης - ήταν για να αποφευχθεί αυτό το περιβόητο πρόβλημα.

Με την ανάπτυξη καλύτερων συστημάτων ελέγχου, οι σχετικές παράμετροι του κινητήρα μπορούν να προσαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο για να μεγιστοποιήσουν την απόδοση και την ισχύ. Εάν αρχίσει να συμβαίνει έκρηξη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες κρούσης για να ανιχνεύσουν την έκρηξη πριν γίνει προβληματική. Αυτό δίνει στα συστήματα ελέγχου χρόνο να κάνουν τις απαιτούμενες προσαρμογές. [ 1 ]

Αισθητήρες πίεσης — Σε σχεδόν κάθε εφαρμογή που απαιτεί τη μέτρηση των δυναμικών αλλαγών πίεσης, η χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων πίεσης αποδίδει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από τη χρήση συμβατικών ηλεκτρομηχανικών αισθητήρων πίεσης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές έχουν απόκριση υψηλής συχνότητας και μετατροπή σήματος χωρίς να απαιτούν φουσούνα, διάφραγμα ή οποιονδήποτε τύπο μηχανικής σύνδεσης σε συνδυασμό με μετρητή τάσης ή αισθητήρα μετατόπισης.

Εξοπλισμός βυθομέτρου — Οι βυθομετρητές βάθους και ο εξοπλισμός σόναρ βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες για τη μετάδοση και λήψη υπερηχητικών "ring" στην περιοχή 50-200 kHz. Εκτός από την ιδανική απόκριση συχνότητας για τέτοιες εφαρμογές, οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος που επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ακουστικής ισχύος από μια μικρή συσκευασία. Για παράδειγμα, ένας μορφοτροπέας που έχει διάμετρο μόνο 4" (100 mm) μπορεί να μπορεί να χειριστεί ισχύ εξόδου μεγαλύτερη από 500 watt.

Ενώ οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι πολύτιμοι για τον βιομηχανικό τομέα, η βιομηχανία χρησιμοποιεί επίσης πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές για μια ποικιλία εφαρμογών:

Μπεκ ψεκασμού καυσίμου ντίζελ — Την τελευταία δεκαετία, οι κανονισμοί για τις εκπομπές ρύπων από κινητήρες ντίζελ έχουν γίνει ολοένα και πιο αυστηροί. Επιπλέον, οι πελάτες συνεχίζουν να απαιτούν πιο αθόρυβους κινητήρες με βελτιωμένες καμπύλες ισχύος και ροπής. Προκειμένου να ανταποκριθούν σε αυτές τις αυστηρές απαιτήσεις συμμόρφωσης και απόδοσης, οι κατασκευαστές κινητήρων έχουν καταφύγει στη χρήση ψεκασμού καυσίμου με ακρίβεια και μέτρηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης.

Όσο απίστευτο κι αν ακούγεται αυτό, ένα μόνο μπεκ ψεκασμού καυσίμου μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τη ροή καυσίμου με πιέσεις άνω των 26.000 psi (1800 bar) πολλές φορές με γρήγορη διαδοχή κατά τη διάρκεια μιας μόνο διαδρομής ισχύος. Αυτός ο ακριβής έλεγχος του υγρού υψηλής πίεσης καθίσταται δυνατός με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών που ελέγχουν μικρές βαλβίδες εντός των μπεκ ψεκασμού καυσίμου.

Ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες γρήγορης απόκρισης — Ορισμένες διεργασίες απαιτούν γρήγορη και ακριβή μηχανική ενεργοποίηση που είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να επιτευχθεί με ηλεκτρομαγνητικές ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες. Αν και η ταχύτητα μπορεί να μην αποτελεί πάντα ανησυχία, η κατανάλωση ενέργειας ή το συμπαγές μέγεθος είναι κορυφαία προτεραιότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές είναι συχνά σε θέση να γεμίσουν τη θέση, καθώς παρέχουν γρήγορη απόκριση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε μικρές συσκευασίες, σε σύγκριση με τις ηλεκτρομαγνητικές ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες.

Οπτική προσαρμογή — Ορισμένα οπτικά στοιχεία πρέπει να ρυθμιστούν ή να διαμορφωθούν με ευρεία απόκριση συχνότητας και με ελάχιστο αριθμό κινούμενων μερών. Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοιες εφαρμογές όπου παρέχουν γρήγορο και ακριβή έλεγχο για μεγάλη διάρκεια ζωής:

– Η γωνία ενός κατόπτρου ή ενός πλέγματος περίθλασης μπορεί να χρειαστεί να μεταβάλλεται με ακρίβεια ανάλογα με μια ηλεκτρική είσοδο. Τέτοιες εφαρμογές συναντώνται συχνά σε πειράματα οπτικής ή φυσικής.

– Οι συστοιχίες τηλεσκοπίων με βάση τη Γη υπόκεινται σε ατμοσφαιρική παραμόρφωση και τα οπτικά σκάφη υπόκεινται σε κίνηση και δόνηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα οπτικά μπορεί να χρειαστεί να ρυθμιστούν (σχήμα ή περίγραμμα) σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός συστήματος ελέγχου. Αυτό θα αντισταθμίσει τις εκτροπές που διαφορετικά θα εμπόδιζαν την ανάλυση της εικόνας.

– Ορισμένοι μετατροπείς οπτικών ινών βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές για τη διαμόρφωση της εξόδου ενός λέιζερ.

Καθαρισμός με υπερήχους — Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται επίσης για εφαρμογές καθαρισμού με υπερήχους. Για να γίνει καθαρισμός με υπερήχους, τα αντικείμενα βυθίζονται σε διαλύτη (νερό, οινόπνευμα, ακετόνη κ.λπ.). Στη συνέχεια, ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας αναδύει τον διαλύτη. Πολλά αντικείμενα με απρόσιτες επιφάνειες μπορούν να καθαριστούν χρησιμοποιώντας αυτή τη μεθοδολογία.

Συγκόλληση με υπερήχους — Πολλά πλαστικά μπορούν να ενωθούν χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως συγκόλληση με υπερήχους. Αυτός ο τύπος διαδικασίας απαιτεί τα υπερηχητικά κύματα να μεταδοθούν σε μια εστιασμένη περιοχή όπου μπορούν να προκαλέσουν τη σύντηξη τεμαχίων πλαστικού. Συχνά, χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές για την εκτέλεση αυτής της εργασίας.

Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες — Ένα πλεονέκτημα της χρήσης πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι ότι τα χαρακτηριστικά τους είναι ακριβή και προβλέψιμα. Έτσι, η διαστολή και η συστολή ενός πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια, εφόσον ελέγχεται η τάση τροφοδοσίας. Ορισμένα σχέδια κινητήρων εκμεταλλεύονται αυτό το γεγονός χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για να μετακινήσουν έναν ρότορα ή ένα γραμμικό στοιχείο σε ακριβείς αυξήσεις. Ακρίβεια της τάξης των νανομέτρων μπορεί να επιτευχθεί με ορισμένα σχέδια πιεζοκινητήρων. Οι πιεζοκινητήρες λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αλλά συνήθως λειτουργούν καλύτερα σε ένα εύρος χαμηλής συχνότητας.

Εκτός από την εγγενή τους ακρίβεια, οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα με ισχυρά μαγνητικά πεδία ή κρυογονικές θερμοκρασίες - περιβάλλοντα όπου οι συμβατικοί κινητήρες είναι απίθανο να λειτουργήσουν. Αυτές οι μοναδικές προκλήσεις υπάρχουν σε μηχανές NMRI, επιταχυντές σωματιδίων και άλλα παρόμοια περιβάλλοντα.

Ενεργοποιητές στοιβάς — Πολλά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να στοιβάζονται για να πολλαπλασιάσουν τη μετατόπιση που επιτυγχάνεται για μια δεδομένη τάση. Αυτοί οι τύποι συσκευών είναι γνωστοί ως ενεργοποιητές στοιβάς και χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία εξειδικευμένων εφαρμογών. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς ηλεκτρομαγνητικούς ενεργοποιητές, οι ενεργοποιητές στοιβάς έχουν τα ακόλουθα μοναδικά πλεονεκτήματα:

– Μπορούν να λειτουργήσουν σε κρυογονικές θερμοκρασίες ή σε περιβάλλοντα με ισχυρά μαγνητικά πεδία.

- Μπορούν να παράγουν μεγάλη ποσότητα δύναμης σε μια μικρή συσκευασία
- Μπορούν να ανταποκριθούν σχεδόν αμέσως στην είσοδο με υψηλούς ρυθμούς επιτάχυνσης.
- Μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικά υψηλούς βαθμούς ακρίβειας.
- Καταναλώνουν ρεύμα μόνο όταν εκτελούνται πραγματικά εργασίες.

Αυτοί οι ενεργοποιητές βρίσκουν τις χρήσεις τους σε βαλβίδες αναλογίας, ηλεκτρικά ρελέ, οπτική διαμόρφωση, απόσβεση κραδασμών και άλλες εφαρμογές που απαιτούν γρήγορο ή ακριβή έλεγχο της κίνησης.

Ενεργοποιητές λωρίδας — Δύο λωρίδες πιεζοηλεκτρικού υλικού μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους σε μια διαμόρφωση παρόμοια με μια διμεταλλική λωρίδα. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η ηλεκτρική είσοδος αναγκάζει τη μία λωρίδα να διαστέλλεται ενώ η άλλη λωρίδα συστέλλεται ταυτόχρονα, προκαλώντας εκτροπή.

Πιεζοηλεκτρικά Ρελέ — Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να εφαρμοστούν για την ενεργοποίηση ηλεκτρομηχανικών ηλεκτρονόμων ή διακοπών. Για αυτές τις εφαρμογές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ενεργοποιητές ταινίας είτε ενεργοποιητές στοίβας για το άνοιγμα και το κλείσιμο ηλεκτρικών επαφών. Τέτοιες συσκευές δεν χρειάζονται συντήρηση και διαρκούν σε πολλούς κύκλους χωρίς αισθητή φθορά. Ως πρόσθετο πλεονέκτημα, η χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών για τη λειτουργία ηλεκτρικών επαφών επιτρέπει γρήγορο και ακριβή έλεγχο σε μικρές συσκευασίες που είτε είναι δύσκολο είτε αδύνατο να επιτευχθεί με ηλεκτρομαγνητικά ρελέ.

Τα ακόλουθα σημεία επισημαίνουν τις εννέα κορυφαίες εφαρμογές και χρήσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών στην μηχανολογία. Οι εφαρμογές είναι: 1. Ταλαντωτές κρυστάλλων 2. Μετατροπείς 3. Γραμμές καθυστέρησης 4. Εφαρμογές ιατρικού υπερήχου 5. Αναφλεκτήρες αερίου 6. Μετατροπείς μετατόπισης 7. Επιταχυνσιόμετρα 8. Πιεζοηλεκτρικοί μετασχηματιστές 9. Κεφαλή εκτυπωτή κρούσης.

### **Εφαρμογή # 1. Ταλαντωτές κρυστάλλων :**

Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος θα δονείται φυσικά σε διάφορους μηχανικούς τρόπους λειτουργίας, με τις συχνότητες των κραδασμών να εξαρτώνται από τις διαστάσεις του δείγματος και τις ελαστικές σταθερές του υλικού ( $f = 1/2l \sqrt{Y/\rho}$ ). Εάν ο κρύσταλλος τοποθετηθεί ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και εφαρμοστεί μια εναλλασσόμενη τάση σε μία από τις συχνότητες συντονισμού, το πλάτος της ταλάντωσης θα αυξηθεί σε αυτή τη συχνότητα.

Η σταθερότητα του ταλαντωτικού συστήματος θα ελέγχεται από τη σταθερότητα των ελαστικών σταθερών του κρυστάλλου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται γενικά κομμένοι δίσκοι χαλαζία, η σταθερότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή αφού ο συντελεστής θερμικής διαστολής του χαλαζία είναι πολύ χαμηλός. Η χρήση ταλαντωτών κρυστάλλων χαλαζία στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ήδη πολύ μεγάλη.

### **Εφαρμογή # 2. Μετατροπείας ::**

Μια άλλη εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών ταλαντωτών έγκειται στη μετατροπή των μηχανικών παλμών σε ηλεκτρικούς και αντίστροφα. Ο κρύσταλλος χρησιμοποιείται εδώ ως μετατροπείας. Οι ακουστικοί παλμοί χρησιμοποιούνται στην υποβρύχια αναζήτηση και σε άλλες εφαρμογές. Σχεδόν σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι ακουστικοί παλμοί παράγονται από πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς που διεγείρονται από ηλεκτρικά πεδία.

Σε ένα φυσίγγιο φωνογράφου, καθώς η γραφίδα διασχίζει τις αυλακώσεις σε μια εγγραφή, μια διακύμανση πίεσης επιβάλλεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται στο φυσίγγιο, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και ενισχύεται πριν πάει στο ηχείο.

### **Εφαρμογή # 3. Γραμμές καθυστέρησης :**

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γραμμές καθυστέρησης. Εάν ένα ηλεκτρικό σήμα μετατραπεί σε ακουστικό στο ένα άκρο μιας ράβδου χαλαζία, το σήμα θα περάσει κατά μήκος της ράβδου ως ακουστικό κύμα. Θα ταξιδεύει στον χαλαζία με την κατάλληλη ταχύτητα ήχου. Φτάνοντας στο άκρο της ράβδου, το ακουστικό κύμα μπορεί να ληφθεί ως ηλεκτρικό σήμα. Το αρχικό ηλεκτρικό σήμα έχει καθυστερήσει, μια απαίτηση που συναντάται συχνά σε συσκευές επικοινωνίας.

### **Εφαρμογή # 4. Εφαρμογές ιατρικού υπερήχου:**

Το πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ενεργητικές όσο και για παθητικές εφαρμογές μετατροπείων. Στην παθητική λειτουργία ο μορφοτροπείας λειτουργεί ως δέκτης ήχου, δηλαδή γίνεται μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο επιτρέπει σε έναν μορφοτροπεία να λειτουργεί ως ενεργός πομπός ήχου.

Στη λειτουργία παλμικής ηχούς, χρησιμοποιείται ο μορφοτροπείας, για να εκτελεί ταυτόχρονα την ενεργητική και την παθητική λειτουργία. Ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται στο μέσο και μια αμυδρή ηχώ λαμβάνεται πίσω μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα λόγω της αναντιστοιχίας ακουστικής αντίστασης

μεταξύ των υλικών διεπαφής. Αυτή η αρχή χρησιμοποιείται σε μετατροπείς για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης υπερήχων.

Η μέθοδος απεικόνισης με υπερήχους υπερέρχει καθώς η διάγνωση μπορεί να γίνει χωρίς την ανάγκη κοπής όπως στο χειρουργείο. Σε σύγκριση με την απεικόνιση με ακτίνες X, είναι ασφαλέστερη στα χαμηλά επίπεδα ισχύος που χρησιμοποιούνται σε κανονικές σαρώσεις. Είναι επίσης χρήσιμο στη διάκριση μεταξύ μαλακών ιστών, κάτι που δεν είναι δυνατό με τις ακτίνες X. Ωστόσο, η απεικόνιση με ακτίνες X και υπερήχους μπορεί να ειπωθεί ότι αλληλοσυμπληρώνονται, καθώς οι ακτίνες X μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση του οστού, κάτι που δεν είναι δυνατό στη βιοϊατρική απεικόνιση.

Η αρχή της απεικόνισης με υπερήχους βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας παλμικής ηχούς. Ο μορφοτροπέας διεγείρεται από ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο με τη σειρά του παράγει έναν δονητικό παλμό στο μέσο διάδοσης. μέρος της ενέργειας ανακλάται πίσω προς τον μορφοτροπέα.

Αυτή η ανακλώμενη ηχώ παρήγαγε ένα σήμα τάσης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της εικόνας των εσωτερικών οργάνων και ιστών στο σώμα. Η διαφορά ακουστικής σύνθετης αντίστασης μεταξύ ενός ιστού σε άλλο είναι μικρή, έτσι ο δονητικός παλμός διεισδύει σε μεγαλύτερα βάθη και παρέχει μια καλή ικανότητα απεικόνισης.

### **Εφαρμογή # 5. Αναφλεκτήρες αερίου:**

Οι αναφλεκτήρες αερίου αποτελούνται από δύο αντίθετους πολικούς κεραμικούς κυλίνδρους που συνδέονται από άκρη σε άκρη προκειμένου να διπλασιαστεί η διαθέσιμη φόρτιση για τον σπινθήρα. Η συμπιεστική δύναμη πρέπει να εφαρμοστεί γρήγορα για να αποφευχθεί η διαρροή φορτίου στις επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού κεραμικού.

Η δημιουργία του σπινθήρα γίνεται σε δύο στάδια. Η εφαρμογή θλιπτικής δύναμης «F» στο πολωμένο κεραμικό (υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος) οδηγεί σε μείωση του μήκους κατά  $\sigma L^D$ . Η δυναμική ενέργεια που αναπτύσσεται στα άκρα πρέπει να είναι υψηλότερη από την τάση διάσπασης του διακένου, για να προκύψει σπινθήρας. Όταν συμβεί η κατάρρευση του κενού σπινθήρα, ξεκινά το δεύτερο στάδιο παραγωγής ενέργειας. Η ηλεκτρική εκκένωση στο διάκενο οδηγεί σε αλλαγή σε χαμηλότερο επίπεδο.

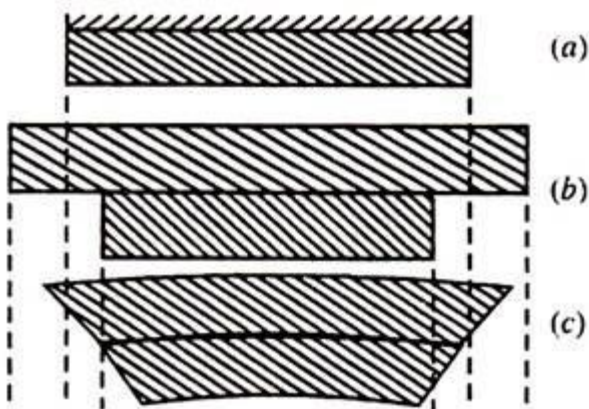
Η συμμόρφωση του υλικού αυξάνεται και επιτρέπει περαιτέρω συμπίεση του κεραμικού κατά  $(\sigma L^E - \sigma L^D)$  όπου  $\sigma L^E$  είναι η μετατόπιση που θα είχε συμβεί εάν η δύναμη «F» είχε εφαρμοστεί σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Ο συνδυασμός των καταπονήσεων από τις συνθήκες ανοιχτού και βραχυκυκλώματος παράγει περισσότερη ενέργεια που μπορεί να διαλυθεί στον σπινθήρα. Συνήθως για αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιούνται κεραμικοί δίσκοι PZT.

### Εφαρμογή # 6. Μετατροπείς μετατόπισης:

Όταν ασκείται δύναμη σε μια μακρά πιεζοηλεκτρική δοκό προβόλου, η μία πλευρά είναι σε τάση ενώ η άλλη πλευρά θα είναι σε συμπίεση. Δεν μπορεί να ληφθεί ηλεκτρική έξοδος από αυτό το ομοιογενές σώμα με κάμψη. Τα δίμορφα που κατασκευάζονται με δύο μισά χωριστών δοκών με ένα ηλεκτρόδιο ενδιάμεσα καθώς και στην επάνω και την κάτω επιφάνεια.

Εάν οι δοκοί είναι πολωμένοι προς την αντίθετη κατεύθυνση, τότε με την εφαρμογή της δύναμης «F» η τάση που δημιουργείται στα εξωτερικά ηλεκτρόδια θα είναι προσθετική (Εικ. 6.15(α)). Εάν οι δοκοί είναι πολωμένοι προς την ίδια κατεύθυνση, η έξοδος του πρόσθετου μπορεί να ληφθεί συνδέοντας τα εξωτερικά ηλεκτρόδια και το κεντρικό ηλεκτρόδιο όπως φαίνεται στην Εικ. 6.15(β).

Αντίθετα, η εφαρμογή τάσης στο δίμορφο προκαλεί κάμψη του. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί τη διαστολή της μισής δέσμης του προβόλου και τη συστολή της άλλης μισής. Εάν ενωθούν με τη μορφή δίμορφου, οδηγεί σε καθαρή μετατόπιση κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου.



**Fig. 6.16. Schematic of a bimorph showing (a) two free halves of the bimorph (b) the free halves in an electric field (c) the two free halves shown in (a) arc joined to form a bimorph.**

### Εφαρμογή # 7. Επιταχυνσιόμετρα:

Ένα επιταχυνσιόμετρο είναι μια συσκευή που δίνει ηλεκτρική έξοδο ανάλογη με την επιτάχυνση. Ο μορφοτροπέας είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κύλινδρος που είναι πολωμένος κατά μήκος του άξονά του, αλλά

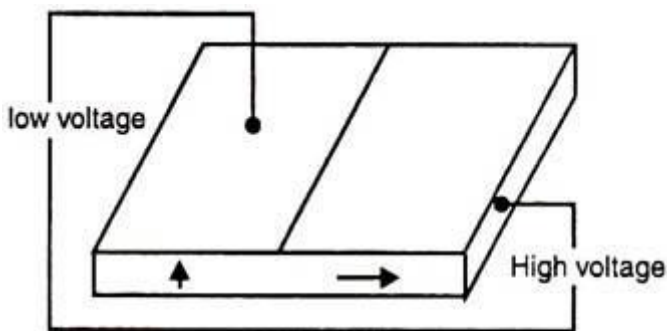


έχει αφαιρεθεί τα ηλεκτρόδια πόλων και τα ηλεκτρόδια αίσθησης εφαρμόζονται στην εσωτερική και εξωτερική του επιφάνεια.

Ο κύλινδρος ενώνεται με τον σταθερό κεντρικό πόλο στο εσωτερικό και μια κυλινδρική μάζα εξωτερικά. Όταν λαμβάνει χώρα μια αξονική επιτάχυνση, ο κύλινδρος υπόκειται σε μια δύναμη διάτμησης μεταξύ της εξωτερικής μάζας και του εσωτερικού πόλου. Οποιαδήποτε κίνηση στην ακτινική κατεύθυνση δεν δίνει καμία έξοδο καθώς ο πιεζο-συντελεστής για το κεραμικό επιταχυνσιόμετρο PZT είναι μηδέν. Έτσι, η συσκευή είναι εξαιρετικά κατευθυντική.

### Εφαρμογή # 8. Πιεζοηλεκτρικοί μετασχηματιστές:

Ο μετασχηματισμός χαμηλής τάσης σε υψηλή τάση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια πιεζοηλεκτρική πλάκα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια επίπεδη πλάκα με ηλεκτρόδια στο μισό της μεγαλύτερης όψης και σε μια άκρη. Η περιοχή μεταξύ των μεγαλύτερων ηλεκτροδίων όψης και των ηλεκτροδίων ακμής πολώνονται χωριστά.



**Fig. 6.18. A piezoelectric transformer with the arrows indicating the poling directions.**

Ένας συντονισμός λειτουργίας μήκους διεγείρεται με την εφαρμογή μιας πηγής χαμηλής τάσης AC μεταξύ των μεγαλύτερων ηλεκτροδίων προσώπου. Η αναλογία ανοδικής τάσης θα είναι ανάλογη με την αναλογία της χωρητικότητας εισόδου προς έξοδο και την απόδοση της συσκευής. Αυτή η αρχή έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μετασχηματιστών EHT για μικροσκοπικούς δέκτες τηλεόρασης.

### Εφαρμογή # 9. Κεφαλή κρουστικού εκτυπωτή:

Οι κρουστικοί εκτυπωτές dot matrix που οδηγούνται από πιεζοηλεκτρικούς κεραμικούς ενεργοποιητές πολλαπλών στρώσεων έχουν παραχθεί με επιτυχία σε μεγάλη εμπορική κλίμακα. Το στοιχείο της ακίδας εκτύπωσης αποτελείται από έναν πιεζοενεργοποιητή, έναν ενισχυτή διαδρομής που λειτουργεί στην αρχή

του μοχλού και ένα καλώδιο εκτύπωσης. Όταν εφαρμόζεται ένας παλμός με μέγιστη τάση 150 V στον πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή, το σύρμα εκτύπωσης μετακινείται κατά περίπου 40  $\mu\text{m}$ , με αποτέλεσμα η άκρη του σύρματος να χτυπά το χαρτί μέσω της μελανοταινίας.

Τα πλεονεκτήματα του εκτυπωτή dot matrix έναντι των συμβατικών εκτυπωτών ηλεκτρομαγνητικής μονάδας περιλαμβάνουν υψηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης (διπλάσια ταχύτητα λόγω της παρουσίας 24 στοιχείων ακίδων εκτύπωσης) και τη μισή κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τον τελευταίο εκτυπωτή.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν πολλές απαιτήσεις για έξυπνα υλικά και κατασκευές. Ο τομέας των έξυπνων υλικών και δομών είναι ένας πλήρως διεπιστημονικός τομέας που δανείζεται από την επιστήμη και την τεχνολογία και συνδυάζει τις γνώσεις της φυσικής, των μαθηματικών, της χημείας, της επιστήμης των υπολογιστών, της επιστήμης των υλικών, της ηλεκτρολογικής μηχανικής και της μηχανολογίας. Εφαρμόζει την ανθρώπινη δημιουργικότητα και καινοτόμες ιδέες για να εξυπηρετήσει την ανθρώπινη κοινωνία για εργασίες όπως η κατασκευή ενός ασφαλέστερου αυτοκινήτου, ενός πιο άνετου αεροπλάνου, ενός αυτοεπισκευαζόμενου σωλήνα νερού κ.λπ. Οι έξυπνες δομές μπορούν να μας βοηθήσουν να ελέγξουμε καλύτερα το περιβάλλον. Μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση των συσκευών [ 1]. Οι μηχανικοί αεροδιαστημικής ενδιαφέρονται για έξυπνα φύλλα αέρα για τον έλεγχο της οπισθέλκουσας και των αναταράξεων. Τα άτομα που πάσχουν από διαβητικούς χρειάζονται ιατρικά συστήματα για να ανιχνεύουν το επίπεδο σακχάρου και να παρέχουν ελεγχόμενη ποσότητα ινσουλίνης. Οι αρχιτέκτονες μπορούν να κατασκευάσουν έξυπνα κτίρια που ενσωματώνουν αυτορυθμιζόμενα παράθυρα για να ελέγχουν τη ροή ενέργειας στα σπίτια. Απαιτούνται έξυπνα συστήματα άρδευσης για τη βελτιστοποίηση της παγκόσμιας προσφοράς τροφίμων [ 3 ]. Ορισμένοι ερευνητές προβλέπουν ακόμη και μικροσκοπικές συσκευές, όπως ηλεκτρομηχανικές συσκευές που χρησιμοποιούν έξυπνες δομές ικανές να επικοινωνούν απευθείας με τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Τα έξυπνα υλικά αναπτύσσονται και βελτιώνονται. μπορεί κανείς να περιμένει να δει εξαιρετικά έξυπνα υλικά και δομές με απίστευτη γκάμα λειτουργιών και χρήσεων στο εγγύς μέλλον.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Hirsch A. The era of carbon allotropes. *Nat. Mater.* 2010;9:868–871. doi: 10.1038/nmat2885.
2. Skoda M., Dudek I., Jarosz A., Szukiewicz D. Graphene: One Material, Many Possibilities-Application Difficulties in Biological Systems. *J. Nanomater.* 2014;2014:190. doi: 10.1155/2014/890246.
3. Harris P.J.F. New Perspectives on the Structure of Graphitic Carbons. *Crit. Rev. Solid.* 2005;30:235–253. doi: 10.1080/10408430500406265.
4. Torres L.E.F., Roche S., Charlier J.-C. *Introduction to Carbon-Based Nanostructures*. 2nd ed. Cambridge University Press; Cambridge, UK: 2020. pp. 1–10.
5. Khalaj Z., Monajjemi M., Diudea M.V. Main Allotropes of Carbon: A Brief Review. In: Putz M.V., Mirica M.C., editors. *Sustainable Nanosystems Development, Properties, and Applications*. IGI Global; Hershey, PA, USA: 2017. pp. 185–213.
6. Slepicka P., Slepickova Kasalkova N., Siegel J., Kolska Z., Bacakova L., Svorcik V. Nano-structured and functionalized surfaces for cytocompatibility improvement and bactericidal action. *Biotechnol. Adv.* 2015;33:1120–1129. doi: 10.1016/j.biotechadv.2015.01.001.
7. Grausova L., Vacik J., Vorlicek V., Svorcik V., Slepicka P., Bilkova P., Vandrovцова M., Lisa V., Bacakova L. Fullerene C(60) films of continuous and micropatterned morphology as substrates for adhesion and growth of bone cells. *Diam. Relat. Mater.* 2009;2009:578–586. doi: 10.1016/j.diamond.2008.10.024.
8. Stankova L., Fraczek-Szczypta A., Blazewicz M., Filova E., Blazewicz S., Lisa V., Bacakova L. Human osteoblast-like MG 63 cells on polysulfone modified with carbon nanotubes or carbon nanohorns. *Carbon.* 2014;67:578–591. doi: 10.1016/j.carbon.2013.10.031.
9. Verdanova M., Rezek B., Broz A., Ukraintsev E., Babchenko O., Artemenko A., Izak T., Kromka A., Kalbac M., Hubalek Kalbacova M. Nanocarbon allotropes-graphene and nanocrystalline diamond-promote cell proliferation. *Small.* 2016;12:2499–2509. doi: 10.1002/sml.201503749.
10. Krueger A. *Carbon Materials and Nanotechnology*. 1st ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Weinheim, Germany: 2010. pp. 1–32.
11. Falcao E.H., Wudl F. Carbon allotropes: Beyond graphite and diamond. *J. Chem. Technol. Biot.* 2007;82:524–531. doi: 10.1002/jctb.1693.
12. Pisarciuc C. *Structure, Material Properties and Applications of Diamond-Like Materials*. *Nonconv. Technol. Rev.* 2012;XVI:13–18.
13. Escudeiro A., Wimmer M.A., Polcar T., Cavaleiro A. Tribological behavior of uncoated and DLC-coated CoCr and Ti-alloys in contact with UHMWPE and PEEK counterbodies. *Tribology Int.* 2015;89:97–104. doi: 10.1016/j.triboint.2015.02.002.

14. Mengesha A.E., Youan B.B.C. Nanodiamonds for drug delivery systems. In: Narayan R., editor. *Diamond-Based Materials for Biomedical Applications*. 1st ed. Woodhead Publishing; Cambridge, UK: 2013. pp. 186–205.
15. Karczemska A. Diamond materials for microfluidic devices. In: Narayan R., editor. *Diamond-Based Materials for Biomedical Applications*. 1st ed. Woodhead Publishing; Cambridge, UK: 2013. pp. 256–271.
16. Perez G., Maréchal A., Chicot G., Lefranc P., Jeannin P.O., Eon D., Rouger N. Diamond semiconductor performances in power electronics applications. *Diamond Rel. Mater.* 2020;110:108154. doi: 10.1016/j.diamond.2020.108154.
17. Narayan J., Bhaumik A. Research Update: Direct conversion of amorphous carbon into diamond at ambient pressures and temperatures in air. *APL Mater.* 2015;3:100702-1–100702-11. doi: 10.1063/1.4932622.
18. Bhaumik A., Sachan R., Narayan J. High-Temperature Superconductivity in Boron-Doped Q-Carbon. *ACS Nano*. 2017;11:5351–5357. doi: 10.1021/acsnano.7b01294.
19. Kopova I., Rezek B., Stehlik S., Ukraintsev E., Slepickova Kasalkova N., Slepicka P., Potocky S., Bacakova L. Growth of Primary Human Osteoblasts on Plasma-Treated and Nanodiamond-Coated PTFE Polymer Foils. *Phys. Status Solidi B*. 2018;255:1700595. doi: 10.1002/pssb.201700595.
20. Naeayan R.J., Boehm R.D., Sumant A.V. Introduction to medical applications of diamond particles and surfaces. In: Narayan R., editor. *Diamond-Based Materials for Biomedical Applications*. 1st ed. Volume 1. Woodhead Publishing Limited; Cambridge, UK: 2013. pp. 3–24.
21. Catledge S.A., Thomas V., Vohra Y.K. Nanostructured diamond coatings for orthopaedic applications. In: Narayan R., editor. *Diamond-Based Materials for Biomedical Applications*. 1st ed. Volume 5. Woodhead Publishing Limited; Cambridge, UK: 2013. pp. 105–150.
22. Stoller M.D., Park S., Zhu Y., An J., Ruoff R.S. Graphene-Based Ultracapacitors. *Nano Lett.* 2008;8:3498–3502. doi: 10.1021/nl802558y.
23. Gómez-Navarro C., Weitz T.R., Bittner A.M., Scolari M., Mews A., Burghard M., Kern K. Electronic Transport Properties of Individual Chemically Reduced Graphene Oxide Sheets. *Nano Lett.* 2007;7:3499–3503. doi: 10.1021/nl072090c.
24. Geim A.K. Graphene: Status and Prospects. *Science*. 2009;324:1530–1534. doi: 10.1126/science.1158877.
25. Allen M.J., Tung V.C., Kaner R.B. Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chem. Rev.* 2010;110:132–145. doi: 10.1021/cr900070d.
26. Kiew S.F., Kiew L.F., Lee H.B., Imae T., Chung L.Y. Assessing biocompatibility of graphene oxide-based nanocarriers: A review. *J. Control. Release*. 2016;226:217–228. doi: 10.1016/j.jconrel.2016.02.015.

27. Pacakova B., Verhagen T., Bousa M., Hübner U., Vejpravova J., Kalbac M., Frank O. Mastering the Wrinkling of Selfsupported Graphene. *Sci. Rep.* 2017;7:10003. doi: 10.1038/s41598-017-10153-z.
28. Akinwande D., Brennan C.J., Bunch J.S., Egberts P., Felts J.R., Gao H., Huang R., Kim J.S., Li T., Li X., et al. A review on mechanics and mechanical properties of 2D materials-Graphene and beyond. *Extrem Mech. Lett.* 2017;13:42–77. doi: 10.1016/j.eml.2017.01.008.
29. Shi W., Zhu J., Sim D.H., Tay Y.Y., Lu Z., Zhang Y., Sharma Y., Srinivasan M., Zhang H., Hng H.H., et al. Achieving high specific charge capacitances in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/reduced graphene oxide nanocomposites. *J. Mater. Chem.* 2011;21:3422–3427. doi: 10.1039/c0jm03175e.
30. Anju M., Renuka N.K. Graphene-dye hybrid optical sensors. *Nano-Struct. Nano-Objects.* 2019;17:194–217.
31. Shin S.R., Li Y.-C., Jang H.L., Khoshakhlagh P., Akbari M., Nasajpour A., Zhang Y.S., Tamayol A., Khademhosseini A. Graphene-based materials for tissue engineering. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2016;105:255–274. doi: 10.1016/j.addr.2016.03.007.
32. Bai R.G., Ninan N., Muthoosamy K., Manickam S. Graphene: A versatile platform for nanotheranostics and tissue engineering. *Prog. Mater. Sci.* 2018;91:24–69.
33. Kenry, Lee W.C., Loh K.P., Lim C.T. When stem cells meet graphene: Opportunities and challenges in regenerative medicine. *Biomaterials.* 2018;155:236–250. doi: 10.1016/j.biomaterials.2017.10.004.
34. Pinto A.M., Goncalves I.C., Magalhaes F.D. Graphene-based materials biocompatibility: A review. *Colloid Surface B.* 2013;111:188–202. doi: 10.1016/j.colsurfb.2013.05.022.
35. Zhang Y., Nayak T.R., Hong H., Cai W. Graphene: A versatile nanoplatform for biomedical applications. *Nanoscale.* 2012;4:3833–3842. doi: 10.1039/c2nr31040f.
36. Li N., Cheng Y., Song Q., Jiang Z., Tang M., Cheng G. Graphene meets biology. *Chin. Sci. Bull.* 2014;59:1341–1354. doi: 10.1007/s11434-014-0158-0.
37. Bacon M., Bradley S.J., Nann T. Graphene Quantum Dots. *Part. Part. Syst. Charact.* 2014;31:415–428. doi: 10.1002/ppsc.201300252.
38. Paul R., Dai L. Interfacial aspects of carbon composites. *Compos. Interfaces.* 2018;25:539–605. doi: 10.1080/09276440.2018.1439632.
39. Du X., Zhou H., Sun W., Liu H.-Y., Zhou G., Zhou H., Mai Y.-W. Graphene/epoxy interleaves for delamination toughening and monitoring of crack damage in carbon fibre/epoxy composite laminates. *Compos. Sci. Technol.* 2017;140:123–133. doi: 10.1016/j.compscitech.2016.12.028.
40. Slepíčka P., Slepíčková Kasálková N., Pinkner A., Sajdl P., Kolská Z., Švorčík V. Plasma induced cytocompatibility of stabilized poly-L-lactic acid doped with graphene nanoplatelets. *React. Funct. Polym.* 2018;131:266–275. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2018.08.006.
41. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of graphene. *Nat. Mater.* 2007;6:183–191. doi: 10.1038/nmat1849.

42. Paul R., Gayen R.N., Biswas S., Venkataprasad Bhat S., Bhunia R. Enhanced UV detection by transparent graphene oxide/ZnO composite thin films. *RSC Adv.* 2016;6:61661–61672. doi: 10.1039/C6RA05039E.
43. Fajstavr D., Neznalova K., Svorcik V., Slepicka P. LIPSS Structures Induced on Graphene-Polystyrene Composite. *Materials.* 2019;12:3460. doi: 10.3390/ma12213460.
44. Slepíčková Kasálková N., Buřičová L., Slepíčka P., Kolská Z., Švorčík V. Carbon nanolayers deposited on laser treated PLLA film. *Chem. Listy.* 2015;109:879–884.
45. Slepíčka P., Neznalová K., Fajstavr D., Švorčík V. Nanostructuring of honeycomb-like polystyrene with excimer laser. *Prog. Org. Coat.* 2020;145:105670. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105670.
46. Slepicka P., Siegel J., Lyutakov O., Slepickova Kasalkova N., Kolska Z., Bacakova L., Svorcik V. Polymer nanostructures for bioapplications induced by laser treatment. *Biotechnol. Adv.* 2018;36:839–855. doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.12.011.
47. Neděla O., Slepíčka P., Sajdl P., Veselý M., Švorčík V. Surface analysis of ripple pattern on PS and PEN induced with ring-shaped mask due to KrF laser treatment. *Surf. Interface Anal.* 2017;49:25–33. doi: 10.1002/sia.6054.
48. Zhao B., Zhao C., Li R., Mahdi Hamidinejad S., Park C.B. Flexible, ultrathin, and high-efficiency electromagnetic shielding properties of poly (vinylidene fluoride)/carbon composite films. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017;9:20873–20884. doi: 10.1021/acsami.7b04935.
49. Tuantranont A. Nanomaterials for sensing applications: Introduction and perspectives. In: Tuantranont A., editor. *Applications of Nanomaterials in Sensors and Diagnosis.* 1st ed. Volume 14. Springer; Berlin/Heidelberg, Germany: 2013. p. 1.
50. Das S., Wajid A.S., Shelburne J.L., Liao Y.-C., Green M.J. Localized In situ Polymerization on Graphene Surfaces for Stabilized Graphene Dispersions. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2011;3:1844–1851. doi: 10.1021/am1011436.
51. Potts J.R., Dreyer D.R., Bielawski C.W., Ruoff R.S. Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer.* 2011;52:5–25. doi: 10.1016/j.polymer.2010.11.042.
52. Wajid A.S., Das S., Irin F., Tanvir Ahmed H.S., Shelburne J.L., Parviz D., Fullerton R.J., Jankowski A.F., Hedden R.C., Green M.J. Polymer-stabilized graphene dispersions at high concentrations in organic solvents for composite production. *Carbon.* 2012;50:526–534. doi: 10.1016/j.carbon.2011.09.008.
53. Crevillen A.G., Escarpa A., García C.D., editors. *Carbon-Based Nanomaterials in Analytical Chemistry.* The Royal Society of Chemistry; Cambridge, UK: 2019. Carbon-based nanomaterials in Analytical Chemistry; pp. 1–36.
54. Kim K., Abdala A.A., Macosko C.W. Graphene/Polymer Nanocomposites. *Macromolecules.* 2010;43:6515–6530. doi: 10.1021/ma100572e.

55. Tiwari S.K., Kumar V., Huczko A., Oraon R., Adhikari A.D., Nayak G.C. Magical Allotropes of Carbon: Prospects and Applications. *Crit. Rev. Solid State.* 2016;41:257–317. doi: 10.1080/10408436.2015.1127206.
56. Mohammad N.S. Understanding quantum confinement in nanowires: Basics, applications and possible laws. *J. Phys. Condens. Matter.* 2014;26:1–28. doi: 10.1088/0953-8984/26/42/423202.
57. Zhu S., Zhang J., Qiao C., Tang S., Li Y., Yuan W., Li B., Tian L., Liu F., Hu R., et al. Strongly green-photoluminescent graphene quantum dots for bioimaging applications. *Chem. Commun.* 2011;47:6858–6860. doi: 10.1039/c1cc11122a.
58. Pan D., Guo L., Zhang J., Xi C., Xue Q., Huang H., Li J., Zhang Z., Yu W., Chen Z., et al. Cutting sp<sup>2</sup> clusters in graphene sheets into colloidal graphene quantum dots with strong green fluorescence. *J. Mater. Chem.* 2012;22:3314–3318. doi: 10.1039/c2jm16005f.
59. Dong Y., Chen C., Zheng X., Gao L., Cui Z., Yang H., Guo C., Chi H., Li C.M. One-step and high yield simultaneous preparation of single- and multi-layer graphene quantum dots from CX-72 carbon black. *J. Mater. Chem.* 2012;22:8764–8766. doi: 10.1039/c2jm30658a.
60. Zhu S., Zhang J., Tang S., Qiao C., Wang L., Wang H., Liu X., Li B., Li Y., Yu W., et al. Surface Chemistry Routes to Modulate the Photoluminescence of Graphene Quantum Dots: From Fluorescence Mechanism to Up-Conversion Bioimaging Applications. *Adv. Funct. Mater.* 2012;22:4732–4740. doi: 10.1002/adfm.201201499.
61. Javanbakht S., Namazi H. Doxorubicin loaded carboxymethyl cellulose/graphene quantum dot nanocomposite hydrogel films as a potential anticancer drug delivery system. *Mater. Sci. Eng. C.* 2018;87:50–59. doi: 10.1016/j.msec.2018.02.010.
62. Vilela C., Pinto R.J.B., Pinto S., Marques P., Sofia da Rocha Freire Barros A.S.C. Polysaccharides-Based Hybrids with Graphene. In: Navard P., editor. *Polysaccharide Based Hybrid Materials Metals and Metal Oxides, Graphene and Carbon Nanotubes.* 1st ed. Springer Nature Switzerland; Cham, Switzerland: 2018. pp. 69–93.
63. Li H., Zhang H. The isolated-pentagon rule and nice substructures in fullerenes. *Ars Math. Contemp.* 2018;15:487–497. doi: 10.26493/1855-3974.1359.b33.
64. Hernández E., Ordejón P., Terrones H. Fullerene growth and the role of nonclassical isomers. *Phys. Rev. B.* 2001;63:193403.1–193403.4. doi: 10.1103/PhysRevB.63.193403.
65. Fujine K., Ishida T., Aihara J. Localization energies for graphite and fullerenes. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2001;3:3917–3919. doi: 10.1039/b103886a.
66. Mojica M., Alonso J.A., Méndez F. Synthesis of fullerenes. *J. Phys. Org. Chem.* 2013;26:526–539. doi: 10.1002/poc.3121.
67. Vandrovčova M., Vacík J., Svorčík V., Šlepíčka P., Kasálková N., Vorlíček V., Lavrentiev V., Voseček V., Grausová L., Lisa V., et al. Fullerene C<sub>60</sub> and hybrid C<sub>60</sub>/Ti films as substrates for

- adhesion and growth of bone cells. *Phys. Status Solidi (a)* 2008;205:2252–2261. doi: 10.1002/pssa.200879730.
68. Kawase T., Tanaka K., Seirai Y., Shiono N., Oda M. Complexation of Carbon Nanorings with Fullerenes: Supramolecular Dynamics and Structural Tuning for a Fullerene Sensor. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2003;42:5597–5600. doi: 10.1002/anie.200352033.
69. Levi N., Hantgan R.R., Lively M.O., Carroll D.L., Prasad G.L. C<sub>60</sub>-Fullerenes: Detection of intracellular photoluminescence and lack of cytotoxic effects. *J. Nanobiotechnol.* 2006;4:14. doi: 10.1186/1477-3155-4-14.
70. Yamakoshi Y., Umezawa N., Ryu A., Arakane K., Miyata N., Goda Y., Masumizu T., Nagano T. Active Oxygen Species Generated from Photoexcited Fullerene (C<sub>60</sub>) as Potential Medicines: O<sub>2</sub>• versus 1O<sub>2</sub>. *J. Am. Chem. Soc.* 2003;125:12803–12809. doi: 10.1021/ja0355574.
71. Tang Y.J., Ashcroft J.M., Chen D., Min G., Kim C.-H., Murkhejee B., Larabell C., Keasling J.D., Chen F.F. Charge-associated effects of fullerene derivatives on microbial structural integrity and central metabolism. *Nano Lett.* 2007;7:754–760. doi: 10.1021/nl063020t.
72. Shin S.E., Choi H.J., Hwang J.Y., Bae D.H. Strengthening behavior of carbon/metal nanocomposites. *Sci. Rep.* 2015;6:16114. doi: 10.1038/srep16114.
73. Tjong S.C. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced both carbon nanotubes and graphene nanosheets. *Mater. Sci. Eng. R.* 2013;74:281–350. doi: 10.1016/j.mser.2013.08.001.
74. Robles-Hernandez F.C., Calderon H.A. Nanostructured metal composites reinforced with fullerenes. *JOM.* 2010;62:63–68. doi: 10.1007/s11837-010-0034-6.
75. Shpilevsky E.M., Penyazkov O.G., Filatov S.A., Shilagardi G., Tuvshintur P., Timur-Bator D., Ulam-Orgikh D. Modification of materials by carbon nanoparticles. *Solid State Phenom.* 2018;271:70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.271.70.
76. Shpilevsky E.M., Filatov S.A., Shilagardi G., Ulam-Orgikh D., Tuvshintur P., Otgonbaatar M. Properties of Metal-Fullerene Composites. *Solid State Phenom.* 2018;288:124–129. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.288.124.
77. Nasibulin A.G., Pikhitsa P.V., Jiang H., Brown D.P., Krashennnikov A.V., Anisimov A.S., Queipo P., Moisala A., Gonzalez D., Lientschnig G., et al. A novel hybrid carbon material. *Nat. Nanotechnol.* 2007;2:156–161. doi: 10.1038/nnano.2007.37.
78. Savi P., Giorelli M., Quaranta S. Multi-Walled Carbon Nanotubes Composites for Microwave Absorbing Applications. *Appl. Sci.* 2019;9:851. doi: 10.3390/app9050851.
79. Scarselli M., Castrucci P., De Crescenzi M. Electronic and optoelectronic nano-devices based on carbon nanotubes. *J. Phys. Condens. Matter.* 2012;24:313202. doi: 10.1088/0953-8984/24/31/313202.



80. Gupta S., Murthy C.N., Ratna Prabha C. Recent advances in carbon nanotube based electrochemical biosensors. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018;108:687–703. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.038.
81. Gately R.D. Filling of carbon nanotubes and nanofibres. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2015;6:508–516. doi: 10.3762/bjnano.6.53.
82. Slepíčka P., Malá Z., Rimpelová S., Slepíčková Kasálková N., Švorčík V. Plasma treatment of the surface of poly(hydroxybutyrate) foil and non-woven fabric and assessment of the biological properties. *React. Funct. Polym.* 2015;95:71–79. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2015.08.010.
83. Slepíčková Kasálková N., Váchová K., Slepíčka P., Švorčík V. Surface Plasma Modification and Characterization of Poly(ethylene-alt-tetrafluoroethylene) *Chem. Listy.* 2016;110:279–283.
84. Kolská Z., Řezníčková A., Nagyová M., Slepíčková Kasálková N., Sajdl P., Slepíčka P., Švorčík V. Plasma activated polymers grafted with cysteamine improving surfaces cytocompatibility. *Polym. Degrad. Stab.* 2014;101:1–9. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.024.
85. Slepíčková Kasálková N., Slepíčka P., Bačáková L., Sajd P., Švorčík V. Biocompatibility of plasma nanostructured biopolymers. *Nucl. Instrum. Methods B.* 2013;307:642–646. doi: 10.1016/j.nimb.2012.10.035.
86. Tran P.A., Zhang L., Webster T.J. Carbon nanofibers and carbon nanotubes in regenerative medicine. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2009;61:1097–1114. doi: 10.1016/j.addr.2009.07.010.
87. Ali M.S., French T.A., Hastings G.W., Rae T., Rushton N., Ross E.R.S., Wynn-Jones C.H. Carbon fibre composite bone plates. *J. Bone Jt. Surg.* 1990;72:586–591. doi: 10.1302/0301-620X.72B4.2380209.
88. Pimberton D.J., McKibbin B., Savage R., Tayton K., Stuart D. Carbon-Fibre Reinforced Plates for Problem Fractures. *J. Bone Jt. Surg.* 1992;74:88–92. doi: 10.1302/0301-620X.74B1.1732273.
89. Dikbas I., Tanalp J. An Overview of Clinical Studies on Fiber Post Systems. *Sci. World J.* 2013;2013:171380. doi: 10.1155/2013/171380.
90. Huang Y., Miao Y., Ji S., Tjiu W., Liu T. Electrospun Carbon Nanofibers Decorated with Ag–Pt Bimetallic Nanoparticles for Selective Detection of Dopamine. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2014;6:12449–12456. doi: 10.1021/am502344p.
91. Tavangarian F., Li Y. Carbon nanostructures as nerve scaffolds for repairing large gaps in severed nerves. *Ceram. Int.* 2012;38:6075–6090. doi: 10.1016/j.ceramint.2012.05.038.
92. Petersen R. Carbon Fiber Biocompatibility for Implants. *Fibers.* 2016;4:1. doi: 10.3390/fib4010001.
93. Callister W.D. *Materials Science and Engineering.* 4th ed. John Wiley & Sons; New York, NY, USA: 1997. p. 2.
94. Chawla K.K. *Composite Materials.* 2nd ed. Springer; New York, NY, USA: 1998. pp. 252–277.
95. Berglund L.A. Thermoplastic Resins. In: Peters S.T., editor. *Handbook of Composites.* 2nd ed. Chapman and Hall; New York, NY, USA: 1998. p. 122.

96. Thostenson E.T., Ren Z., Chou T.-W. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: A review. *Compos. Sci. Technol.* 2001;61:1899–1912. doi: 10.1016/S0266-3538(01)00094-X.
97. Asaro L., Villanueva S., Alvarez V., Manfredi L.B., Rodríguez E.S. Fire performance of composites made from carbon/ phenolic prepregs with nanoclays. *J. Compos. Mater.* 2017;51:3515–3524. doi: 10.1177/0021998316688772.
98. Chen X., Xia J., Peng J., Li W., Xie S. Carbon-nanotube metal-matrix composites prepared by electroless plating. *Compos. Sci. Technol.* 2000;60:301–306. doi: 10.1016/S0266-3538(99)00127-X.
99. Chung D.D.L. *Carbon Fiber Composites. Volume 7.* Butterworth-Heinemann; Newton, MA, USA: 1994. pp. 125–144.
100. Rawal S.P. Metal-matrix composites for space applications. *JOM.* 2001;53:14–17. doi: 10.1007/s11837-001-0139-z.
101. Harris P.J.F. Carbon nanotube composites. *Int. Mater. Rev.* 2004;49:31–43. doi: 10.1179/095066004225010505.
102. Gullapalli S., Wong M.S. Nanotechnology: A guide to nano-objects. *Chem. Eng. Prog.* 2011;107:28–32.
103. Maa P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Compos. Part A.* 2010;41:1345–1367. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.07.003.
104. Xie X.-L., Maia Y.-W., Zhou X.-P. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Mater. Sci. Eng. R-Rep.* 2005;49:89–112. doi: 10.1016/j.mser.2005.04.002.
105. Shirvanimoghaddam K., Abolhasani M.M., Poliseti B., Naebe M. Periodical patterning of a fully tailored nanocarbon on CNT for fabrication of thermoplastic composites. *Compos. Part A.* 2018;107:304–314. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.01.015.
106. Seyhan A.T., Tanoglu M., Schulte K. Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. *Eng. Fract. Mech.* 2008;75:5151–5516. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.08.003.
107. Roy S., Petrova R.S., Mitra S. Effect of carbon nanotube (CNT) functionalization in epoxy-CNT composites. *Nanotechnol. Rev.* 2018;7:475–485. doi: 10.1515/ntrev-2018-0068.
108. Rafiee R., Pourazizi R. Influence of CNT functionalization on the interphase region between CNT and polymer. *Comput. Mater. Sci.* 2015;96:573–578. doi: 10.1016/j.commatsci.2014.03.056.
109. Shirvanimoghaddam K., Balaji K.V., Yadav R., Zabihi O., Ahmadi M., Adetunji P., Naebe M. Balancing the toughness and strength in polypropylene composites. *Compos. Part B.* 2021;223:109121. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109121.

110. Ahmadabadi V.G., Shirvanimoghaddam K., Kerr R., Showkath N., Naebe M. Structure-rate performance relationship in Si nanoparticles-carbon nanofiber composite as flexible anode for lithium-ion batteries. *Electrochim. Acta.* 2020;330:135232. doi: 10.1016/j.electacta.2019.135232.
111. Mykhailiv O., Zubyk H., Plonska-Brzezinska M.E. Carbon nano-onions: Unique carbon nanostructures with fascinating properties and their potential applications. *Inorg. Chim. Acta.* 2017;468:49–66. doi: 10.1016/j.ica.2017.07.021.
112. Aref A.R., Chen S.-W., Rajagopalan R., Randall C. Bimodal porous carbon cathode and prelithiated coalesced carbon onion anode for ultrahigh power energy efficient lithium ion capacitors. *Carbon.* 2019;152:89–97. doi: 10.1016/j.carbon.2019.05.074.
113. Hou S., Chung D.-H., Lin T. High-yield synthesis of carbon nano-onions in counterflow diffusion flames. *Carbon.* 2009;47:938–947. doi: 10.1016/j.carbon.2008.11.054.
114. Chung D.-H., Lin T.-H., Hou S.S. Flame synthesis of carbon nano-onions enhanced by acoustic modulation. *Nanotechnology.* 2010;21:435604. doi: 10.1088/0957-4484/21/43/435604.
115. Chen X.H., Deng F.M., Wang J.X., Yang H.S., Wu G.T., Zhang X.B., Peng J.C., Li W.Z. New method of carbon onion growth by radio-frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Chem. Phys. Lett.* 2001;336:201–204. doi: 10.1016/S0009-2614(01)00085-9.
116. Camisasca A., Giordaniac S. Carbon nano-onions in biomedical applications: Promising theranostic agents. *Inorg. Chim. Acta.* 2017;468:67–76. doi: 10.1016/j.ica.2017.06.009.
117. Bobrowska D.M., Brzezinski K., Plonska-Brzezinska M.E. PEGylated Carbon Nano-onions Composite as a Carrier of Polyphenolic Compounds: A Promising System for Medical Applications and Biological Sensors. *Colloid Interface Sci. Commun.* 2017;21:6–9. doi: 10.1016/j.colcom.2017.10.004.
118. Krokosz A., Lichota A., Nowak K.E., Grebowski J. Carbon nanoparticles as possible radioprotectors in biological systems. *Radiat. Phys. Chem.* 2016;128:143–150. doi: 10.1016/j.radphyschem.2016.07.006.
119. Xu B., Yue S., Qiao N., Chu M., Wei G. Easy preparation of nitrogen-doped porous carbon nanospheres and their application in supercapacitors. *Mater. Lett.* 2014;131:49–52. doi: 10.1016/j.matlet.2014.05.164.
120. Choi C.H., Park S.H., Chung M.W., Woo S.I. Easy and controlled synthesis of nitrogen-doped carbon. *Carbon.* 2013;55:98–107. doi: 10.1016/j.carbon.2012.12.014.
121. Švorčík V., Makajová Z., Slepíčková Kasálková N., Kolská Z., Žáková P., Karpíšková J., Stibor I., Slepíčka P. Cytocompatibility of polymers grafted by activated carbon nano-particles. *Carbon.* 2014;69:361–371. doi: 10.1016/j.carbon.2013.12.037.
122. Žáková P., Slepíčková Kasálková N., Kolská Z., Leitner J., Karpíšková J., Stibor I., Slepíčka P., Švorčík V. Cytocompatibility of amine functionalized carbon nanoparticles grafted on polyethylene. *Mater. Sci. Eng. C.* 2016;60:294–401. doi: 10.1016/j.msec.2015.11.058.

123. Žáková P., Slepíčková Kasálková N., Slepíčka P., Kolská Z., Karpíšková J., Stibor I., Švorčík V. Cytocompatibility of polyethylene grafted with triethylenetetramine functionalized carbon nanoparticles. *Appl. Surf. Sci.* 2017;422:809–816. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.06.089.
124. Haque A., Narayan J. Electron field emission from Q-carbon. *Diam. Relat. Mater.* 2018;86:71–78. doi: 10.1016/j.diamond.2018.04.008.
125. Yoshinaka H., Inubushi S., Wakita T., Yokoya T., Muraoka Y. Formation of Q-carbon by adjusting sp<sup>3</sup> content in diamond-like carbon films and laser energy density of pulsed laser annealing. *Carbon.* 2020;167:504–511. doi: 10.1016/j.carbon.2020.06.025.
126. Narayan J., Bhaumik A. Q-carbon discovery and formation of single-crystal diamond nano- and microneedles and thin films. *Mater. Res. Lett.* 2016;4:118–126. doi: 10.1080/21663831.2015.1126865.
127. Sachan R., Bhaumik A., Pant P., Prater J., Narayan J. Diamond film growth by HFCVD on Q-carbon seeded substrate. *Carbon.* 2019;141:182–189. doi: 10.1016/j.carbon.2018.09.058.
128. Narayan J., Gupta S., Bhaumik A., Sachan R., Cellini F., Riedo E. Q-carbon harder than diamond. *MRS Commun.* 2018;8:428–436. doi: 10.1557/mrc.2018.35.
129. Narayan J., Bhaumik A. Novel phase of carbon, ferromagnetism, and conversion into diamond. *J. Appl. Phys.* 2015;118:215303-1–215303-12. doi: 10.1063/1.4936595.
130. Narayan J., Bhaumik A., Gupta S., Haque A., Sachan R. Progress in Q-carbon and related materials with extraordinary properties. *Mater. Res. Lett.* 2018;6:353–364. doi: 10.1080/21663831.2018.1458753.
131. Bhaumik A., Nori S., Sachan R., Gupta S., Kumar D., Majumdar A.K., Narayan J. Room-Temperature Ferromagnetism and Extraordinary Hall Effect in Nanostructured Q-Carbon: Implications for Potential Spintronic Devices. *ACS Appl. Nano Mater.* 2018;1:807–819. doi: 10.1021/acsanm.7b00253.
132. Sachan R., Gupta S., Narayan J. Nonequilibrium Structural Evolution of Q-Carbon and Interfaces. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020;12:1330–1338. doi: 10.1021/acsnami.9b17428.
133. Bhaumik A., Sachan R., Narayan J. A novel high-temperature carbon-based superconductor: B-doped Q-carbon. *J. Appl. Phys.* 2017;122:045301-2–045301-15. doi: 10.1063/1.4994787.
134. Haque A., Pant P., Narayan J. Large-area diamond thin film on Q-carbon coated crystalline sapphire by HFCVD. *J. Cryst. Growth.* 2018;504:17–25. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2018.09.036.
135. Gupta S., Sachan R., Bhaumik A., Narayan J. Enhanced mechanical properties of Q-carbon nanocomposites by nanosecond pulsed laser annealing. *Nanotechnology.* 2018;29:45LT02. doi: 10.1088/1361-6528/aadd75.
136. Joshi P., Gupta S., Haque A., Narayan J. Fabrication of ultrahard Q-carbon nanocoatings on AISI 304 and 316 stainless steels and subsequent formation of high-quality diamond films. *Diam. Relat. Mater.* 2020;104:107742. doi: 10.1016/j.diamond.2020.107742.

137. Lee Y.J., Jung J.C., Park S., Seo J.G., Baeck S.-H., Yoon J.R., Yi J., Song I.K. Effect of preparation method on electrochemical property of Mn-doped carbon aerogel for supercapacitor. *Curr. Appl. Phys.* 2011;11:1–5. doi: 10.1016/j.cap.2010.06.001.
138. Alex A.S., Lekshmi M.S.A., Sekkar V., John B., Gouri C., Ilangovan S.A. Microporous carbon aerogel prepared through ambient pressure drying route as anode material for lithium ion cells. *Polym. Adv. Technol.* 2017;28:1945–1950. doi: 10.1002/pat.4085.
139. Hanzawa Y., Hatori H., Yoshizawa N., Yamada Y. Structural changes in carbon aerogels with high temperature treatment. *Carbon.* 2002;40:575–581. doi: 10.1016/S0008-6223(01)00150-6.
140. Lai F., Huang Y., Zuo L., Gu H., Miao Y.-E., Liu T. Electrospun nanofiber-supported carbon aerogel as a versatile platform toward asymmetric supercapacitors. *J. Mater. Chem. A.* 2016;4:15861–15869. doi: 10.1039/C6TA04797A.
141. Zhang S.Q., Wang J., Shen J., Deng Z.S., Lai Z.Q., Zhou B., Attia S.M., Chen L.Y. The investigation of the adsorption character. *Nanostruct. Mater.* 1999;11:375–381. doi: 10.1016/S0965-9773(99)00054-9.
142. Sun W., Du A., Gao G., Shen J., Wu G. Graphene-templated carbon aerogels combining with ultra-high electrical conductivity and ultra-low thermal conductivity. *Microporous Mesoporous Mater.* 2017;253:71–79. doi: 10.1016/j.micromeso.2017.06.044.
143. Song P., Cui J., Di J., Liu D., Xu M., Tang B., Zeng Q., Xiong J., Wang C., He Q., et al. Carbon Microtube Aerogel Derived from Kapok Fiber: An Efficient and Recyclable Sorbent for Oils and Organic Solvents. *ACS Nano.* 2020;14:595–602. doi: 10.1021/acsnano.9b07063.
144. Mecklenburg M., Schuchardt A., Mishra J.K., Kaps S., Adelung R., Lotnyk A., Kienle L., Schulte K. Aerographite: Ultra Lightweight, Flexible Nanowall, Carbon Microtube Material with Outstanding Mechanical Performance. *Adv. Mater.* 2012;24:3486–3490. doi: 10.1002/adma.201200491.
145. Ashrafiyan O., Saremi M., Pakseresht A., Ghasali E. Oxidation-Protective Coatings for Carbon-Carbon Composites. In: Pakseresht A.H., editor. *Production, Properties, and Applications of High Temperature Coatings.* IGI Global; Hershey, PA, USA: 2018. pp. 429–446.
146. Zeng Y., Xiong X., Guo S., Zhang W.-Z. SiC/SiC–YAG–YSZ oxidation protective coatings for carbon/carbon composites. *Corros. Sci.* 2013;70:68–73. doi: 10.1016/j.corsci.2013.01.013.
147. Li C., Zhang X., Wang K., Su F., Chen C.-M., Liu F., Wu Z.-S., Ma Y. Recent advances in carbon nanostructures prepared from carbon dioxide for high-performance supercapacitors. *J. Energy Chem.* 2021;54:352–367. doi: 10.1016/j.jechem.2020.05.058.
148. Gould R.D., Kasap S., Ray A.K. Thin Films. In: Kasap S., Capper P., editors. *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials.* 2nd ed. Springer; Cham, Switzerland: 2017. pp. 659–711.

149. Shah S.I., Jaffari G.H., Yassitepe E., Ali B. Evaporation: Processes, Bulk Microstructures, and Mechanical Properties. In: Martin P.M., editor. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. 3rd ed. William Andrew Publishing; Boston, MA, USA: 2010. pp. 135–252.
150. Rossnagel S.M. Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2003;21:S74–S87. doi: 10.1116/1.1600450.
151. Lišková J., Slepícková Kasálková N., Slepíčka P., Švorčík V., Bačáková L. Heat-treated carbon coatings on poly (L-lactide) foils for tissue engineering. *Mater. Sci. Eng. C*. 2019;100:117–128. doi: 10.1016/j.msec.2019.02.105.
152. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Mater. Sci. Eng. R*. 2002;37:129–281. doi: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
153. Voevodin A.A., Donley M.S. Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition: A critical review. *Surf. Coat. Technol.* 1996;82:199–213. doi: 10.1016/0257-8972(95)02734-3.
154. Roy R.K., Lee K.-R. Biomedical Applications of Diamond-Like Carbon Coatings: A Review. *J. Biomed. Mater. Res. B*. 2007;83:72–84. doi: 10.1002/jbm.b.30768.
155. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films—From first experiments to worldwide applications. *Surf. Coat. Technol.* 2014;242:214–225. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031.
156. Rajak D.K., Kumar A., Behera A., Menezes P.L. Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification, Properties, and Applications. *Appl. Sci.* 2021;11:4445. doi: 10.3390/app11104445.
157. Lifshitz Y. Hydrogen-free amorphous carbon films: Correlation between growth conditions and properties. *Diam. Relat. Mater.* 1996;5:388–400. doi: 10.1016/0925-9635(95)00445-9.
158. Robertson J. Hard amorphous (diamond-like) carbons. *Prog. Solid State Chem.* 1991;21:199–333. doi: 10.1016/0079-6786(91)90002-H.
159. Lettington A.H. Application of diamond-like carbon thin films. *Carbon*. 1998;36:555–560. doi: 10.1016/S0008-6223(98)00062-1.
160. Ohgoe Y., Hirakuri K.K., Saitoh H., Nakahigashi T., Ohtake N., Hirata A., Kanda K., Hiratsuka M., Fukui Y. Classification of DLC films in terms of biological response. *Surf. Coat. Technol.* 2012;207:350–354. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.018.
161. Hubáček T., Siegel J., Khalili R., Slepícková Kasálková N., Švorčík V. Carbon coatings on polymers and their biocompatibility. *Appl. Surf. Sci.* 2013;275:43–48. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.127.
162. Lifshitz Y. Diamond-like carbon—Present status. *Diam. Relat. Mater.* 1999;8:1659–1676. doi: 10.1016/S0925-9635(99)00087-4.
163. Fryčková O., Hubáček T., Slepíčka P., Švorčík V. Characterization and cytocompatibility of carbon films. *J. Nanosci.* 2012;12:6724–6730. doi: 10.1166/jnn.2012.4558.

164. Schwan J., Ulrich S., Roth H., Ehrhardt H., Silva S.R.P., Robertson J., Samlenski R., Brenn R. Tetrahedral amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering and dc ion plating. *J. Appl. Phys.* 1996;79:1416–1422. doi: 10.1063/1.360979.
165. Schelz S., Richmond T., Kania P., Oelhafen P., Güntherodt H.J. Electronic and atomic structure of evaporated carbon films. *Surf. Sci.* 1996;359:227–236. doi: 10.1016/0039-6028(96)00364-0.
166. Chester D.W., Klemic J.F., Stern E., Sigwortha F.J., Klemic K.G. Holey carbon micro-arrays for transmission electron microscopy: A microcontact printing approach. *Ultramicroscopy.* 2007;107:685–691. doi: 10.1016/j.ultramic.2007.01.004.
167. Slepíčka P., Hurtuková K., Fajstavr D., Slepíčková Kasálková N., Lyutakov O., Švorčík V. Carbon-gold nanocomposite induced by unique high energy laser single-shot annealing. *Mater. Lett.* 2021;301:130256. doi: 10.1016/j.matlet.2021.130256.
168. Cao, W, Cudney, HH and Waser R. “Smart materials and structures.” *Proc Natl Acad Sci* 96(1999): 8330–8331
169. Aizawa, S, Kakizawa T and Higasino M. “Case studies of smart materials for civil structures.” *Smart Mat Struct* 7(1998):617
170. Newnham, R. “Molecular mechanisms in smart materials.” *MRS Bulletin* 22(2013): 20-34
171. Mallory Piezoelectric Transducers, SC Series SC628A-MALY (n.d.)
172. Zhong Xun, K, Joanne E, Yong L and Chee Kai C. “3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing.” *Vir and Phy Proto* 10(2015)
173. Piezo-ceramic Sensors and Sensor Applications. (n.d.)
174. Song, G, Sethi V and Li H. “Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review.” *Eng Strut* 28(2006): 1513-1524
175. Wei, Z, Sandstrom R and Miyazaki S. “Shape memory materials and hybrid composites for smart systems: Part II Shape-memory hybrid composites.” *J Mat Sci* 33(1998): 3763-3783.
176. Shape Memory Medical, Inc. (n.d.).
177. Song, Y, Wei W and Qu X. “Colorimetric biosensing using smart materials.” *Adv Mat* (2011)
178. Leng, J, Lu H, Liu Y and Huang W, et al. “Shape-memory polymers-a class of novel smart materials.” *MRS Bulletin* 34(2009): 848-855
179. Rybak, A, Boiteux G, Melis, F and Seytre G. “Conductive polymer composites based on metallic nanofiller as smart materials for current limiting devices.” *Comp Sci and Tech* 70(2010): 410
180. Lampert, C. M. “Chromogenic smart materials.” *Mat Tod* 7(2004): 28-35
181. Pei, Q and Inganäs O. “Conjugated polymers as smart materials, gas sensors and actuators using bending beams.” *Syn Meta* 57 (1993): 3730-3735

182. Peng, H, X Sun, F Cai and X Chen. "Electrochromatic carbon nanotube/polydiacetylene nanocomposite fibres." *Nat Nanotechnol* 4(2009): 738-741
183. Yarimaga, O, Jaworski J and Bora Y, J. "Polydiacetylenes: Supramolecular smart materials with a structural hierarchy for sensing, imaging and display applications." *Chem Comm* 19(2012)
184. Xie, P and Zhang R. "Liquid crystal elastomers, networks and gels: Advanced smart materials." *J of Mat Chem* 26(2005)
185. Luo, L, C Wilhelm, A Sun and CP Grey. "Poly (diiododiacetylene): Preparation, isolation and full characterization of a very simple poly(diacetylene)." *J Am Chem Soc* 130(2008): 7702-7709
186. Wang, ZL and Kang ZC. "Structural evolution and structure analysis." *Fun and Struct Mat* (2002)
187. Lahann, J and Langer R. "Smart materials with dynamically controllable surfaces." *MRS Bulletin*, 30(2005): 185-188
188. Fairman, R and Åkerfeldt KS. "Peptides as novel smart materials." *Curr Opi in Struct Bio* 15(2005): 453-463
189. Raviv, D. 2014. "Active printed materials for complex self- evolving deformations." *Sci Rep* 4(2014): 7422
190. Ge, Q. 2014. "Active origami by 4D printing." *Smart Mat and Struct* 23(2012): 1-15