

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Πειραιά
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών (Σ.Τ.Ε.Φ.)
Τμήμα Κλωστοϋφαντουργίας

**Υλικά “αλλαγής φάσης” και υλικά “μνήμης σχήματος”:
Τεχνολογία, Ιδιότητες/Χαρακτηριστικά και
Χρήσεις στην Κλωστοϋφαντουργία**

Ευσταθίου Πάλλη

Εισηγητής: Δρ Αντώνιος Πριμέντας

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2013

ΣΥΝΟΨΗ

Η επινόηση και η δημιουργία νέων “έξυπνων” εξειδικευμένων υλικών που σχετίζονται με την αλλαγή φάσης και τη μνήμη σχήματος συνοδεύεται από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στη σύγχρονη κλωστοϋφαντουργική τεχνολογία.

Με την παρούσα εργασία αποτολμάται μια πρώτη τεχνολογική προσέγγιση τόσο στα υλικά φάσης και στα υλικά μνήμης σχήματος όσο και στις ιδιότητες/χαρακτηριστικά τους, συνοδευόμενη με αναφορές στις ποικίλες εφαρμογές τους στην κλωστοϋφαντουργία.

ABSTRACT

The invention and the creation of smart “phase change” and “shape memory” materials is accompanied by a wide range of applications in modern textile technology.

The aim of the present dissertation is to attempt an approach to the technology of “phase change” and “shape memory” materials as well as their properties and characteristics, accompanied by a review of the various applications in textiles.

Η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη καθοριστική συμβολή του καθηγητή Δρ. Αντώνιου Πριμέντα που με την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του σύμβαλε τα μέγιστα για την εκπόνηση της διπλωματικής. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Εισαγωγή.....	5
1.1 Έξυπνα συστήματα.....	6
2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ PCM.....	6
2.1 Εισαγωγή στα υλικά αλλαγής φάσης.....	6
2.2 Θερμική εξισορρόπηση και φυσιοθερμική άνεση.....	7
2.3 Τεχνολογία αλλαγής φάσης.....	8
2.4 Τα PCM στα υφάσματα.....	8
2.4.1 Κατεργασία υφασμάτων με μικροκάψουλες PCM.....	9
2.4.2 Θερμική απόδοση (ή πλεονεκτήματα χρήσης PCM).....	10
2.4.3 Μέθοδοι δοκιμών.....	12
2.4.4 Τομείς όπου τα υφάσματα με PCM βρίσκουν εφαρμογή.....	13
2.5 Έξυπνα υφάσματα με PCM.....	14
2.5.1 Βασικές πληροφορίες για τα υλικά αλλαγής φάσης.....	15
2.5.2 Ιδιότητες αλλαγής φάσης των γραμμικών αλκυλό-υδρογονανθράκων.....	16
2.6 Υφάσματα που περιέχουν PCM.....	18
2.6.1 Ιστορικό υπόβαθρο.....	19
2.6.2 Λειτουργία της δομής των υφασμάτων με PCM.....	19
2.6.3 Η απόδοση των PCM στην ένδυση.....	21
2.6.4 Παραγωγή υφασμάτων που περιέχουν μικροκάψουλες PCM.....	22
2.6.5 Εφαρμογές των υφασμάτων που περιέχουν PCM.....	27
3. ΥΛΙΚΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.....	29
3.1 Εισαγωγή στα υλικά μνήμης σχήματος.....	29
3.2 Ιστορικό υπόβαθρο στα υλικά μνήμης σχήματος.....	30
3.3 Τα υλικά μνήμης σχήματος στα υφάσματα.....	30
3.3.1 Κράματα μνήμης σχήματος.....	31
3.3.2 Πολυμερή μνήμης σχήματος.....	32
3.3.3 Υλικά αλλαγής χρώματος.....	32
3.4 Τεχνικές απαιτήσεις για υφάσματα και ρούχα αλλαγής σχήματος.....	33
3.4.1 Αλλαγή σχήματος με εφαρμογή ερεθίσματος.....	33
3.4.2 Προβλήματα σχετικά με την επεξεργασία.....	34
3.4.3 Αντοχή των φαινομένων αλλαγής σχήματος.....	34
3.4.4 Αισθητική υποβάθμιση.....	34
3.5.5 Απαιτήσεις για τη μόδα και τα είδη ένδυσης.....	34
3.5 Παραγωγή υφασμάτων και ρουχισμού με υλικά μνήμης σχήματος.....	35
3.6.1 Εξώθηση των SMP.....	35
3.6.2 Σχηματισμός νήματος και υφασμάτων.....	36
3.6.3 Προγραμματισμός σχήματος.....	36
3.6.4 Επίδραση του SMP σε υφάσματα.....	37
3.7 Γενικά πεδία εφαρμογής.....	39
3.7.1 Ιατρικά κλωστοϋφαντουργικά.....	39
3.7.2 Υπαιθρια ένδυση.....	39
3.7.3 Καθημερινή ένδυση.....	40
3.7.4 Αθλητική ένδυση.....	40
4. Επίλογος.....	40

1 Εισαγωγή

Σε ένα κόσμο όπου τα πάντα κινούνται γρήγορα, σε μια κοινωνία τεχνολογικής ανάπτυξης, δημιουργούνται αυτόματα οι προϋποθέσεις για την αναζήτηση και ανάπτυξη υλικών προσαρμόσιμων στις αυξανόμενες απαιτήσεις του ανθρώπου.

Σε μια αγορά όπου οι καταναλωτές γίνονται όλο και περισσότερο παράτολμοι σε περιέργεια και γούστο και με ένα όλο και αυξανόμενο εισόδημα, οδηγούν τη βιομηχανία σχεδιασμού σε διαφορετικές επιδιώξεις. Υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε προϊόντα που δεν είναι μόνο αισθητικά και οπτικά καλοφτιαγμένα, αλλά που μπορούν επίσης να ξαφνιάσουν, να διεγείρουν και να διασκεδάσουν τους χρήστες/φορείς. Ο τρόπος ζωής αλλάζει επίσης, με λιγότερο χρόνο στη διάθεσή μας, αξεσουάρ και προϊόντα που διευκολύνουν τις συνήθειες ασχολίες ή μας βοηθούν να εξοικονομήσουμε χρόνο γίνονται πιο ελκυστικά. Περσίδες που ανοιγοκλείνουν αυτόνομα για να προσαρμόσουν τη ποσότητα φωτός ή θερμότητας σε ένα δωμάτιο ή γραφείο, ταπετσαρίες που αλλάζουν χρώμα και σχήμα ανάλογα με τη διάθεση, υφάσματα που μπορούν να σιδερωθούν μόνα τους είναι παραδείγματα που απεικονίζουν την ικανότητα αυτοδιαχείρισης μερικών προϊόντων που έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των καταναλωτών και της βιομηχανίας.

Η τεχνολογική πρόοδος έχει κάνει αυτές τις καινοτομίες δυνατές. Τα πρόσφατα χρόνια, υπάρχει αξιοσημείωτο ενδιαφέρον στον μη στατικό σχεδιασμό, στα υφάσματα, στη μόδα καθώς και την υφαντική τέχνη. Με την έλευση νέων υλικών όπως οι χρωστικές βαφές που αλλάζουν χρώμα με κάποιο ερέθισμα, τα υλικά αλλαγής φάσης, που αλλάζουν θερμοκρασία διαμέσου του περιβάλλοντος τους και τα κράματα μνήμης σχήματος και τα πολυμερή, η σχεδιαστική αντίληψη μπορεί να γίνει περισσότερο δυναμική και διαδραστική με το χρήστη ή φορέα. Βρισκόμαστε σε μια εποχή Έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών, που με το πάτημα ενός κουμπιού ή με μια μεταβολή στο περιβάλλον, μπορούν να αλλάξουν σχήμα, χρώμα, σχέδιο και υφή. Η αντίληψη αυτή έχει διερευνηθεί στη κοινότητα της μόδας π.χ. με υφάσματα που αλλάζουν χρώμα και με σχεδιαστές μόδας που ενσωματώνουν σύρματα με μνήμη σχήματος.

Η δυναμική και διαδραστική σχεδίαση είναι αποτέλεσμα της διεπιστημονικής συνεργασίας κυρίως μεταξύ σχεδιαστών και τεχνολόγων. Η *Corpo Nove*¹ (Ιταλία) έχει ήδη επιχειρήσει να χρησιμοποιήσει ένα κράμα μνήμης σχήματος σε ένα πουκάμισο που μπορεί να διπλώνει τα μανίκια του όταν το σώμα ζεσταθεί. Όλο και περισσότερες πολυεθνικές εταιρείες, όπως η *Philips* και η *Siemens*, που αρχικά ήταν περισσότερο τεχνολογικές παρά σχεδιαστικές, επενδύουν σε σχεδιαστικά/τεχνολογικά προϊόντα. Οι σχεδιαστές σταδιακά αλλάζοντας από παραδοσιακοί χρήστες της τεχνολογίας, έχουν τώρα μια βασική κατανόηση των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν. Αυτό οδηγεί στο να χρησιμοποιείται η σχεδίαση για ειδικές λειτουργίες σε αντίθεση με τη χρήση σε οπτικά και αισθητικά χαρακτηριστικά. Φωτοχρωμικά σχέδια που ειδοποιούν οπτικά τον φορέα σε περίπτωση υπερβολικής έκθεσης σε UV, μορφολογικές αλλαγές και αλλαγή στην υφή των υφασμάτων στο εσωτερικό ενός γραφείου, που όχι μόνο παράγουν διαφορετικά αισθητικά αποτελέσματα, αλλά επίσης παρέχουν λειτουργίες όπως να μειώνουν ή να αυξάνουν τη ροή του αέρα ή να μειώνουν το θόρυβο και τους ήχους είναι κάποια ακόμα παραδείγματα λειτουργικά σχεδιασμένης τεχνολογίας.

Με γνώμονα τα παραπάνω θα αναφερθούμε στα υλικά αλλαγής φάσης (PCM, Phase change materials) και στα υλικά μνήμης σχήματος (SMM, Shape Memory Materials), όπου και αποτελούν έξυπνα συστήματα που λειτουργούν με βάση τις ιδιότητες των υλικών τους.

¹ *Corpo Nove* Ιταλική εταιρία ένδυσης

1.1 Έξυπνα συστήματα

Έξυπνο χαρακτηρίζεται ένα σύστημα, όταν μπορεί να δεχτεί ερεθίσματα από το περιβάλλον και να αντιδράσει ή να προσαρμοστεί σε αυτά με ένα προκαθορισμένο τρόπο. Επειδή όμως η αποτελεσματική προσαρμογή ή η αντίδραση βασίζεται σε διάφορες γνωστικές διαδικασίες, όπως η αντίληψη, η μάθηση, η μνήμη, ο συλλογισμός και η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων, κανένα υλικό ή σύστημα δεν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί έξυπνο, με τα σημερινά δεδομένα. Παρόλα αυτά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχουν διάφοροι βαθμοί νοημοσύνης και να προσδώσουμε σε κάποιο υλικό ή σύστημα το χαρακτηρισμό «έξυπνο», αν και πολλές φορές γίνεται υπερβολική χρήση του όρου, ειδικά για λόγους μάρκετινγκ. Ένα έξυπνο σύστημα αποτελείται από τρία μέρη: έναν αισθητήρα (sensor), έναν επεξεργαστή (processor) και έναν ενεργοποιητή (actuator). Για παράδειγμα, η μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματος από έναν αισθητήρα μεταφέρεται στον επεξεργαστή, ο οποίος με βάση την πληροφορία που έλαβε υπολογίζει μια λύση και στέλνει μία εντολή στον ενεργοποιητή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Για να επιτευχθεί όλη αυτή η αλληλουχία ενεργειών από ένα έξυπνο ένδυμα, ένας αισθητήρας υφασμένος ή πλεγμένος με αγώγιμα νήματα, θα μπορούσε να είναι κεντημένος στην εσωτερική επιφάνεια ενός T-shirt, η επικοινωνία μεταξύ του αισθητήρα, του επεξεργαστή και του ενεργοποιητή θα μπορούσε να είναι ασύρματη ή ενσύρματη στη βάση αγώγιμων νημάτων ενσωματωμένων στην υφαντική δομή του T-shirt. Τέλος οι ενεργοποιητές θα μπορούσαν να είναι μικροσκοπικά πτερύγια τα οποία ανοίγουν και κλείνουν έτσι ώστε να επιτευχθεί απαγωγή ή όχι θερμότητας ή το σύστημα θα μπορούσε να λειτουργεί με βάση φυσικές ιδιότητες υλικών όπως τα Phase Change Materials (PCM) ή τα Shape Memory Materials (SMM). Με βάση τον προηγούμενο ορισμό, κλωστοϋφαντουργικά υλικά με εξαιρετικά μεγάλη αντοχή ή εκείνα που προσφέρουν αναπνευστικότητα, πυρανθεκτικότητα ή οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα φράγματος δεν θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν έξυπνα, ανεξάρτητα από το πόσο τεχνολογικά προηγμένα είναι.

Σύμφωνα με τον τρόπο της αντίδρασης ή προσαρμογής, τα έξυπνα συστήματα μπορούν να διαιρεθούν σε:

- Παθητικά έξυπνα συστήματα: μπορούν μόνο να αισθανθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες ή τα ερεθίσματα (δρουν μόνο σαν αισθητήρες).
- Ενεργά έξυπνα συστήματα: αισθάνονται και αντιδρούν στις συνθήκες ή τα ερεθίσματα (έχουν λειτουργίες και αισθητήρα και ενεργοποιητή).
- Πολύ έξυπνα συστήματα: μπορούν να αισθανθούν, να αντιδράσουν και να προσαρμοστούν αναλόγως, εκτελώντας μια προγραμματισμένη λειτουργία, αυτόματα ή χειροκίνητα [2].

Τα υλικά αλλαγής φάσης και μνήμης σχήματος μπορούν να θεωρηθούν πολύ έξυπνα συστήματα όπως θα δούμε παρακάτω αισθάνονται αντιδρούν και προσαρμόζονται σύμφωνα με τις συνθήκες (κυρίως περιβαλλοντολογικές).

2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ PCM

2.1 Εισαγωγή στα υλικά αλλαγής φάσης

Σαν υλικά αλλαγής φάσης (PCM) αναφερόμαστε στα υλικά αποθήκευσης θερμότητας, και τα οποία χρησιμοποιούνται στη ρύθμιση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Χρησιμοποιώντας τους χημικούς δεσμούς σαν θερμικά εμπόδια μπορούν να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν θερμότητα, όπως και να ελέγχουν την μεταφορά της θερμότητας, βρίσκοντας εφαρμογές σε οικοδομικά υλικά σε διάφορες συσκευές και σε προϊόντα

υφάσματος, στα τελευταία θα επικεντρωθούμε προσπαθώντας να εντυπώσουμε στις ιδιότητες και τις δυνατότητες που μας προσφέρουν τα υλικά αλλαγής φάσης.

Ως πρωταρχικό σκοπό του ρουχισμού δεν θα ήταν ατόπημα να αναφέρουμε την προστασία του ανθρώπου από το κρύο και την αποτροπή πτώσης της θερμοκρασίας του δέρματος που οδηγεί σε υποθερμία ειδικά όταν το περιβάλλον είναι ψυχρό. Η συμβατική θερμική μόνωση εξαρτάται από τον αέρα που παγιδεύεται στα στρώματα του ρουχισμού, όταν όμως το στρώμα αέρα γίνει λεπτότερο λόγω ανέμων ή και άλλων παραγόντων όπως όταν το ένδυμα βραχεί ή όταν ιδρώτας συσσωρεύεται σε αυτό λόγω σωματικής κόπωσης, τότε η θερμική μόνωση μειώνεται σημαντικά. Εδώ λαμβάνουν χώρα τα υλικά αλλαγής φάσης, με την χρήση της διαδραστικής μόνωσης αυξάνονται οι θερμικές ιδιότητες, αφού νερό και η συμπίεση του αέρα δεν παίζουν κανέναν ρόλο στις μονωτικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

Η τεχνολογία αλλαγής φάσης σε υφάσματα σημαίνει την ενσωμάτωση μικροκάψουλων PCM μέσα στις δομές του υφάσματος. Με τη χρήση PCM βελτιώνεται η θερμική απόδοση του υφάσματος. Τα υλικά αλλαγής φάσης αποθηκεύουν ενέργεια, όταν αλλάζουν από στερεό σε υγρό και την αποδίδουν, όταν αλλάζουν ξανά από υγρό σε στερεό. Το ιδανικότερο θα ήταν εάν η περίσσια θερμότητα που παράγετε να μπορούσε άμεσα να αποθηκευτεί κάπου μέσα στο ρουχισμό και στη συνέχεια, ανάλογα με τις απαιτήσεις, να μπορούσε να αποδοθεί ξανά, όταν θα άρχιζε να κάνει παγωνιά.

Η βάση της τεχνολογίας των υλικών αλλαγής φάσης αναπτύχθηκε ως επακόλουθο του διαστημικού προγράμματος της NASA, στις αρχές της δεκαετίας του '80. Ο στόχος ήταν η προστασία των αστροναυτών και των οργάνων από τις ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του διαστήματος. Το 1987 η Triangle Research and Development Corporation (Raleigh, USA)² επέδειξε τη χρησιμότητα της ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης στις ίνες υφασμάτων και το ότι η θερμική χωρητικότητα ήταν ανεξάρτητη από τη ποσότητα του αέρα μέσα στο ύφασμα. Η Triangle Research μετέφερε τα δικαιώματα της πατέντας αυτής της τεχνολογίας σε μια εταιρία με την επωνυμία Gateway Technologies, που πλέον είναι γνωστή με την επωνυμία Outlast Technologies (Boulder, Colorado)³.

2.2 Θερμική εξισορρόπηση και φυσιοθερμική άνεση

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρείται μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία, που θα εξασφαλίσει τις ζωτικές ανθρώπινες λειτουργίες. Η φυσιολογική θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος, 37 °C, παρουσιάζει μια μικρή μεταβολή κατά την διάρκεια της ημέρας, φτάνοντας στο ναδίρ νωρίς το πρωί και στο ζενίθ, το βράδυ. Επίσης, η θερμοκρασία σε διαφορετικά μέρη του σώματος διαφέρει. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία στα εσωτερικά όργανα, στο πυρήνα του ανθρώπινου σώματος, είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλα σημεία. Κατά την διάρκεια σωματικής άσκησης η θερμοκρασία των μυών μπορεί να φτάσει τους 39 - 40 °C. Τα επιφανειακά σημεία του σώματος και τα άκρα εμφανίζουν διαφορετική θερμοκρασία, ανάλογα με τις αλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα.

Στη προσπάθεια να επιτύχει θερμική εξισορρόπηση, ο άνθρωπος παράγει και διαχέει διαφορετικές ποσότητες θερμότητας, ανάλογα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Ακόμα, ανάλογα με τη σωματική άσκηση, ο άνθρωπος παράγει θερμότητα της τάξης των 100 W σε κατάσταση ηρεμίας και της τάξης των 600W σε εγρήγορση. Παροδικά, η παραγωγή θερμότητας μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη π.χ. της τάξης των 1250 W κάνοντας για παράδειγμα σκι. Αυτή η παραχθείσα ποσότητα θερμότητας πρέπει να διαχυθεί για να αποφευχθεί οποιαδήποτε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας και για τη διατήρηση θερμικής ισορροπίας. Το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, όταν η παραγωγή θερμότητας είναι ίση με τις απώλειες. Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική

² http://en.wikipedia.org/wiki/Research_Triangle_Park

³ <http://www.outlast.com/>

ισορροπία είναι η παραγόμενη θερμότητα (σωματική δραστηριότητα, εργασία), περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία), ο ρουχισμός, καθώς και οι μεμονωμένες ιδιότητες του κάθε ατόμου.

Ο ρουχισμός είναι άνετος, όταν ο άνθρωπος αισθάνεται σωματικά, φυσιολογικά και πνευματικά ικανοποιημένος, καθώς η θερμότητα και ο ιδρώτας μεταφέρεται αποτελεσματικά από το σώμα στο περιβάλλον μέσω των ρούχων. Για αυτό, η ανάπτυξη έξυπνων υφασμάτων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αποθηκεύουν/απελευθερώνουν θερμότητα, που μπορούν να προσαρμόσουν και να διατηρήσουν την άνεση καθώς οι συνθήκες μεταβάλλονται, είναι πολύ σημαντική και άκρως απαραίτητη.

2.3 Τεχνολογία αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι υλικά έμμεσης αποθήκευσης θερμότητας. Για να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν θερμότητα χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς. Η μεταφορά θερμικής ενέργειας συμβαίνει όταν ένα υλικό αλλάζει από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό. Αυτό ονομάζεται αλλαγή κατάστασης ή φάσης [1-5]. Κάθε υλικό, όταν θερμαίνεται, απορροφά θερμότητα, ενώ η θερμοκρασία του αυξάνεται συνεχώς. Η θερμοκρασία ενός PCM αυξάνεται μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης του. Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή μέχρι το PCM να αλλάξει εντελώς από στερεό σε υγρό. Απορροφάται ενέργεια από το υλικό και χρησιμοποιείται για να σπάσουν οι δεσμοί, που είναι υπεύθυνοι για την στερεά δομή του. Μια μεγάλη ποσότητα θερμότητας απορροφάται κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης (έμμεση θερμότητα). Εάν το υλικό θερμανθεί ακόμα περισσότερο, η θερμοκρασία του θα ξεκινήσει να αυξάνεται ξανά. Η έμμεση θερμότητα θα απελευθερωθεί στο περιβάλλον, όταν το υλικό κρυώσει. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή ξανά, μέχρι η αλλαγή φάσης από υγρό σε στερεό να ολοκληρωθεί, δηλαδή όταν φτάσει το σημείο πήξης του PCM. Τα PCM απορροφούν και εκπέμπουν θερμότητα, διατηρώντας μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία.

Προκειμένου να συγκρίνουμε την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται από ένα PCM, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, με την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται σε μία κανονική διαδικασία θέρμανσης, χρησιμοποιείται νερό. Εάν ο πάγος λιώσει σε νερό απορροφά, κατά προσέγγιση, έμμεση θερμότητα της τάξης των 335 J/g. Εάν το νερό θερμανθεί περαιτέρω, απορροφάται μόνον μια αισθητή θερμότητα της τάξης των 4 J/g, ενώ η θερμοκρασία αυξάνεται κατά ένα βαθμό. Γι' αυτό, η έμμεση απορρόφηση θερμότητας, κατά την διάρκεια της αλλαγής φάσης από πάγο σε νερό, είναι 100 φορές υψηλότερη σε σχέση με τη αισθητή απορρόφηση θερμότητας, πέρα από τη διαδικασία αλλαγής φάσης [1-6]. Εκτός από το νερό, μας είναι γνωστά 500 επιπλέον φυσικά αλλά και συνθετικά PCM. Αυτά τα υλικά διαφέρουν στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης και στην ικανότητα που έχουν να αποθηκεύουν θερμότητα [1-7].

Τα στερεά-στερεά PCM απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα με τον ίδιο τρόπο που το κάνουν και τα στερεά-υγρά PCM. Αυτά τα υλικά δεν αλλάζουν σε υγρή κατάσταση κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, απλώς μαλακώνουν ή σκληραίνουν. Σχετικά λίγα από τα στερεά-στερεά PCM που έχουν αναγνωριστεί είναι κατάλληλα για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας. Υγρά-αέρια PCM δεν είναι ακόμα πρακτικά για να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας. Παρόλο που έχουν υψηλή θερμότητα μετασχηματισμού, η αύξηση του όγκου τους, κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης από υγρό σε αέριο, καθιστά τη χρήση τους μη πρακτική.

2.4 Τα PCM στα υφάσματα

Τα πιο διαδεδομένα PCM στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας είναι τα κεριά παραφίνης με ποικίλες θερμοκρασίες αλλαγής φάσης (τήξης και πήξης), που εξαρτώνται από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα. Οι χαρακτηριστικές κάποιων από αυτά τα PCM συνοψίζονται στον

Πίνακα 2.4 Αυτά τα υλικά αλλαγής φάσης εσωκλείονται σε μικροκάψουλες με διάμετρο 1-30 μm. Σε σύγκριση με μια τρίχα, το μέγεθος της κάψουλας έχει συνήθως περίπου τη μισή διάμετρο ή ακόμη μπορεί να είναι και το 1/20 της. Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να ενσωματωθούν σε υφάσματα μόνο μέσα σε αυτές τις κάψουλες, προκειμένου να αποτραπεί η διάλυση της παραφίνης, ενόσω βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Το υλικό του κελύφους της κάψουλας πρέπει να είναι ανθεκτικό στη τριβή και την πίεση, να είναι θερμομονωτικό και να έχει αντοχή στα περισσότερα είδη χημικών [1-8][1-9]. Τα Outlast®, Comfortemp® and Thermasorb®⁴ είναι εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα PCM βασισμένα στη τεχνολογία κεριών παραφίνης και μικροκάψουλων.

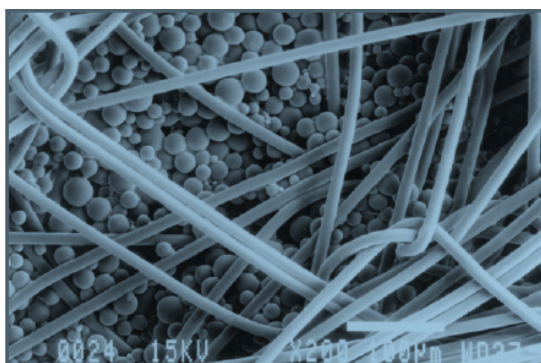
Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών PCM

Phase change material	Melting temperature in °C	Crystallization temperature in °C	Heat storage capacity in J/g
Eicosane	36.1	30.6	247
Nonadecane	32.1	26.4	222
Octadecane	28.2	25.4	244
Heptadecane	22.5	21.5	213
Hexadecane	18.5	16.2	237

Ένυδρα ανόργανα άλατα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί στην ένδυση, σε εφαρμογές που απαιτούν ψύξη. Στοιχεία PCM που περιέχουν άλατα Glauber (θειικό νάτριο) έχουν τοποθετηθεί μέσα στις τσέπες γιλέκων ψύξης [1-10].

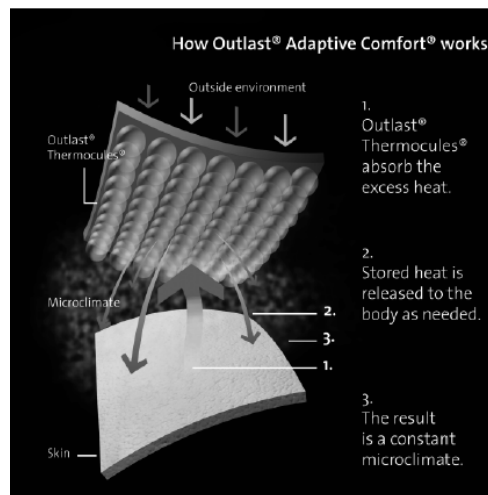
2.4.1 Κατεργασία υφασμάτων με μικροκάψουλες PCM

Συνήθως οι μικροκάψουλες PCM εφαρμόζονται στην επιφάνεια του υφάσματος. Οι μικροκάψουλες είναι ενσωματωμένες σε μία ένωση επικάλυψης, όπως ακρυλικό, πολυουρεθάνη και καουτσούκ και εφαρμόζεται σε ένα ύφασμα ή αφρό. Οι κάψουλες μπορούν επίσης να ανακατευτούν μέσα σε μία μήτρα από πολυουρεθάνη, από την οποία έχει αφαιρεθεί η υγρασία και στη συνέχεια ο αφρός ψεκάζεται στο ύφασμα [1-7]. Στην εικόνα 2.1 φαίνονται οι μικροκάψουλες PCM σε ένα ύφασμα και στην εικόνα 2.2 το πώς δουλεύουν. Οι μικροκάψουλες που περιέχουν PCM μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε ακρυλικές ίνες με υγρή διαδικασία κλώσης. Στη περίπτωση αυτή το PCM φυλακίζεται μόνιμα μέσα στην ίνα. Η ίνα στη συνέχεια μπορεί κανονικά να επεξεργαστεί σε υφάσματα και νήματα [1-6][1-7].



2.1 Ύφασμα με μικροκάψουλες PCM (H/N μικροσκόπιο μεγέθυνση).

⁴ <http://www.comfortemp.com/> και <http://www.thermasorb.com.au/absorbent-pads.htm>



2.2 Τρόπος λειτουργίας μικροκάψουλων PCM.

2.4.2 Θερμική απόδοση (ή πλεονεκτήματα χρήσης PCM)

Με την εφαρμογή μικροκάψουλων PCM στις δομές των υφασμάτων, σε εφαρμογές ένδυσης, έχουν παρατηρηθεί τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Ψύξη, με την απορρόφηση της πλεονάζουσας θερμότητας
- Μόνωση, που προκαλείται από την εκπομπή θερμότητας από το PCM μέσα στη δομή του υφάσματος (η εκπομπή θερμότητας από το PCM δημιουργεί ένα θερμικό φράγμα, το οποίο μειώνει την διάχυση θερμότητας από το σώμα στο περιβάλλον και αποφεύγονται ανεπιθύμητες απώλειες)
- Θερμο-ρύθμιση, που είναι αποτέλεσμα είτε της απορρόφησης, είτε της εκπομπής θερμότητας από το PCM αντιδρώντας σε κάθε θερμοκρασιακή αλλαγή στο μικροκλίμα (η θερμο-ρύθμιση διατηρεί την θερμοκρασία του μικροκλίματος σχεδόν σταθερή) [1-11].

Η θερμοκρασία του σώματος ποικίλει σημαντικά: 34-36.5 °C στο κεφάλι και τον κορμό, 27-30 °C στο μηρό και μόνο 25.5-27.5 °C στα χέρια και στα πόδια [1-5]. Ο κύριος σκοπός του ρουχισμού, που είναι σχεδιασμένο να προστατεύει το φορέα του από τις επιδράσεις ενός ψυχρού περιβάλλοντος, είναι να αποτρέπει την σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του δέρματος. Τέτοια ρούχα αποτελούνται κυρίως από στρώματα, πιθανόν ένα εξωτερικό στρώμα, μια φόδρα και lofted ύφασμα. Σε αυτό το συνηθισμένο σύστημα μόνωσης το lofted ύφασμα είναι αυτό που, κυρίως, παρέχει την μόνωση (παθητική μόνωση). Χωρίς υλικά αλλαγής φάσης, η ικανότητα θερμικής μόνωσης του ρουχισμού εξαρτάται από το πάχος και την πυκνότητα του υφάσματος. Όσο παχύτερο και με μικρότερη πυκνότητα είναι ένα υλικό, τόσο καλύτερη θερμική μόνωση παρουσιάζει. Ο αέρας μέσα στο ρούχο επηρεάζει άμεσα την ικανότητα θερμικής μόνωσης. Κανονικά η ικανότητα θερμικής μόνωσης του υφάσματος μειώνεται, όταν το ύφασμα συμπιέζεται. Το ίδιο συμβαίνει, εάν το υλικό γίνει υγρό, επειδή η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Η πίεση και ο ιδρώτας δεν επηρεάζουν τη λειτουργικότητα του PCM. Είναι δυνατόν να βελτιωθεί η παθητική μόνωση με ένα ενεργό σύστημα τεχνολογίας αλλαγής φάσης, η οποία αντιδρά άμεσα στην αλλαγή της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας και προσαρμόζεται στις επικρατούσες ζεστές ή κρύες συνθήκες (ενεργός μόνωση) [1-8].

Σε ένα σύστημα ένδυσης, η θερμική αντίσταση των στρωμάτων ένδυσης και τα στρώματα αέρα ενδιάμεσα περιορίζουν τη διάχυση θερμότητας από το σώμα στο περιβάλλον. Αυτή η παθητική θερμική μόνωση μπορεί να προσαρμοστεί σε συνεχώς μεταβαλλόμενες θερμικές συνθήκες μόνο προσθέτοντας ή αφαιρώντας στρώματα ρουχισμού, όμως στη πραγματικότητα

αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Επιπλέον, η έντονη άσκηση οδηγεί συχνά σε έντονη αύξηση της θερμοκρασίας και της παραγωγής ιδρώτα. Αντίθετα, η χαμηλής έντασης άσκηση σε συνδυασμό με χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του σώματος [1-11].

Η εφαρμογή PCM σε ένα ένδυμα παρέχει μια ενεργό θερμική μόνωση, επιπροσθέτως της παθητικής θερμικής μόνωσης του συστήματος ένδυσης. Η ενεργός θερμική μόνωση του PCM ελέγχει την διάχυση θερμότητας μέσω των στρωμάτων από ενδύματα και προσαρμόζει την θερμική διάχυση στις θερμοκρασιακές περιστάσεις π.χ. το επίπεδο δραστηριότητας και την επικρατούσα περιβαλλοντική θερμοκρασία. Εάν η παραγωγή θερμότητας του σώματος ξεπερνά την πιθανή απώλεια θερμότητας, μέσω των στρωμάτων ένδυσης, στο περιβάλλον, το PCM θα απορροφήσει και θα αποθηκεύσει τη πλεονάζουσα θερμότητα. Από τη άλλη, εάν η θερμότητα που απελευθερώνεται μέσω των στρωμάτων της ένδυσης ξεπεράσει την παραγομένη θερμότητα από το σώμα, σε κατάσταση χαμηλής δραστηριότητας, η θερμική διάχυση μέσω των στρωμάτων μειώνεται με την εκπομπή θερμότητας του PCM. Η ενεργός θερμική μόνωση του PCM έχει ως αποτέλεσμα την ουσιώδη βελτίωση της φυσιο-θερμικής άνεσης του ενδύματος [1-11].

Η συνεχώς μεταβαλλόμενη ένταση της δραστηριότητας του σώματος έχει ως συνέπεια τη συνεχή φόρτιση και αποφόρτιση των μικροκάψουλων PCM. Επιπλέον, η αλλαγή από ένα κρύο εξωτερικό περιβάλλον σε ένα ζεστό εσωτερικό περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα την επαναφόρτιση των μικροκάψουλων PCM. Τελικά, η απαραίτητη ποσότητα PCM μπορεί να είναι πολύ μικρή.

Θερμική απόδοση αθλητικών ρούχων

Προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική απόδοση αθλητικών ρούχων, χρησιμοποιούνται, ευρέως, υφάσματα για ρούχα με θερμο-ρυθμιστικές ιδιότητες. Οι θερμο-ρυθμιστικές ιδιότητες που παρέχουν αυτά τα υφάσματα βασίζονται σε εφαρμογές PCM. Παρόλα αυτά, μια κατάλληλη θερμο-ρύθμιση, σύμφωνη με τις επικρατούσες συνθήκες, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνον όταν εφαρμόζονται ειδικές αρχές σχεδιασμού στην διαδικασία ανάπτυξης των εν λόγω ενεργών ενδυμάτων. Για παράδειγμα, είναι απαραίτητο να συνδυαστεί η ποσότητα PCM που θα εφαρμοστεί στο ενεργό ένδυμα με το επίπεδο δραστηριότητας και τη διάρκεια της χρήσης του ενδύματος. Επιπλέον η δομή του ενδύματος πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να πλήρη τις επιθυμητές θερμο-ρυθμιστικές ιδιότητες [1-11].

Η ένταση και η διάρκεια της ενεργού θερμικής μόνωσης του PCM εξαρτάται κυρίως από την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης των μικροκάψουλων PCM και το πλήθος τους. Επιπλέον, δοκιμές απόδοσης σε υφάσματα, στα οποία έχουν ενσωματωθεί μικροκάψουλες PCM, έδειξαν ότι το υπόστρωμα του υφάσματος επηρεάζει επίσης την αποδοτικότητα της ενεργής θερμικής μόνωσης των PCM. Για παράδειγμα, λεπτότερα υφάσματα με υψηλότερη πυκνότητα διευκολύνουν τη διαδικασία ψύξης. Σε αντίθεση, η χρήση παχύτερων και λιγότερο πυκνών δομών υφάσματος οδηγεί σε μια βραδύτερη και συνεπώς πιο αποτελεσματική απελευθέρωση θερμότητας του PCM. Έτσι, για να υπάρξουν τα επιθυμητά θερμικά πλεονεκτήματα, το εύρος της θερμοκρασίας της αλλαγής φάσης και το εφαρμοζόμενο εύρος θερμοκρασίας πρέπει να συμφωνούν [1-11].

Προκειμένου να διασφαλιστεί μια κατάλληλη και διαρκής ενεργός θερμική μόνωση από PCM στην ενεργό ένδυση, είναι απαραίτητο να εφαρμόζονται τα κατάλληλα PCM και σε επαρκή ποσότητα. Η επιλογή του κατάλληλου υποστρώματος απαιτεί να ληφθεί υπόψη, εάν η δομή του υφάσματος είναι ικανή να φέρει μία επαρκή ποσότητα PCM και να παρέχει τη κατάλληλη μεταφορά θερμότητας από και προς τις μικροκάψουλες PCM. Επιπλέον απαιτήσεις για το υπόστρωμα του υφάσματος, κατά την εφαρμογή στην ένδυση, περιλαμβάνουν υψηλή ελαστικότητα, μηχανική σταθερότητα και δυνατότητα αναπνοής. Το

υπόστρωμα με ενσωματωμένες μικροκάψουλες PCM πρέπει να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία στο σχέδιο του ενδύματος [1-11].

Στο πρώτο στάδιο της σχεδίασης αναπτύσσονται θερμοκρασιακά προφίλ, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές θερμοκρασίες εφαρμογής. Τα θερμοκρασιακά προφίλ χρησιμοποιούνται στον καθορισμό του εύρους θερμοκρασιών στο οποίο το PCM θα πρέπει να δουλεύει, επειδή οι θερμοκρασίες στα διάφορα στρώματα ένδυσης διαφέρουν κατά πολύ. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται το PCM για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για παράδειγμα, εάν το PCM πρέπει να εφαρμοστεί σε ύφασμα που προορίζεται για εσώρουχα, η αλλαγή φάσης του επιλεγμένου PCM πρέπει να συμβαίνει σε ένα εύρος θερμοκρασιών, που να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του δέρματος. Από την άλλη, η αλλαγή φάσης ενός PCM που εφαρμόζεται στο υλικό για την επένδυση εξωτερικών ρούχων, πρέπει να συμβαίνει σε ένα εύρος αρκετά χαμηλότερων θερμοκρασιών [1-11].

Για να προσδιοριστεί μια επαρκής ποσότητα PCM, πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμότητα που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα κάτω από τη διεξαγωγή έντονης δραστηριότητας, κατά την οποία φοριούνται τα ρούχα. Όλη η θερμότητα που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα, πρέπει να απελευθερώνεται στο περιβάλλον, μέσω των στρωμάτων της ένδυσης. Από τη μια, αυτή η απελευθέρωση θερμότητας συμβαίνει με τη μορφή της ξηρής διάχυσης θερμότητας, η οποία καθορίζεται από την ολική θερμική αντίσταση του συστήματος ένδυσης. Επιπλέον, θερμότητα απελευθερώνεται από το σώμα λανθάνουσα διάχυση θερμότητας. Η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται με αυτό τον τρόπο, καθορίζεται από την αντίσταση του συστήματος ένδυσης στους υδρατμούς. Επιπλέον, τα υφάσματα ένδυσης απορροφούν το πλεόνασμα θερμότητας του σώματος με μια σταθερή αύξηση στην θερμοκρασία τους. Μετρήσεις της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας, καθώς επίσης και της απορρόφησης θερμότητας και υγρασίας των στρωμάτων της ένδυσης, χρησιμοποιούνται σε πρωταρχικές δοκιμές, για να καθοριστεί η συνολική διάχυση θερμότητας μέσω του συστήματος ένδυσης. Η απαραίτητη ποσότητα PCM καθορίζεται σύμφωνα με τη ποσότητα της θερμότητας, η οποία πρέπει να απορροφηθεί από το PCM, ώστε να παραμείνει η θερμική ισορροπία.

Κατά τη διάρκεια έντονης δραστηριότητας, η θερμότητα παράγεται κυρίως από τους μύες και πρέπει να απελευθερωθεί. Επειδή κάθε σημείο χρησιμοποιεί διαφορετικούς μύες, η παραγωγή θερμότητας ποικίλει στα διάφορα μέρη του σώματος. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση αθλητικών ενδυμάτων με PCM. Συνήθως δεν χρειάζεται να τοποθετηθούν PCM σε όλα τα σημεία της ένδυσης. Η τοποθέτηση μικροκάψουλων PCM στις περιοχές που παρουσιάζουν πρόβλημα, από θερμική άποψη, και η θερμο-ρύθμιση μέσω αυτών των περιοχών είναι συνήθως αρκετή. Ενδείκνυται, επίσης, η χρήση διαφορετικών μικροκάψουλων PCM, σε διαφορετικές ποσότητες, σε συγκεκριμένες περιοχές της ένδυσης. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι περιοχές που παρουσιάζουν το θερμικό πρόβλημα, λαμβάνονται μετρήσεις θερμικών απωλειών καθώς και υπέρυθρες φωτογραφίες, κατά τη διάρκεια έντονης δραστηριότητας [1-11].

2.4.3 Μέθοδοι δοκιμών

Τα παραδοσιακά υλικά θερμικής μόνωσης στηρίζονται για την απόδοσή τους στο παγιδευμένο αέρα. Οι διαδικασίες δοκιμής για τη ποσοτικοποίηση της απόδοσης τέτοιων υλικών έχει, για αυτό το λόγο, σχεδιαστεί κατάλληλα. Η μόνωση παγιδευμένου αέρα είναι ένα στατικό σύστημα, το οποίο βασίζεται στην απαγωγή/ μεταβίβαση της θερμότητας μέσω κενών αέρα και ινών. Γι' αυτό και οι δοκιμές TOG και CLO είναι σχεδιασμένες να μετρούν αυτά τα φαινόμενα. Υφάσματα τα οποία περιέχουν PCM δημιουργούν ένα δυναμικό σύστημα, το οποίο αντιδρά στις αλλαγές στην θερμοκρασία του δέρματος και στις εξωτερικές συνθήκες. Γι' αυτό το λόγο είναι λογικό, οι παλιές παραδοσιακές διαδικασίες δοκιμών αποθηκευμένου αέρα, να μην είναι επαρκείς για την ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων των PCM [1-12].

Ο καλύτερος τρόπος για τη δοκιμή όλων αυτών των υλικών είναι, όπως είναι λογικό, η ανθρώπινη φυσική δοκιμή, όμως αυτές είναι, ως συνήθως, πολύ χρονοβόρες και με μεγάλο κόστος και δεν είναι ποτέ δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για ελέγχους ρουτίνας της ποιότητας. Η American Society for Testing and Materials (ASTM) ενέκρινε μια καινούργια τυποποιημένη διαδικασία δοκιμών για μέτρηση της ποσότητας λανθάνουσας ενέργειας σε κλωστοϋφαντουργικά υλικά τον Ιούλιο του 2004. Βασισμένη σε χρόνια έρευνας και δοκιμών σε υφάσματα που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης, της Outlast Technologies, Inc., και της Prof. Dr Douglas Hittle, Director Solar Energy Applications του πανεπιστημίου του Κολοράντο⁵, καθιερώθηκε από την ASTM^[1-13] η πρώτη “Μέθοδος δοκιμής για Σταθερή Κατάσταση και Δυναμική Θερμική Απόδοση σε Κλωστοϋφαντουργικά Υλικά” (ASTM D7024).

Η τεχνολογία αλλαγής φάσης, σε υφάσματα ρύθμισης της θερμοκρασίας με αυξημένη λανθάνουσα ενέργεια, αντιπροσωπεύει μια εντελώς καινούργια προσέγγιση στην παροχή αυξημένης άνεσης και απόδοσης. Οι τυποποιημένες διαδικασίες δοκιμών που χρησιμοποιούνταν για το προσδιορισμό της τιμής της μόνωσης παραδοσιακών υφασμάτων, δεν είναι δυνατόν να μετρήσουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε αυτά τα νέα, καινοτόμα «έξυπνα» υφάσματα. Γι’ αυτό απαιτήθηκε μια νέα μέθοδος δοκιμής, καθώς και νέες συσκευές, αφού η ASTM D1518 «Πρότυπη μέθοδος ελέγχου θερμικής διαπερατότητας κλωστοϋφαντουργικών υλικών» καθόριζε μόνο την τιμή R (ή τιμή CLO, όπως συνήθως ονομάζεται στη βιομηχανία υφασμάτων) σε μια σταθερή κατάσταση. Αυτή η νέα μέθοδος δοκιμής μετρά τις δυναμικές αλλαγές θερμοκρασίας και διαφοροποιεί και ποσοτικοποιεί τις θερμικές ιδιότητες ενός υλικού μέσα σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Μετρά τα αποτελέσματα της αλλαγής θερμοκρασίας και την ικανότητα ενός υφάσματος να απορροφά, να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ενέργεια. Αυτές οι δοκιμές παρέχουν τις μετρήσεις που διαχωρίζουν την τεχνολογία PCM από τους αβάσιμους ισχυρισμούς για ρύθμιση της θερμοκρασίας, μέσω της διαχείρισης της υγρασίας ή απευθείας της θερμικές μονωτικές ιδιότητες ενός υφάσματος.

Η μέθοδος DSC χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η θερμική χωρητικότητα ή η ενθαλπία των μικροκάψουλων και των ινών που περιέχουν τις μικροκάψουλες. Αυτή είναι μια καθιερωμένη διαδικασία που χρησιμοποιείται πολλά χρόνια για τον καθορισμό του σημείου τήξης και πήξης υλικών, καθώς επίσης για τις δυνατότητες απορρόφησης και απελευθέρωσης θερμότητας των ίδιων υλικών. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμικής χωρητικότητας του τελικού προϊόντος. Μια άλλη τεχνική γνωστή ως θερμοσταθμική ανάλυση (TGA) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θερμικής ισχύος των μικροκάψουλων PCM. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παρασκευή της ίνας και η διαδικασία, μέσω της οποίας οι ίνες που περιέχουν τις μικροκάψουλες μετατρέπονται σε νήματα και σε υφάσματα, περιέχει θέρμανση ^[1-12].

2.4.4 Τομείς όπου τα υφάσματα με PCM βρίσκουν εφαρμογή.

Τα υφάσματα με υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται σε χειμερινά αλλά και σε καλοκαιρινά ρούχα. Στην αγορά υπάρχουν ρούχα και υποδήματα με PCM, κυρίως για αθλήματα, extreme sports και για καθημερινή ένδυση. Τα PCM δεν χρησιμοποιούνται μόνο σε υψηλής ποιότητας εξωτερικά ρούχα και υποδήματα, αλλά επίσης σε εσώρουχα, κάλτσες, γάντια, κράνη και κλινοσκεπάσματα, από όλες τις ηγετικές φίρμες παγκοσμίως. Καλύμματα για καθίσματα αυτοκινήτου και καρέκλες γραφείου μπορούν να περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης. Στο τομέα των ιατρικών υφασμάτων μπορούν να βρεθούν PCM σε ακριλικές κουβέρτες και σε καλύμματα κρεβατιών για να ρυθμίζουν το μικροκλίμα του ασθενή. Άλλες πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν φόρμες εργασίας και ρούχα προστασίας για ζεστά και κρύα περιβάλλοντα.

⁵ <http://welcome.colostate.edu>

Ο κατάλληλος τεχνικός εξοπλισμός γίνεται όλο και περισσότερο σημαντικός για τις αρχές και το στρατό. Δεν είναι μόνο τα ηλεκτρονικά που παίζουν σημαντικό ρόλο, αλλά και οι αυξημένες ανάγκες για ένδυση. Η ανάγκη για νέα έξυπνα υφάσματα γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Μια νέα γενιά από υφάσματα με ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM), τα οποία είναι ικανά όταν το σώμα το χρειάζεται, να απορροφούν, να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν την παραπάνω θερμότητα του σώματος, με αποτέλεσμα τη λιγότερη εφίδρωση και ψύξη, ενώ το μικροκλίμα του δέρματος επηρεάζεται με θετικό τρόπο ενώ η αποδοτικότητα και η επίδοση ενισχύονται [1-14].

Δύο εταιρείες, η Outlast Europe GmbH, Heidenheim, και η UCO Sportswear NV, Ghent/Belgium, πέτυχαν την ανάπτυξη υφάσματος τζιν με θερμο-ρυθμιστικές ιδιότητες. Για αυτή τη καινοτομία χρειάστηκαν δύο χρόνια ανάπτυξης. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις ήταν η διασφάλιση της αντοχής της επικάλυψης στα συνήθη βιομηχανικά πλυσίματα που υφίστανται τα τζιν αυτά. Χάρη στην περαιτέρω ανάπτυξη της σύνθεσης της επικάλυψης, η απόδοση είναι πια εξασφαλισμένη και μετά από διάφορες πλύσεις. Με την τροποποίηση της διαδικασίας επικάλυψης της ένωσης μπορεί πια να ενσωματωθεί απευθείας στο δομές υφάσματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η υφή του υφάσματος να μην αφήνει καμία δυσάρεστη αίσθηση στο δέρμα και στο να είναι το φιλμ της επικάλυψης ουσιαστικά αόρατο. Εντατικές δοκιμές διεξήχθησαν σε επικαλυμμένα υφάσματα από καθαρό βαμβάκι, βαμβάκι/πολυεστέρα και ελαστικά υφάσματα (βάρους μεταξύ 240 g και 360 g), καθώς τα καλοκαιρινά προϊόντα αφήνουν ένα αποτέλεσμα δροσιάς και φρεσκάδας [1-15]. Οι μοτοσυκλετιστές θα έβρισκαν χρήσιμα αυτά τα έξυπνα υφάσματα σε πολλές περιπτώσεις – σε ταξίδια μέσα σε σκιερά δάση, ηλιόλουστους δρόμους ή όταν εκτίθενται σε μεταβολές λόγω του κρύου του αέρα ή όταν είναι σταματημένοι σε κάποιο φανάρι. Πρώτοι οι μοτοσυκλετιστές της Αγγλικής αστυνομίας δοκίμασαν τον ρουχισμό τους σε όλα τα ακραία καιρικά φαινόμενα και παρείχαν της εμπειρίες τους για την ανάπτυξη καινοτόμων μπουφάν και παντελονιών για μοτοσυκλετιστές [1-14].

Το ψυκτικό γιλέκο (TST Sweden Ab) είναι ένα άνετο ένδυμα που αναπτύχθηκε για να εμποδίσει την αύξηση της σωματικής θερμοκρασίας σε ανθρώπους που εργάζονται σε θερμά περιβάλλοντα ή έχουν εξαιρετικά αυξημένη φυσική δραστηριότητα. Η ψύξη παρέχεται από τα 21 PCM του γιλέκου που περιέχουν άλατα Glauber, τα οποία αρχίζουν να απορροφούν θερμότητα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (28 °C). Η απορρόφηση θερμότητας από το σώμα ή από μια εξωτερική πηγή συνεχίζεται, μέχρι τα στοιχεία του PCM να λιώσουν. Μετά τη χρήση, το ψυκτικό γιλέκο πρέπει να φορτιστεί σε θερμοκρασία δωματίου (24 °C) ή χαμηλότερα. Όταν όλα τα στοιχεία του PCM στερεοποιηθούν, το ψυκτικό γιλέκο είναι και πάλι έτοιμο για χρήση [1-16].

2.5 Έξυπνα υφάσματα με PCM

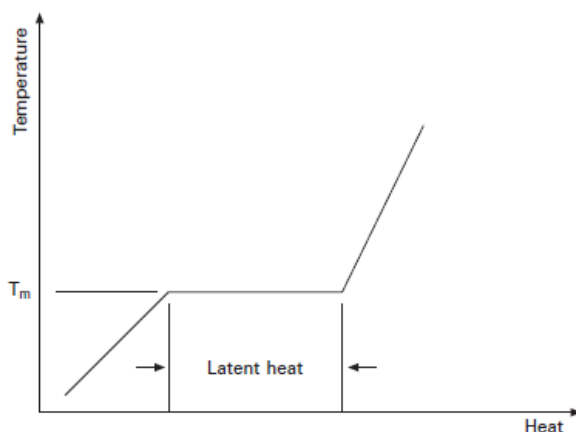
Όπως είδαμε και παραπάνω οι μικροκάψουλες PCM βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, δεν αρκεί να περιοριστούμε όμως στην ένδυση, έχουν εφαρμογές τη θερμική διαχείριση ηλεκτρονικών, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και μικροεπεξεργαστών, ηλιακά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας για κτήρια, περιβαλλοντικό έλεγχο του μικροκλίματος στην γεωργία, βιομετρικά και βιολογικά συστήματα και άλλα. Καθιστώντας τα αιχμή του δόρατος στα έξυπνα υφάσματα.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια βασική επισκόπηση των υλικών αλλαγής φάσης, με ειδική αναφορά στους γραμμικούς αλκυλό-υδρογονάνθρακες. Επίσης, αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας των PCM σε υφάσματα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στο τρόπο με τον οποίο τα PCM αποδίδουν στα υφάσματα. Ακόμα, παρουσιάζονται οι πιο κοινές μέθοδοι εισαγωγής μικροκάψουλων PCM σε ινώδη υποστρώματα, καθώς και οι ποικίλες εφαρμογές υφασμάτων που περιέχουν PCM. Επιπλέον, παρουσιάζεται η συσκευή δοκιμής των θερμικών ιδιοτήτων των υφασμάτων που περιέχουν PCM.

2.5.1 Βασικές πληροφορίες για τα υλικά αλλαγής φάσης

Η αλλαγή φάσης είναι η διαδικασία αλλαγής από μια φυσική κατάσταση σε μια άλλη. Εκτός από τις τρεις θεμελιώδεις καταστάσεις της ύλης, τη στερεή, την υγρή και την αέρια, θεωρείται πως υπάρχουν και άλλες συμπεριλαμβανομένων της κρυσταλλικής, της κολλοειδούς, της υαλώδους, της άμορφης και της κατάστασης πλάσμα. Οι ουσίες που υποβάλλονται σε αλλαγή φάσης είναι γνωστές σαν υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Εξ ορισμού, τα PCM είναι υλικά τα οποία μπορούν να απορροφήσουν, να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, με την μορφή θερμότητας, κάτω από ένα δεδομένο στενό εύρος θερμοκρασιών, γνωστό ως εύρος αλλαγής φάσης, στο οποίο το υλικό αλλάζει φάση ή κατάσταση (από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό).

Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό συμβαίνει, όταν κατά τη διάρκεια θέρμανσης, η θερμοκρασία φτάσει τη θερμοκρασία τήξης. Κατά τη διάρκεια της τήξης, το PCM απορροφά και αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Η θερμοκρασία του PCM παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας (Εικ. 2.1). Κατά την ψύξη του PCM, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας και λαμβάνει χώρα μία αντίστροφη αλλαγή φάσης από υγρό σε στερεό. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, η θερμοκρασία του PCM παραμένει, επίσης, σταθερή. Έτσι τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να απορροφούν θερμότητα και έτσι να προστατέψουν ένα αντικείμενο από αύξηση της θερμοκρασίας, αφού μια ποσότητα θερμικής ενέργειας θα απορροφηθεί από τα PCM, προτού να αυξηθεί η θερμοκρασία. Τα PCM μπορούν επίσης να προθερμανθούν και να χρησιμοποιηθούν ενάντια στο κρύο, καθώς μια μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας πρέπει να αφαιρεθεί από τα PCM, πριν η θερμοκρασία τους αρχίσει να πέφτει. Η διαδικασία της αλλαγής φάσης έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του όγκου και της πυκνότητας των PCM, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις διάφορες εφαρμογές του.



2.1 Διάγραμμα αλλαγής φάσης από υγρό σε στερεό

Το πιο γνωστό PCM είναι το νερό, το οποίο στους 0 °C γίνεται πάγος ή εξατμίζεται στους 100 °C. Πέρα από το νερό, τα υλικά αλλαγής φάσης που μας είναι γνωστά σήμερα, ξεπερνούν τα 500. Αυτά τα υλικά διαφέρουν στο εύρος της θερμοκρασία αλλαγής φάσης και στην ικανότητα που έχουν να αποθηκεύουν θερμότητα. Προκειμένου υφάσματα και ρούχα να αποκτήσουν ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης θερμότητας, τα PCM που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι τα στερεά-υγρά υλικά φάσης. Τα ακόλουθα είναι στερεά-υγρά υλικά φάσης, στα οποία έχει γίνει έρευνα :

- αλκυλό-υδρογονάνθρακες κρυσταλλικής μορφής
- λιπαρά οξέα και εστέρες

- πολυεθυλενικές γλυκόλες (PEG)
- τετραεδρικά αμμώνια κλαθρικά και ημι-κλαθρικά
- ένυδρα ανόργανα άλατα
- ευτηκτικά κράματα, που περιέχουν βισμούθιο, κάδμιο, ίνδιο

Ένα ιδανικό PCM θα πρέπει να πλήρη αρκετά κριτήρια, όπως μια υψηλή θερμοκρασία σύντηξης, μεγάλη ικανότητα απορρόφησης θερμότητας, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης, να μην είναι τοξικό, εύφλεκτο ή διαβρωτικό και να παρουσιάζουν μικρή ή καθόλου αποσύνθεση ή υπερψύξη. Τα οργανικά PCM, όπως οι αλκυλό-υδρογονάνθρακες, είναι σταθερά χημικά, μη διαβρωτικά και δεν παρουσιάζουν ιδιότητες υπερψύξης. Επίσης, έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα βάρους. Τα μειονεκτήματα τους είναι η χαμηλή αγωγιμότητα θερμότητας, μεγάλη αλλαγή όγκου κατά την αλλαγή φάσης, ενώ είναι και εύφλεκτα. Οι ανόργανες ενώσεις, όπως τα ένυδρα ανόργανα άλατα έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα βάρους και υψηλή αγωγιμότητα, είναι εύφλεκτα και έχουν χαμηλό κόστος. Η χρήση τους παρόλα αυτά είναι περιορισμένη, λόγω του ότι παρουσιάζουν αποσύνθεση και υπερψύξη, κάτι το οποίο μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες αλλαγής της φάσης τους.

Πέρα από τα στερεά-υγρά υλικά αλλαγής φάσης, υπάρχει άλλη μια κατηγορία ουσιών που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενθαλπία ή ικανότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης θερμότητας. Οι ουσίες αυτές, που αποκαλούνται κοινώς πλαστικά κρυσταλλικής μορφής, έχουν υψηλές τιμές αποθήκευσης και απελευθέρωσης θερμότητας, κάτι που συμβαίνει πριν από ή χωρίς να λιώσουν. Το θερμικό αυτό φαινόμενο πιστεύεται πως είναι η μετάβαση από μια στερεή σε μια στερεή κατάσταση (π.χ. κρυσταλλική ή μεσοκρυσταλλική φάση μεταβολής), που χαρακτηρίζεται από μεγάλη αλλαγή ενθαλπίας και ως εκ τούτου δεν γίνεται υγρό κατά την διάρκεια της χρήσης. Για αυτό το λόγο, οι ουσίες αυτές ονομάζονται υλικά στερεή-στερεής αλλαγής. Οι πολυεδρικές αλκοόλες είναι υλικά στερεής-στερεής αλλαγής, τα οποία ενδείκνυνται για χρήση σε υφάσματα.

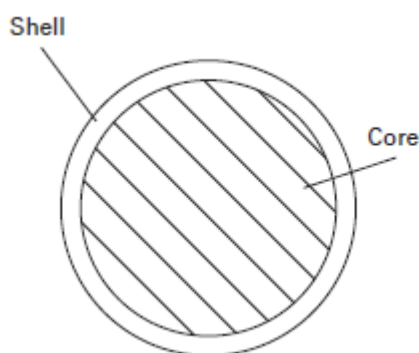
2.5.2 Ιδιότητες αλλαγής φάση των γραμμικών αλκυλό-υδρογονανθράκων

Στις σημερινές εφαρμογές τεχνολογίας PCM στις βιομηχανίες κλωστοϋφαντουργίας, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι κρυσταλλικοί αλκυλό-υδρογονάνθρακες. Οι ιδιότητες αλλαγής φάσης των αλκυλό-υδρογονανθράκων κατάλληλων για εφαρμογή σε υφάσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.5. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν αρκετά ξεκάθαρα, ότι η θερμοκρασία τήξης αυξάνεται σε σχέση με την αύξηση του αριθμού των ατόμων. Κάθε αλκυλό-υδρογονάνθρακας είναι πιο αποτελεσματικός κοντά στη θερμοκρασία τήξης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5. Οι αλκυλό-υδρογονάνθρακες είναι μη τοξικοί, μη διαβρωτικοί και μη υγροσκοπικοί. Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες, κατά τις οποίες θα γίνεται η αλλαγή φάσης, μπορεί να γίνει ανάμειξη διαφόρων υδρογονανθράκων. Ως υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου είναι ανέξοδοι. Ένα μειονέκτημα των υδρογονανθράκων είναι η χαμηλή τους ανοχή σε ανάφλεξη, όμως η προσθήκη επιβραδυντών φλόγας μπορούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα.

Πίνακας 2.5 Ιδιότητες αλλαγής φάσης των αλκυλό-υδρογονανθράκων

Name	Formula	Temperature of melting, T_m °C	Temperature of crystallisation, T_c °C	Enthalpy, J/g
n-hexadecane	$C_{16}H_{34}$	18.2	16.2	237.05
n-heptadecane	$C_{17}H_{36}$	22.5	21.5	213.81
n-octadecane	$C_{18}H_{38}$	28.2	25.4	244.02
n-nonadecane	$C_{19}H_{40}$	32.1	29.0	222.0
n-eicosane	$C_{20}H_{42}$	36.1	30.6	246.34
n-heneicosane	$C_{21}H_{44}$	40.5		199.86

Για να αποφευχθεί η διάχυση των υγρών υδρογονανθράκων μέσα στην ινώδη δομή, χρειάζεται να κλειστούν σε μικροκάψουλες. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει το κλείσιμο τους μέσα σε λεπτά και ελαστικά πολυμερή κελύφη, ώστε τα PCM να μπορούν να αλλάξουν από στερεά σε υγρά και ξανά από υγρά σε στερεά μέσα σ' αυτά. Η Εικόνα 4.2 δείχνει την δομή ενός κελύφους μικροκάψουλας. Υπάρχει μια ποικιλία από χημικές και φυσικές τεχνικές για την παρασκευή διάφορων τύπων από μικροκάψουλες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχηματισμό μικροκάψουλων με PCM. Δύο από τις πιο σημαντικές χημικές μεθόδους είναι η κροκίδωση και ο διεπιφανειακός πολυμερισμός. Στη διαδικασία εισαγωγής PCM σε μικροκάψουλες, χρησιμοποιώντας κροκίδωση, τα σωματίδια του πυρήνα διασκορπίζονται ομοιόμορφα σε ένα κατάλληλο μέσο και το κροκιδωειδές στρώμα επιστρώνεται ομοιόμορφα γύρω από τα σωματίδια. Η επίστρωση, στη συνέχεια, σκληραίνεται με την προσθήκη αντιδραστηρίου π.χ. φορμαλδεΐδες, με αποτέλεσμα την εγκάρσια σύνδεση του κροκοειδούς. Στον διεπιφανειακό πολυμερισμό τα τείχη της κάψουλας σχηματίζονται απευθείας γύρω από τον πυρήνα με διαδικασία πολυμερισμού.



2.6 Δομή της μικροκάψουλας

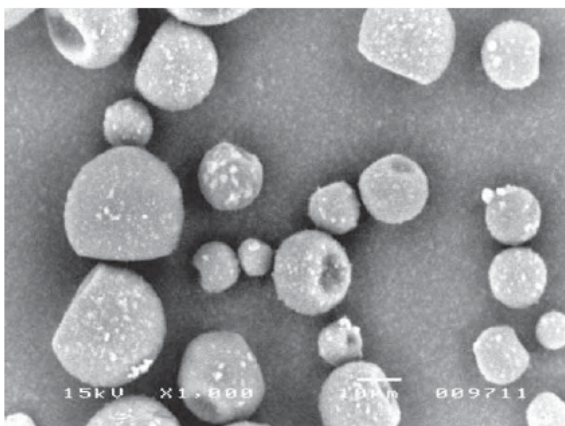
Οι κύριοι παράμετροι για την εισαγωγή PCM σε μικροκάψουλες είναι:

- Η ομοιομορφία και το μέγεθος των σωματιδίων
- Η αναλογία πυρήνα/κελύφους, με την περιεκτικότητα σε PCM όσο το δυνατόν μεγαλύτερη
- Θερμική και χημική σταθερότητα
- Σταθερότητα σε μηχανικές καταπονήσεις

Η διάμετρος των μικροκάψουλων PCM μπορεί να έχει εύρος από 0,5 μέχρι 1000 μm . Οι πολύ μικρές μικροκάψουλες με εύρος διαμέτρου από 1 μέχρι 10 μm χρησιμοποιούνται για ενσωμάτωση μέσα σε ίνες υφασμάτων [1-25]. Μεγαλύτερες μικροκάψουλες PCM μεγέθους 10-

100 μm μπορούν να ενσωματωθούν σε αφρό ή σε επιστρώσεις, που εφαρμόζονται πάνω σε υφάσματα [1-20][1-21][1-26]. Ο πυρήνας της μικροκάψουλας αποτελεί το 60-85% του όγκου του σωματιδίου, ενώ το πολυμερές κέλυφος είναι περίπου 1 μm παχύ. Ακόμα μεγαλύτερες μικροκάψουλες διαμέτρου από 1-3 mm έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή υφασμάτων, τα οποία επιτρέπουν υψηλή αποθήκευση θερμότητας, καθώς και υψηλή μεταφορά υγρασίας μεταξύ των μικροκάψουλων.

Η εισαγωγή PCM σε μικροκάψουλες και το μέγεθος των μικροκάψουλων επηρεάζουν τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Όσο μεγαλύτερα τα σωματίδια, τόσο εγγύτερη είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης με αυτήν του υλικού του πυρήνα. Όσο μικρότερα τα σωματίδια, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας τήξης και της θερμοκρασίας πήξης του PCM. Η αποτελεσματικότητα της θερμοκρασίας, κατά την οποία συντελείται η αλλαγή φάσης του υλικού μέσα στη μικροκάψουλα, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες της μικροκάψουλας που το περικλείει. Το υλικό του κελύφους πρέπει να είναι καλός αγωγός θερμότητας και πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό για να αντέχει συχνές μεταβολές του όγκου του πυρήνα, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης. Πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι, τα PCM σε μικροκάψουλες διαστέλλονται και συστέλλονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης του πυρήνα, με μια τάξη μεγέθους του 10%. Αφού στερεοποιηθεί ο πυρήνας, στην επιφάνεια των μικροκάψουλων υπάρχουν πτυχώσεις, που αποδίδονται στον χαμηλότερο συντελεστή συστολής του κελύφους από εκείνη του πυρήνα. Η τρόπος επιλογής ενός κατάλληλου υλικού για το κέλυφος, ώστε να βελτιωθεί η θερμική σταθερότητα των μικροκάψουλων με PCM, έχει μελετηθεί εντατικά. Η θερμική σταθερότητα των μικροκάψουλων PCM μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη του σταθεροποιητικού παράγοντα, που έχει επιλεγεί από μια ομάδα από αντιοξειδωτικά και θερμικούς σταθεροποιητές [1-37].



2.7 Μικροκάψουλες PCM (H/N μικροσκόπιο Μεγέθυνση x 1000)

Οι μικροκάψουλες για υφάσματα θα πρέπει να είναι ανθεκτικές σε μηχανικές καταπονήσεις (π.χ. τριβή, διάτμηση και πίεση) και σε χημικά. Ο Shin δοκίμασε τη σταθερότητα των μικροκάψουλων από μελαμίνη-φορμαλδεΰδη που περιέχουν εικοσάνια. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι τα κελύφη μικροκάψουλας ήταν αρκετά ανθεκτικά, ώστε να εξασφαλίσουν τη σταθερότητα της κάψουλας, κατά την ανάδευσή τους με ζεστό νερό και αλκαλικά διαλύματα. Οι μικροκάψουλες δεν επέδειξαν καμία σημαντική αλλαγή στη μορφολογία και στο μέγεθός τους και περισσότερο από το 90% της ικανότητας απορρόφησης θερμότητας των μικροκάψουλων διατηρήθηκε μετά τις δοκιμές [1-34].

2.6 Υφάσματα που περιέχουν PCM

Τα έξυπνα υφάσματα είναι ικανά να ανιχνεύσουν ερεθίσματα από το περιβάλλον, να αντιδράσουν και να προσαρμοστούν σε αυτά, με την ολοκλήρωση διεργασιών στην δομή του

υφάσματος. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, τα υφάσματα που περιέχουν PCM θεωρούνται έξυπνα, γιατί αντιδρούν άμεσα στην αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και προσαρμόζονται στις επικρατούσες ζεστές ή κρύες συνθήκες.

2.6.1 Ιστορικό υπόβαθρο

Οι εργασίες πάνω στα θερμο-ρυθμιζόμενα υφάσματα, κατά τη δεκαετία του '80, γίνονταν στο US Department of Agriculture's Southern Regional Research Centre στη Νέα Ορλεάνη. Οι εντατικές έρευνες γινόταν από τον Vigo και τους συνεργάτες του. Ο Vigo και ο Frost [1-38] γέμισαν κούφιας ίνες με ένυδρα ανόργανα άλατα. Οι κατεργασμένες ίνες επέδειξαν φτωχές θερμικές επιδόσεις σε επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους π.χ. θέρμανση και ψύξη. Ο Vigo και ο Frost περιέγραψαν επίσης πειράματα με πολυεδρικές γλυκόλες (PEGs) [1-39][1-40]. Αυτοί εισήγαγαν PEG, που είχαν 7 μέχρι 56 μονομερή τμήματα, με ένα μέσο μοριακό βάρος της τάξης των 400 έως 3350 στις κούφιας ίνες από πολυπροπυλένιο και τεχνητό μετάξι ή εφάρμοσαν τοπικά PEG σε ίνες αποτελούμενες από περισσότερο αντιπροσωπευτικούς τύπους ινών. Τα υφάσματα που κατεργάστηκαν με PEG ήταν προσαρμόσιμα σε κρύα και ζεστά περιβάλλοντα για 150 κύκλους ψύξης και θέρμανσης, απελευθερώνοντας θερμότητα, όταν η θερμοκρασία πέφτει και αποθηκεύοντας θερμότητα, όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει. Αυτή η κατεργασία, παρόλα αυτά, δεν ήταν ανθεκτική σε ξέπλυμα ή πλύσιμο, αφού τα PEG είναι διαλύσιμα στο νερό και μπορούν έτσι να απομακρυνθούν από το ύφασμα.

Ο Vigo και ο Bruno ανέφεραν ότι PEG με χαμηλό μοριακό βάρος μπορούν να μείνουν αδιάλυτα στα υφάσματα με την αντίδραση τους με DMDHEU [1-41], κάτω από συμβατικές συνθήκες μεταχείρισης, για να παραχθούν θερμο-ρυθμιζόμενα υφάσματα ακόμα και μετά το πλύσιμο. Τα επακόλουθα πλεκτά υφάσματα, που ονομάστηκαν Neutratherm, χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή εσωρούχων [1-42]. Ο Vigo και ο Frost επίσης εισήγαγαν σε ίνες υφάσματος κάποια υλικά στερεής-στερεής αλλαγής φάσης π.χ. 2,2-διμεθύλ-1,3-προπανεδιόλη (DMP) [1-39]. Παρόλα αυτά, οι εφαρμογές υφασμάτων τροποποιημένων με πολυϋδρικές αλκοόλες είναι περιορισμένες λόγω του ότι η θερμοκρασία αλλαγής της φάσης τους είναι υψηλότερη από 40 °C.

Μέχρι το 1983 έγιναν σημαντικές έρευνες στην εισαγωγή PCM σε υφάσματα από την Triangle Research and Development Corporation. Αρκετά ερευνητικά προγράμματα από τη TRDC κατέδειξαν ότι οι μικροκάψουλες που περιέχουν επιλεγμένα PCM (αλκυλό-υδρογονάνθρακες και πλαστικοί κρύσταλλοι) μπορούν είτε να περιελιχθούν μέσα στις ίνες του υφάσματος, είτε να επιστρωθούν πάνω σε αυτά [1-19][1-20]. Μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε ένα πλήθος αφρών [1-20]. Η εισαγωγή των μικροκάψουλων PCM μέσα στα υφάσματα προσέδωσε ιδιότητες θερμικής αποθήκευσης και θερμο-ρύθμισης. Αυτές οι ανακαλύψεις κατοχυρώθηκαν με πολλές πατέντες, τα δικαιώματα των οποίων η TRDC έδωσε στη συνέχεια στην Outlast Technologies. Η TRDC παράγει σήμερα άλλα προϊόντα με μικροκάψουλες PCM, για χρήση σε εξελεγχόμενα ενδύματα ψύξης [1-28][1-29].

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90, επιστήμονες της Outlast Technologies είχαν αναπτύξει αρκετές μεθόδους για την εισαγωγή μικροκάψουλων PCM σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, ειδικότερα σε αθλητικά είδη, σε ρουχισμό προστασίας, οικιακά και τεχνικά υφάσματα. Πρόσφατα, η τεχνολογία μικροκάψουλων PCM τράβηξε την προσοχή ερευνητών από πανεπιστήμια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ευρεία δημοσίευση άρθρων σχετικά με τις μεθόδους εισαγωγής μικροκάψουλων PCM σε υφάσματα [1-18][1-36] και με τις ιδιότητες των υφασμάτων αυτών [1-49][1-51].

2.6.2 Λειτουργία της δομής των υφασμάτων με PCM

Υπάρχουν αρκετά θερμικά αποτελέσματα, που προκύπτουν από την ενσωμάτωση των PCM σε υφασμάτινα υποστρώματα:

- Ψύξη, από την απορρόφηση θερμότητας από το PCM
- Θέρμανση, από τη διάχυση θερμότητας από το PCM
- Θερμο-ρύθμιση, ως αποτέλεσμα είτε της απορρόφησης, είτε της διάχυσης θερμότητας του PCM, που διατηρεί τη θερμοκρασία του υποστρώματος που το περιβάλλει, σχεδόν σταθερή
- Ένα ενεργό φράγμα θερμότητας, ως αποτέλεσμα είτε της απορρόφησης, είτε της διάχυσης θερμότητας του PCM, που δημιουργεί ένα φράγμα θερμότητας στο ένδυμα που το περιβάλλει, το οποίο ρυθμίζει τη ροή της θερμότητας μέσω του υποστρώματος και την προσαρμόζει στις θερμικές ανάγκες [1-43][1-44].

Η λειτουργία του υποστρώματος με PCM, ως φράγμα ή ρυθμιστής θερμότητας, εξελίσσεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αλλαγής φάσης. Καθώς το PCM αλλάζει φάση, μπορεί ανάλογα με την αρχική του κατάσταση, είτε να απορροφήσει, είτε να απελευθερώσει μία ποσότητα θερμότητας ίση με τη θερμότητα τήξης του, ενώ διατηρεί σταθερή θερμοκρασία. Με αυτό τον τρόπο, θερμότητα μπορεί να χαθεί ή να ανακτηθεί και από τις δύο πλευρές αυτού του φράγματος, ενώ η θερμοκρασία του τελευταίου παραμένει σταθερή. Αυτό ισχύει μέχρι το σύνολο των PCM να λιώσει ή να στερεοποιηθεί. Μετά από αυτό το σημείο, όλη η αποθηκευμένη θερμοκρασία του PCM έχει εξαντληθεί, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μια αισθητή αλλαγή στη θερμοκρασία του. Από εδώ και πέρα, το υπόστρωμα με PCM λειτουργεί σαν ένα συμβατικό ύφασμα. Τα επιθυμητά θερμικά αποτελέσματα πρέπει να προσδιοριστούν, πριν την επιλογή του PCM. Η αποδοτικότητα και η διάρκεια των αποτελεσμάτων αυτών εξαρτώνται από τη συνολική θερμική χωρητικότητα του PCM που έχει εισαχθεί στο υπόστρωμα, το εύρος της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, τη δομή του υποστρώματος και τη δομή του τελικού προϊόντος.

Η συνολική θερμική χωρητικότητα ενός PCM εξαρτάται από την ιδιαίτερη θερμική χωρητικότητά του (λανθάνουσα θερμότητα της αλλαγής φάσης) και την ποσότητα που εφαρμόζεται στο υφασμάτινο υπόστρωμα. Η απαραίτητη ποσότητα PCM μπορεί να υπολογιστεί, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες της εφαρμογής, τα επιθυμητά θερμικά αποτελέσματα και τη διάρκεια τους και τη θερμική χωρητικότητα του συγκεκριμένου PCM. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμική απόδοση του κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος είναι απαραίτητο:

- Να επιλεγεί το κατάλληλο PCM
- Να προσδιοριστεί η επαρκής ποσότητα PCM
- Να επιλεγεί η κατάλληλη ινώδης δομή
- Να σχεδιαστεί το προϊόν.

Η επιλογή του PCM που θα χρησιμοποιηθεί στην ινώδη δομή, εξαρτάται από δύο θεμελιώδεις παράγοντες: την λανθάνουσα θερμότητα της αλλαγής φάσης και τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η λανθάνουσα θερμότητα της αλλαγής φάσης, τόσο καλύτερο είναι το PCM, καθώς μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτό περισσότερη θερμική ενέργεια. Η επιλογή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης εξαρτάται, κυρίως, από το σκοπό της εφαρμογής του υφάσματος. Το εύρος της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο εύρος αλλαγής φάσης της εφαρμογής.

Για να επιλεγεί η κατάλληλη ινώδης δομή είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη, εάν η δομή του υφάσματος μπορεί να φέρει μία ικανοποιητική ποσότητα PCM και το εάν μπορεί να παρέχει μία ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας στις μικροκάψουλες PCM.

2.6.3 Η απόδοση των PCM στην ένδυση

Η κύρια λειτουργία της ένδυσης είναι το να παρέχει προστασία σε αυτόν που φοράει τα ρούχα, από δυσμενή περιβάλλοντα. Λόγω του ότι το ανθρώπινο όν είναι θερμόαιμο, το ανθρώπινο σώμα ρυθμίζει την θερμοκρασία του γύρω στους 37 °C. Το ανθρώπινο σώμα ρυθμίζει τη θερμοκρασία του πυρήνα του με αγγειοκινητικές ενέργειες, μυϊκή δραστηριότητα, παραγωγή ιδρώτα και παραγωγή θερμότητας μέσω του μεταβολισμού [1-45]. Η σωματική δραστηριότητα και η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος προκαλούν μια αύξηση στη θερμοκρασία του πυρήνα. Μια θερμοκρασία γύρω στους 38 °C είναι συνηθισμένη σε μέτρια δραστηριότητα. Σε πιο υψηλή δραστηριότητα παρατηρούνται τιμές μέχρι και 39 °C. Η ποσότητα της θερμοκρασίας που παράγεται από το ανθρώπινο σώμα καθορίζεται από το μεταβολισμό. Σε ανάπαυση, το ανθρώπινο σώμα απελευθερώνει την ποσότητα θερμότητας που χρειάζεται για τις βασικές λειτουργίες του, της τάξης των 100 W και παράγει λίγο ιδρώτα. Κατά τη διάρκεια αυξημένης δραστηριότητας, η θερμοκρασία που παράγεται από τη φυσική μυϊκή δραστηριότητα προστίθεται γρήγορα στη βασική μεταβολική θερμότητα και φτάνει τα 1000 W [1-46]. Η αυξημένη θερμότητα πρέπει να απελευθερωθεί στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με υψηλότερη ροή αίματος στα άκρα, είτε με την εξάτμιση του υγρού ιδρώτα στην επιφάνεια του δέρματος. Χάρη στην ικανότητα του σώματος να ιδρώνει, μεγάλη ποσότητα θερμότητας μπορεί να αποβληθεί από το σώμα: 1 dm ιδρώτα που εξατμίζεται στην επιφάνεια του δέρματος, αντιστοιχεί σε περίπου 670 W θερμότητας που απομακρύνονται από το σώμα [1-45].

Η φυσιολογική ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος εμποδίζεται μερικώς ή ολοκληρωτικά από την ένδυση. Η ένδυση, ένα ενδιάμεσο μέσο μεταξύ δέρματος και περιβάλλοντος, εμποδίζει τη θερμότητα και τον εξατμισμένο ιδρώτα να δραπέτευσει από το ανθρώπινο σώμα. Η παρουσία ιδρώτα πάνω στο δέρμα είναι ένας σημαντικός παράγοντας δυσφορίας. Γενικά μια άνετη θερμοκρασία του δέρματος θεωρείται ότι είναι γύρω στους 33-35 °C, χωρίς την παρουσία ιδρώτα [1-47][1-48].

Τα υφάσματα που περιέχουν PCM φαίνεται πως συνεισφέρουν στην άνεση, μειώνοντας ή αποτρέποντας την υπερθέρμανση, που είναι και η αιτία της εφίδρωσης. Το ύφασμα με PCM αντιδρά άμεσα στις αλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και προσαρμόζεται στις επικρατούσες ζεστές ή κρύες συνθήκες. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της σωματικής δραστηριότητας ή της υψηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, το PCM αντιδρά και απορροφά τη θερμότητα. Η αποθήκευση της πλεονάζουσας αυτής θερμότητας προκαλεί την υγραποίηση του PCM. Αυτή η αλλαγή φάσης παράγει ένα προσωρινό ψυκτικό φαινόμενο στα στρώματα της ένδυσης. Όταν το PCM λιώσει τελείως, η αποθήκευση θερμότητας σταματά. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέσει ή όταν το σώμα ηρεμήσει, τότε το PCM απελευθερώνει την θερμότητα και δημιουργεί ένα θερμικό φαινόμενο στα στρώματα της ένδυσης. Αυτή η ανταλλαγή της θερμότητας ελαχιστοποιεί τις αλλαγές στην θερμοκρασία του δέρματος. Τα PCM που εισάγονται σε ενδύματα θα πρέπει να λειτουργούν κοντά στην θερμοκρασία του ανθρώπινου δέρματος. Η θερμοκρασία αυτή είναι διαφορετική για διαφορετικά σημεία του σώματος [1-45]. Η μέση θερμοκρασία του κεφαλιού είναι 35 °C, η μέση θερμοκρασία του δέρματος γύρω από την κοιλιακή χώρα είναι 34-35 °C, ενώ η μέση θερμοκρασία στα χέρια και στα πόδια είναι 31-32 °C. Για αυτό και είναι σημαντικό να επιλέγονται PCM με μια σχετική θερμοκρασία τήξης.

Τα ενδύματα που είναι φτιαγμένα από υφάσματα με PCM, έχουν ως σκοπό να μετριάσουν την θερμοκρασία του δέρματος κατά τη διάρκεια διαφορετικών επιπέδων δραστηριότητας. Τα στρώματα του ενδύματος που περιέχουν τα PCM πρέπει να περάσουν από το μεταβατικό εύρος θερμοκρασιών, πριν τα PCM αλλάξουν φάση και είτε να απορροφήσουν, είτε να παράγουν θερμότητα. Τα PCM δεν έχουν καμία επίδραση, όταν βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση. Την τελευταία δεκαετία, τα υφάσματα που περιέχουν PCM έκαναν την εμφάνισή τους σε ρούχα πολύ γνωστών εταιριών. Παρόλα αυτά υπάρχουν πολύ λίγα δημοσιευμένα άρθρα σχετικά με την θερμική απόδοση ενδυμάτων, φτιαγμένων από υφάσματα με PCM.

Ο Skim και ο McCullough [1-49] ερεύνησαν την επίδραση των PCM στην μεταφορά θερμότητας και υγρασίας σε ρούχα, κατά τη διάρκεια αισθητών μεταβολών της θερμοκρασίας. Στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν ένα ανοιχτού-κελύφους, υδρόφιλο, διογκούμενο αφρό που περιείχε 60% μικροκάψουλες PCM. Μέτρησαν την επίδραση ενός αλλά και δύο στρωμάτων από υλικά PCM για ενδύματα στην μείωση της απώλειας θερμότητας ή του κέρδους της, σε ένα ειδικό ανδρικό κελό, καθώς μετακινούνταν από ένα θερμό θάλαμο σε έναν ψυχρό και αντίστροφα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η θερμική ή ψυκτική επίδραση διαρκούσε περίπου 15 λεπτά και ότι η απελευθέρωση θερμότητας από τα PCM σε ένα κρύο περιβάλλον εξαρτιόταν από το πλήθος των στρωμάτων PCM, τον προσανατολισμό τους στο ανθρώπινο σώμα και από το πόσο μεγάλο μέρος του σώματος καλυπτόταν από ενδύματα PCM. Κατέληξαν στο ότι οι μικροκάψουλες PCM μπορούν να προκαλέσουν μια μικρή και προσωρινή ψύξη ή θέρμανση, όταν τα στρώματα υφάσματος που τα περιέχουν φτάσουν την θερμοκρασία αλλαγής φάσης των PCM. Υπέθεσαν ότι η επίδραση των υλικών αλλαγής φάσης μπορούσε να μεγιστοποιηθεί, όταν ο φορέας περνούσε επανειλημμένα από θερμοκρασιακές μεταβολές (π.χ. πηγαίνοντας ξανά και ξανά από ένα ψυχρό σε ένα θερμό περιβάλλον) ή αγγίζοντας κατά διαστήματα ή κρατώντας κρύα αντικείμενα.

Ο Ghali [1-50] ανέλυσε την επίδραση των PCM στην θερμική απόδοση των υφασμάτων κατά την διάρκεια περιοδικού εξαερισμού. Τα αποτελέσματα που παρατηρηθήκαν κατέδειξαν ότι η παρουσία μικροκάψουλων PCM σε υφάσματα προκαλεί προσωρινή θέρμανση, όταν υπόκεινται σε ξαφνική μεταβολή από ένα κρύο σε ένα ζεστό περιβάλλον. Αυτό έγινε φανερό με μια σύγκριση της απώλειας θερμότητας κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, σε σχέση με υφάσματα χωρίς μικροκάψουλες PCM. Η διάρκεια της αλλαγής φάσης μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας εξαερισμού, ενώ η διάρκεια αυξάνεται με την αύξηση της αναλογίας PCM στο ύφασμα και με μια μεγάλη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο Li και ο Zhu [1-51] παρουσίασαν το μαθηματικό μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας και υγρασίας σε πορώδη υφάσματα που περιέχουν μικροκάψουλες PCM. Με το καθορισμό των αρχικών και τελικών συνθηκών, μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικά η διανομή της θερμοκρασίας, η συγκέντρωση της υγρασίας και η περιεκτικότητα νερού σε ίνες υφασμάτων, που περιέχουν διαφορετικές ποσότητες PCM. Αυτοί συγκρίνανε τις προβλέψεις στην αλλαγή της θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια μεταβολών στην υγρασία και στη θερμοκρασία, με πειραματικές μετρήσεις και βρήκαν πως αυτές συμφωνούσαν. Κατά τη γνώμη τους το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό καινούριων υφασμάτων, που περιέχουν μικροκάψουλες PCM και σε προϊόντα έξυπνων ενδυμάτων.

2.6.4 Παραγωγή υφασμάτων που περιέχουν μικροκάψουλες PCM

Στις εφαρμογές στην κλωστοϋφαντουργική βιομηχανία τεχνολογίας μικροκάψουλων PCM, που περιέχουν επιλεγμένα PCM μπορούν να εφαρμοστούν σε ίνες με μία διαδικασία υγρής κλώσης, ενσωματωμένα μέσα σε αφρό ή σε ένα σύνδεσμο και να εφαρμοστεί τοπικά στο ύφασμα ή να εισαχθεί σε μια κελυφοειδής δομή, φτιαγμένη από ένα υφασμάτινο ενισχυμένο συνθετικό υλικό.

Ενσωμάτωση των μικροκάψουλων PCM μέσα στις ίνες

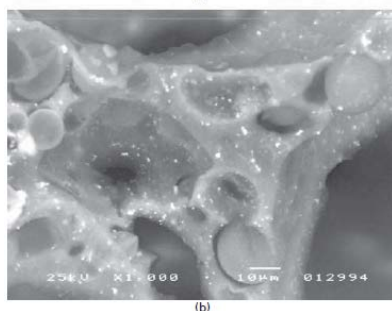
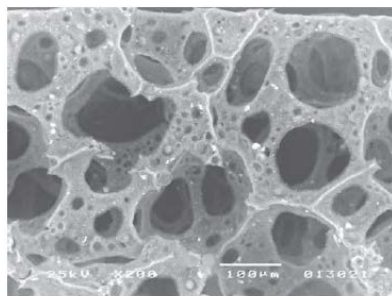
Το 1988, ο Bryant και ο Colvin [1-19] παρουσίασαν μια μελέτη σκοπιμότητας ινών με PCM, όπως ακριλικοί υδρογονάνθρακες (π.χ. εικοσάνια ή δεκαοκτάνια) μόνιμα ενσωματωμένων στη δομή των ινών, κατά τη διάρκεια της παρασκευής. Πλαστικά κρυσταλλικά υλικά, όπως τα DMP (2,2-διμεθυλο-1,3-προπανεδιόλη), τα HMP (2-υρδοξυλομεθύλιο-2-μεθύλιο-1,3-προπανεδιόλη) και άλλα παρόμοια μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στην παρασκευή της ίνας, οι επιλεγμένες μικροκάψουλες PCM προστίθενται στο υγρό πολυμερές ή στο πολυμερές

διάλυμα και στη συνέχεια η ίνα διαστέλλεται σύμφωνα με τις συμβατικές μεθόδους όπως, η στεγνή ή η υγρή κλώση πολυμερών υγρών ή πολυμερών διαλυμάτων.

Υφάσματα μπορούν να σχηματιστούν από ίνες που περιέχουν PCM με τις συμβατικές μεθόδους ύφανσης, πλέξης ή μη ύφανσης και αυτά τα υφάσματα να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές ένδυσης. Τα πλεονεκτήματα της εισαγωγής PCM μέσα σε ίνες είναι τα ακόλουθα:

- Οι μικροκάψουλες PCM είναι μόνιμα φυλακισμένες μέσα στην ίνα
- Οι ιδιότητες των υφασμάτων (απαλότητα, αντοχή κ.τ.λ.) δεν αλλάζουν σε σχέση με υφάσματα φτιαγμένα από συμβατικές ακρυλικές ίνες
- Η ίνα παρασκευάζεται χωρίς ανάγκη διαφοροποιήσεων στην κλώση ινών και στη βαφή και στη πλέξη υφασμάτων.

Προς το παρόν, μικροκάψουλες PCM έχουν εισαχθεί μόνο σε ακρυλικές ίνες (της φίρμας Outlast) [1-25][1-48]. Οι μικροκάψουλες, που έχουν εισαχθεί στην κλώση των ακρυλικών ινών, έχουν ένα ανώτερο όριο της τάξης των 5-10%, επειδή οι φυσικές ιδιότητες των ινών αρχίζουν να φθίνουν πάνω από αυτό το όριο και η καλύτερη διαθέσιμη ίνα είναι περίπου 2,2 dtex. Λόγω της μικρής περιεκτικότητας μικροκάψουλων μέσα στις ίνες, η θερμική χωρητικότητα είναι μάλλον μέτρια, περίπου 8-12 J/g.



2.5 PCM σε ακρυλικές ίνες (H/N Μικροσκόπιο μεγέθυνση X 200 και X 1000)

Η εισαγωγή PCM μέσα σε ακρυλικές ίνες επιτυγχάνεται εύκολα, χάρη στη διαδικασία υγρής διάχυσης για το σχηματισμό ακρυλικών ινών. Ωστόσο, είναι πιο δύσκολη η εισαγωγή PCM τέτοιων ινών, λόγω του ότι κατά τη διαδικασία παραγωγής τους οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι της τάξης των 200-380 °C και οι πιέσεις μπορούν να φτάσουν τα 2×10^4 kN/m². Τέτοιες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα κελύφη των μικροκάψουλων και να προκαλέσουν την υποβάθμιση της ποιότητας των PCM. Η υποβάθμιση των PCM μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκείς θερμικές ιδιότητες. Παρόλα αυτά, οι επιστήμονες συνεχίζουν την προσπάθεια να αναπτύξουν ίνες «melt-spun» με μικροκάψουλες PCM. Η διαδικασία του σχηματισμού ινών πολυπροπυλενίου, που περιέχουν ακρυλικούς υδρογονάνθρακες, μελετήθηκε από τον Leskonsek [1-53] σε μια εργαστηριακή συσκευή Spin draw. Μικροκάψουλες με διάμετρο 2 μm επιλέχθηκαν ως οι πιο κατάλληλες για κλώση. Το υλικό του κελύφους των μικροκάψουλων ήταν ρητίνη μελαμίνης-φορμαλδεΐδης, ενώ ο ακρυλικός υδρογονάνθρακας με σημείο τήξης 50 °C αποτελούσε τον πυρήνα. Το κύριο

πρόβλημα ήταν η επίτευξη ομοιογενούς διανομής των μικροκάψουλων μέσα στις ίνες. Οι μικροκάψουλες είχαν την τάση να σχηματίζουν συστάδες που γινόταν μεγαλύτερες με την κλώση της ίνας και επανειλημμένα προκαλούσαν ασυνέχειες στη διαδικασία, σπάσιμο νημάτων και μεγέθυνση του πάχους των ινών.

Επίστρωση αφρού PU που περιέχει μικροκάψουλες PCM σε υφάσματα

Ο Colvin και ο Bryant [1-20] περιέγραψαν μια μέθοδο παρασκευής υλικών μονωτικού αφρού, που περιείχε μικροκάψουλες PCM. Οι επιλεγμένες μικροκάψουλες PCM προστίθενται στο υγρό πολυμερές ή ελαστομερές και το υγρό ανακατεύεται, ώστε να διασφαλιστεί η διαβροχή και η ίση διασπορά σε όλο το μείγμα. Συνήθως η συγκέντρωση των μικροκάψουλων έχει ένα εύρος από 20% μέχρι 60% του συνολικού βάρους. Στη συνέχεια, απλώνεται ο αφρός στο πολυμερές υλικό. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει προσθήκη ενός σκληρυντικού παράγοντα, ο οποίος προκαλεί μια χημική αντίδραση, θερμική ρύθμιση του υλικού βάσεως με θερμότητα ή διοχέτευση ενός αερίου μέσω του υγρού πολυμερούς (ή ελαστομερούς), ενώ σκληραίνει. Η μικροκάψουλες πρέπει να προστίθενται στο υγρό πολυμερές ή ελαστομερές πριν τη σκλήρυνση.

Μετά το ψεκασμό του αφρού, οι μικροκάψουλες θα ενσωματωθούν εντός της δομής του υλικού βάσεως με τέτοιο τρόπο, ώστε να φυλακιστούν μεμονωμένα και να ενσωματωθούν εντός του υλικού και ο χώρος μεταξύ τους να είναι από το υλικό βάσης και όχι από αέριο αφρισμού. Η επένδυση αφρού που περιέχει τα PCM μπορεί να είναι από νεοπρέν ή πολυουρεθάνη. Η εφαρμογή επένδυσης αφρού συνίσταται ιδιαίτερος για τους παρακάτω λόγους:

- Μπορεί να εισαχθεί μεγαλύτερη ποσότητα μικροκάψουλων
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά PCM, δίνοντας ένα μεγαλύτερο εύρος ρύθμισης της θερμοκρασίας
- Οι μικροκάψουλες μπορούν να διανεμηθούν ανισομερώς στα στρώματα του αφρού. Η δυνατότητα ανισομερούς εισαγωγής των μικροκάψουλων στον αφρό μπορεί να ενισχύσει το θερμο-ρυθμιστικό φαινόμενο, με τη συγκέντρωση PCM προς στο εσωτερικό του ρουχισμού.

Η επένδυση αφρού με μικροκάψουλες PCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φόδρα σε μια ποικιλία ρούχων: γάντια, υποδήματα, καπέλα, πανωφόρια. Πριν την εισαγωγή σε ενδύματα ή υποδήματα, η επένδυση αφρού συνήθως προσκολλάται στο ύφασμα, με οποιοδήποτε συμβατικό μέσο όπως κόλλα, σύντηξη ή ελασματοποίηση. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η εγκάρσια τομή πλεκτού υφάσματος με αφρό πολυουρεθάνης, που περιέχει μικροκάψουλες PCM.

Εισαγωγή μικροκάψουλων PCM σε ινώδης δομές με διάφορες διαδικασίες

Τη τελευταία δεκαετία, αναπτύχθηκαν αρκετές μέθοδοι εισαγωγής μικροκάψουλων PCM σε ινώδης δομές για τη παραγωγή υφασμάτων με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Ένα πλήθος πειραματικών συνθηκών έπρεπε να βελτιωθούν, πριν αυτές οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την παραγωγή υφασμάτων με την επιθυμητή δομή και ιδιότητες, μπορούσαν να έχουν πρακτικές εφαρμογές. Η περισσότερη δουλειά σε αυτόν τον τομέα μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας και μόνο λίγα χαρτιά δημοσιευμένα στην λογοτεχνία αναφέρουν τη σύνθεση των μικροκάψουλων PCM, το φινίρισμα των υφασμάτων και την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους, όπως τις θερμικές ιδιότητες τους και την αντοχή τους.

Οι μικροκάψουλες PCM εφαρμόζονται σε μια ινώδη δομή με τη χρήση ενός συνδετικού (π.χ. ακρυλική ρητίνη). Όλες οι κοινές μέθοδοι επένδυσης, όπως η επικάλυψη μέσω ρολού και

αέρα (knife over roll, knife over air), τύπωμα από την οθόνη, τύπωμα γκραβούρας, επικάλυψη βύθισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή PCM στο ύφασμα, με διασπορά μέσω ενός πολυμερούς αφρού. Επίσης, το σκεύασμα που περιέχει τις μικροκάψουλες PCM, μπορεί να εφαρμοστεί στο ύφασμα με την άμεση τεχνική ψεκασμού ακροφύσιου.

Τη μέθοδος για τη κατασκευή της σύνθεσης της επένδυσης περιέγραψε ο Zuckerman [1-27]. Μια σύνθεση επένδυσης για υφάσματα περιλαμβάνει βρεγμένες μικροκάψουλες, που περιέχουν PCM, διασκορπισμένες σε ένα πολυμερές συνδετικό μέσο, μια τασιενεργή ουσία, ένα διαχυτικό, ένα αντιαφριστικό και ένα πηκτικό. Μέσω πειραμάτων, ο Zuckerman διαπίστωσε ότι βρέχοντας τις μικροκάψουλες PCM με νερό και διατηρώντας μια ομοιόμορφη διασπορά των μικροκάψουλων σε μια βρεγμένη επένδυση, ελαχιστοποιείται η τάση των εν λόγω μικροκάψουλων να αποσταθεροποιούν το πολυμερές συνδετικό. Η σύνθεση της επένδυσης ετοιμάζεται με την ανάμειξη στεγνών μικροκάψουλων με νερό, ώστε να προκληθεί η διαστολή τους. Το τασιενεργό μειώνει την επιφανειακή τάση των στρωμάτων των μικροκάψουλων και επομένως προάγει τη διαβροχή τους. Ένας αντιαφριστικός παράγοντας προστίθεται και αναμειγνύεται αργά με το μείγμα για να αφαιρεθεί ο αέρας, που έχει παγιδευτεί με τη μορφή φυσαλίδων, στο μείγμα. Ένα πηκτικό προστίθεται για να ρυθμίσει το ιξώδες του μείγματος και να αποτρέψει τις μικροκάψουλες από το να βυθιστούν ή να επιπλεύσουν μέσα στο μείγμα. Η ρύθμιση του pH στο 8.5 ή και περισσότερο προάγει την διαστολή των μικροκάψουλων. Η διαστολή ολοκληρώνεται συνήθως μέσα σε 6 με 24 ώρες. Στη συνέχεια, οι μικροκάψουλες προστίθενται σε ένα μείγμα από πολυμερές, διαχυτικά και τασιενεργά, που έχει ένα pH σχεδόν ίδιο με το pH των μικροκάψουλων. Το πολυμερές συνδετικό μπορεί να έχει τη μορφή διαλύματος, διαχυτικού ή γαλακτώματος. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται οι ακρυλικές ρητίνες ή τα συμπολυμερή ακρυλικά / βουταδιενίου. Η περισσότερο προτιμώμενη αναλογία συστατικών στη σύνθεση της επένδυσης είναι:

- 70 με 300 μέρη ξηρού βάρους μικροκάψουλων, για κάθε 100 μέρη ξηρού βάρους ακρυλικής ρητίνης
- Αντιαφρικός παράγοντας 0.1% με 1% ξηρού βάρους κάθε διαλυτικού και τασιενεργού του ξηρού βάρους των μικροκάψουλων
- νερό 40% με 60% της τελικής υγρής σύνθεσης της επένδυσης
- αντιαφρικός παράγοντας 0.1% με 0.5% της τελικής υγρής σύνθεσης της επένδυσης

Η χρήση πολυμερών συνδετικού έχει κάποια μειονεκτήματα. Η ποσότητα που χρησιμοποιείται θα πρέπει να επαρκεί για να αναμειχθούν καλά οι μικροκάψουλες, αλλά οι ιδιότητες των υφασμάτων, όπως η διαπερατότητα αέρα, η αναπνευστικότητα, η θερμική αντοχή, απαλότητα και αντοχή σε εφελκυσμό, μπορούν να επηρεαστούν δυσμενώς όσο το ποσοστό του συνδετικού συνεχίζει να αυξάνεται. Ο Pushaw [1-26] ανέφερε ότι ήταν δύσκολο να διατηρηθεί η ανθεκτικότητα, η διαπερατότητα των υδρατμών, η ελαστικότητα και η απαλότητα στα επενδυμένα υφάσματα, όταν η επένδυση επιφορτίζεται με μια αρκετά υψηλή περιεκτικότητα από μικροκάψουλες PCM.

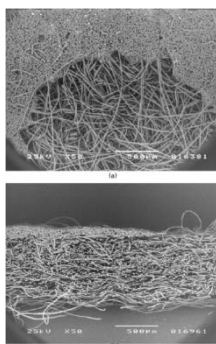
Ο Choi [1-35] συνέθεσε, με τη μέθοδο του διεπιφανειακού πολυμερισμού, το κέλυφος από μελαμίνη-φορμαλδεΐδη σε μικροσφαιρίδια από δεκαοκτάνια. Η μέση διάμετρος των μικροκάψουλων κυμαίνεται από 1 έως 1,5 μm και το σχήμα τους ήταν σχεδόν σφαιρικό. Οι μικροκάψουλες αναμείχθηκαν με ακρυλικό και ουρεθανικό σύνδεσμο και το μείγμα επένδυσης εφαρμόστηκε σε πολυεστερικά υφάσματα, με τις μεθόδους επικάλυψης πάνω σε ρολό και εκτύπωσης οθόνης. Βρήκε ότι οι θερμικές ιδιότητες των επικαλυμμένων υφασμάτων αυξανόταν, όσο μεγάλωνε η συγκέντρωση των μικροκάψουλων, αλλά δεν υπήρχε μεγάλη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο μεθόδων. Οι θερμικές ιδιότητες των επενδυμένων υφασμάτων, που αναλύθηκαν από το DSC, ήταν φτωχές λόγω του ότι η λανθάνουσα θερμότητα των δειγμάτων υφάσματος, με δυσκολία έφτανε τα 7,5 J/g. Είναι φανερό ότι η

διατμητική ακαμψία και η σκληρότητα κάμψης των επικαλυμμένων υφασμάτων ήταν καλύτερη σε σύγκριση με τα τυπωμένα υφάσματα.

Οι Chung και Cho [1-36] ερεύνησαν την πιθανότητα παραγωγής θερμικά προσαρμοζόμενων, διαπερατών από υδρατμούς και νερό-απωθητικών υφασμάτων. Οι μικροκάψουλες που περιέχουν δεκαοκτάνια προστέθηκαν στην πολουρεθάνη και το μείγμα επένδυσης διαλύθηκε μέσα σε DMF. Αυτό επενδύθηκε σε υφάσματα από 100% νάιλον. Η μέση διάμετρος των μικροκάψουλων κυμαίνεται από 3 μέχρι 5 μm . Λόγω του μεγαλύτερου όγκου των μικροκάψουλων η λανθάνουσα θερμότητά τους ήταν υψηλότερη και έτσι η λανθάνουσα θερμότητα του επενδυμένου υφάσματος ήταν περίπου 14 J/g. Αυτή η ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας διατηρήθηκε για 30 πλυσίματα. Η νερό-απωθητικότητα του υφάσματος επενδυμένου με μικροκάψουλες PCM ήταν η ίδια με ένα επενδυμένο ύφασμα χωρίς PCM, αλλά η αντίσταση στο νερό μειώθηκε δραματικά.

Ο Shin [1-34] ετοίμασε μικροκάψουλες από μελαμίνη-φορμαλδεΐδη που περιείχαν εικοσάνια, με διεπιφανειακό πολυμερισμό. Η μέση διάμετρος των μικροκάψουλων ήταν 1,89 μm και οι περισσότερες μικροκάψουλες είχαν μέγεθος 0,1-10 μm . Η αναλογία κελύφους-πυρήνα ήταν περίπου 53% και η χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης των μικροκάψουλων ήταν 143 J/g. Οι μικροκάψουλες προστέθηκαν στο πλεκτό ύφασμα πολυεστέρα με τη συμβατική μέθοδο «rad-dry-cure». Το ύφασμα αυτό είχε ικανότητα θερμικής χωρητικότητας 0.91-4.41 J/g, ανάλογα με την προσθήκη μικροκάψουλων. Μετά από πέντε πλυσίματα διατηρούσε το 40% της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι μικροκάψουλες με μεγάλη σχέση πυρήνα-κελύφους, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των θερμο-ρυθμιστικών ιδιοτήτων των υφασμάτων.

Ο Lotenbach και ο Sutter [1-54] περιέγραψε μια νέα μέθοδο εκτύπωσης οθόνης σε επιφάνειες υφασμάτων, κατά τη διάρκεια της οποίας η τύπωση παρέχεται σε μορφή χνουδιού, που περιέχουν μεγάλη συγκέντρωση από μικροκάψουλες PCM. Κατά τη γνώμη τους, η συσσώρευση των PCM με τη μορφή χνουδιού διατηρεί την ελαστικότητα, καθώς και την ικανότητα διάχυσης υδρατμών και υγρασίας του υποστρώματος. Η Εικόνα 2.6 δείχνει τη SEM εικόνα ενός μη υφάνσιμου δείγματος που περιέχει μικροκάψουλες PCM, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί με αυτή την τεχνική. Οι μικροκάψουλες βρίσκονται μόνο στη μια πλευρά, σχηματίζοντας ένα πολύ λεπτό στρώμα 0.10-0.14 mm. Στο δείγμα μη υφάνσιμων φτιαγμένων με τη μέθοδο ψεκασμού, οι μικροκάψουλες βρίσκονται και στις δύο πλευρές σε λεπτά στρώματα πάχους 14 mm. Στο δείγμα μη υφάνσιμων φτιαγμένων με τη μέθοδο «rad-mangle», οι μικροκάψουλες βρίσκονται σε όλο το αντιπροσωπευτικό δείγμα του υπό δοκιμή μη υφάνσιμου.



2.6 Επιφάνεια και εγκάρσια τομή ενός μη υφάνσιμου δείγματος με μικροκάψουλες PCM

2.6.5 Εφαρμογές των υφασμάτων που περιέχουν PCM

Υφάσματα που περιέχουν μικροκάψουλες PCM έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων της ένδυσης, οικιακών υφασμάτων και τεχνικών υφασμάτων. Κάποιες υποδειγματικές εφαρμογές παρουσιάζονται παρακάτω.

Ένδυση

Τομείς μαζικής χρήσης είναι η:

- επίσημη ένδυση, έξυπνα πανωφόρια, γιλέκα, καπέλα, γάντια και αδιάβροχα
- σπορ ένδυση, πανωφόρια και επένδυση για μπουφάν, μπότες, παπούτσια γκολφ, παπούτσια πεζοπορίας, κάλτσες, γάντια σκι και snowboard
- ένδυση προστασίας.



Σχήμα 2.7 Κάλτσα με PCM, πλεκτή μπλούζα με PCM, μπουφάν του σκι και λειτουργικό εσώρουχο παντελόνι με PCM [3]

Σε προστατευτικά ενδύματα με PCM οι λειτουργίες είναι οι παρακάτω:

- απορρόφηση της πλεονάζουσας θερμότητας του σώματος
- μόνωση, που προκαλείται από την θερμική διάχυση των PCM μέσα στην ινώδη δομή
- θερμο-ρύθμιση, η οποία διατηρεί τη θερμοκρασία του μικροκλίματος σχεδόν σταθερή.

Η Pause [1-55] περιέγραψε την εφαρμογή των PCM σε μη υφάνσιμη προστατευτική ένδυση, που χρησιμοποιείται στον έλεγχο παρασίτων ή στη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων. Για να βελτιωθεί η άνεση αυτών των προστατευτικών ενδυμάτων, τα PCM εισήχθησαν σε ένα λεπτό φιλμ από πολυμερές και εφαρμόστηκαν στην εσωτερική μεριά του συστήματος ένδυσης, μέσω συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών κατέδειξαν ότι η ψύξη από τα PCM μπορεί να καθυστερήσει την αύξηση της θερμοκρασίας και να περιορίσει την αύξηση της υγρασίας στο μικροκλίμα. Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος που φοριέται το ένδυμα μπορεί να παραταθεί χωρίς να προκληθεί υπερθερμία.

Προστατευτικά κράνη έχουν θερμική αντίσταση περίπου $1.0 \text{ m}^2 \text{ k/W}$ και λόγω της δομής τους, η θερμότητα που παράγεται από αυτόν που το φοράει, μπορεί να διαχυθεί μόνο μέσω της συναγωγής της θερμότητας. Τα αποτελέσματα δοκιμών που διεξήχθησαν από τον Weder και τον Herring [1-56] κατέδειξαν ότι η εισαγωγή PCM στη φόδρα του κράνους, οδηγεί στην αισθητή μείωση της θερμοκρασίας στην περιοχή του κεφαλιού.

Στην περίπτωση ενδυμάτων χημικής ή βιολογικής προστασίας, μπορεί να υπάρξει αντίθεση μεταξύ της προστατευτικής λειτουργίας του ρουχισμού και της φυσιολογικής ρύθμισης της θερμοκρασίας του σώματος. Η αντίθεση αυτή οδήγησε σε δυσφορία και σε σωματική

κόπωση και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να θέσει το άτομο στον κίνδυνο υπερθερμίας. Ο Colvin και ο Bryant [1-29] ανέπτυξαν και κατοχύρωσαν το ένδυμα ψύξης μικροκλίματος για το στρατό και τους πολίτες, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από τα προστατευτικά ενδύματα, για να παρέχει σημαντική ψύξη μικροκλίματος για 1-3 ώρες κάτω από ασυνήθιστα θερμές συνθήκες. Αυτό το ένδυμα ψύξης χρησιμοποιεί μικροκάψουλες PCM ομοιόμορφα διανεμημένες μέσα σε ελαφριά γιλέκα, φόδρες κράνους, καλύμματα και κολάρα. Η διάμετρος των μικροκάψουλων κυμαίνεται από 2 μέχρι 4 mm. Οι μικροκάψουλες που περιέχουν δεκαοκτάνια αλλάζουν φάση στους 26-28 °C. Άλλες θερμοκρασίες επίσης μπορούν να επιλεγθούν, αλλάζοντας τις μικροκάψουλες ή με χρήση μείγματος από αυτές, για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση τους σε διαφορετικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Οι μικροκάψουλες μπορούν να επαναφορτιστούν χωρίς απόψυξη.

Πρόσφατα, το Αμερικανικό πολεμικό ναυτικό διερεύνησε τη χρήση μικροκάψουλων PCM σε στεγανές στολές κατάδυσης για θερμική προστασία, σε εξαιρετικά ψυχρά νερά. Ο Nuckols [1-57] ανέπτυξε ένα αναλυτικό μοντέλο για ένα σύστημα στεγανής στολής, για να προβλέψει τη θερμική του απόδοση σε προσομοιωμένο περιβάλλον ωκεανού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών κατέδειξαν ότι ο αφρός με ενσωματωμένα PCM μπορεί να μειώσει την απώλεια θερμότητας κατά τη διάρκεια της αρχικής φάσης της κατάδυσης, με την απελευθέρωση της λανθάνουσας θερμότητας των μικροκάψουλων, κατά την έκθεση στο κρύο. Το αποτέλεσμα της απελευθέρωσης θερμότητας είναι η μείωση της πτώσης της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της στολής. Η μείωση της απώλειας θερμότητας του δύτη θα συνεχιστεί, μέχρι τα PCM μέσα στις μικροκάψουλες στερεοποιηθούν και από αυτό το σημείο και μετά ο αφρός συμπεριφέρεται σαν μια συμβατική μόνωση στολής.

Υφάσματα οικιακής χρήσης

Ο εξοπλισμός με οικιακά υφάσματα που περιέχουν μικροκάψουλες PCM οδηγεί σε μια βελτίωση της θερμικής άνεσης των κατοικιών. Περσίδες και κουρτίνες με μικροκάψουλες PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση της απώλειας θερμότητας, μέσω των παραθύρων. Στους καλοκαιρινούς μήνες, μεγάλη ποσότητα θερμότητας διαπερνά τα κτήρια μέσω των παραθύρων, κατά την διάρκεια της μέρας. Στους χειμερινούς μήνες, τα παράθυρα είναι το κύριο μέσο απώλειας θερμότητας, κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα αποτελέσματα δοκιμών που διεξήγαγε η Pause σε κουρτίνες που περιέχουν μικροκάψουλες PCM, κατέδειξαν μια μείωση των θερμικών απωλειών κατά 30% σε σχέση με κουρτίνες χωρίς PCM.

Στα δωμάτια, είναι σύνηθες, να υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ οροφής και πατώματος. Κατά την διάρκεια θέρμανσης, η θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να υπερβεί τους 5 °C. Η αίσθηση άνεσης του ανθρώπου εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πατώματος και οροφής. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη η αίσθηση δυσφορίας. Τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειωθεί αυτή η διαφορά της θερμοκρασίας, μεταξύ οροφής και πατώματος και να τη διατηρήσουν σταθερή για κάποια χρονική περίοδο. Με τη χρήση πατώματος που έχει επίστρωση αφρού, που περιέχει μικροκάψουλες PCM, είναι δυνατόν να βελτιωθεί το κλίμα του δωματίου [1-58].

Οι μικροκάψουλες PCM μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης του κρεβατιού π.χ., στρώματα, καλύμματα στρωμάτων, μαξιλάρια, κουβέρτες. Ο Rock και ο Sharma [1-59] ανέπτυξαν θερμαντικά κλωστοϋφαντουργικά είδη με υλικά αλλαγής φάσης. Μια ινώδης ηλεκτρική κουβέρτα με ηλεκτρικές αντιστάσεις που περιέχει, επίσης, υλικά αλλαγής φάσης, τα οποία απελευθερώνουν και απορροφούν λανθάνουσα θερμότητα αντιδρώντας στο άνοιγμα και κλείσιμο της συσκευής, ενώ επιπλέον εξοικονομούν ενέργεια. Το θερμαντικό στοιχείο σχηματίζεται από ένα αγώγιμο νήμα. Με εφαρμογή τάσης στα θερμαντικά στοιχεία, δημιουργείται θερμότητα για την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στην κουβέρτα. Κατά τη φάση της παραγωγής θερμότητας, τα PCM που είναι ενσωματωμένα στη

κουβέρτα αναγκάζονται να αλλάξουν φάση από στερεά σε υγρά. Όταν η επιθυμητή θερμοκρασία επιτευχθεί, η παροχή τάσης διακόπτεται. Κατά τη φάση αυτή θερμότητα απελευθερώνεται από τη κουβέρτα. Ο ρυθμός της απώλεια θερμότητας μειώνεται με την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας από τα PCM καθώς αλλάζουν φάση, ενώ ψύχονται από υγρά σε στερεά.

Ιατρικά προϊόντα

Ο Buckley [1-22] περιέγραψε μια θεραπευτική κουβέρτα φτιαγμένη από εύκαμπτα στοιχεία PCM. Εάν μια τέτοια κουβέρτα περιέχει μικροκάψουλες PCM που έχουν θερμοκρασία αλλαγής φάσης χαμηλότερη της φυσιολογικής θερμοκρασίας του σώματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ρίξει τη θερμοκρασία ασθενών με πυρετό, με ένα επιμελή και ελεγχόμενο τρόπο. Μια προσεκτική επιλογή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης κάνει δυνατή την αποφυγή του κινδύνου υπερβολικής ψύξης, ένας κίνδυνος που υπάρχει στη χρήση παγοκυστών. Εναλλακτικά, κουβέρτες με PCM μπορούν να είναι χρήσιμες για την ελεγχόμενη θέρμανση ασθενών με υποθερμία. Μια άλλη θεραπευτική/ιατρική χρήση των PCM είναι η εισαγωγή τους σε ελαστικούς επιδέσμους ή ορθοπεδικά στηρίγματα αρθρώσεων. Έτσι η θερμό/παγό-θεραπεία μπορεί να συνδυαστεί με επιδέσμους στήριξης για αρθρώσεις ή μύες [1-22].

Υφάσματα αυτοκινήτου

Η Barbara Pause [1-55] επέδειξε ότι υπάρχουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα στην υιοθέτηση PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας και της άνεσης στο εσωτερικό αυτοκινήτων [1-60]. Μελέτες διεξήχθησαν προκειμένου να επιλεγούν τα κατάλληλα PCM, η απαραίτητη ποσότητα και η τοποθεσία τους μέσα στην καμπίνα επιβατών [1-61]. Τα αποτελέσματα των μελετών έδειξαν ότι με την εισαγωγή μικροκάψουλων PCM που περιέχουν υδρογονάνθρακες στα υφάσματα, ειδικά στα προσκέφαλα και στα καθίσματα, παρατηρείται μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 2-4 °C, καθώς και λιγότερη συγκέντρωση υγρασίας, μειώνοντας έτσι τη χρήση του κλιματιστικού και κατ' επέκταση εξοικονομώντας ενέργεια.

Κλιματίζοντας κτήρια με PCM

Πρόσφατα, μελετήθηκαν PCM για εφαρμογή στην αποθήκευση ηλιακής θερμότητας και το κλιματισμό οικιακών κτηρίων. Με την επικάλυψη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται σε οροφές, με PCM, είναι δυνατή μια μεγάλη αύξηση στην τιμή της θερμομόνωσης. Αφού τα PCM απορροφήσουν την πλεονάζουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας, μπορούν να επαναφορτιστούν με τη ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η Pause [1-58] περιέγραψε ένα ειδικό σύστημα από panel με PCM, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της θερμικής αντίστασης τοίχων ελαφριάς κατασκευής. Το κύριο στοιχείο αυτού του panel είναι μια κατασκευή από κελιά, τα οποία είναι φτιαγμένα από ένα ενισχυμένο κλωστοϋφαντουργικό υλικό, που στη συνέχεια γεμίζεται με PCM. Η ποσότητα PCM που περιέχεται μέσα στο panel ισοδυναμεί με θερμική αποθήκευση 700 kJ. Εξομοίωση σε υπολογιστή έδειξε ότι η εφαρμογή αυτού του panel μπορεί να παρέχει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 20%.

3. ΥΛΙΚΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

3.1 Εισαγωγή στα υλικά μνήμης σχήματος

Τα υλικά μνήμης σχήματος (SMMs) είναι ένα σύνολο υλικών που μπορούν, λόγω κάποιας εξωτερικής διέγερσης, να αλλάξουν το σχήμα τους από κάποιο προσωρινά παραμορφωμένο

σχήμα σε ένα προηγουμένως προγραμματισμένο σχήμα. Η αλλαγή σχήματος ενεργοποιείτε συνήθως από αλλαγή στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αλλά σε μερικά υλικά και στην πίεση, το μαγνητικό πεδίο, το ηλεκτρικό πεδίο, στην τιμή του pH, στην ακτινοβολία UV ενώ ακόμα και το νερό μπορεί να αποτελέσει ερέθισμα. Όταν αντιληφθούν τη συγκεκριμένη αυτή διέγερση, τα SMMs μπορούν να παρουσιάσουν δραματική παραμόρφωση σε μια χωρίς πίεση ανάκαμψη. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας διαφορετικών ερεθισμάτων ενεργοποίησης και της ικανότητας να υπερβούν την κίνηση ή και κάποιες άλλες προκαθορισμένες αντιδράσεις, τα SMMs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ή τον συντονισμό πολλών τεχνικών παραμέτρων σε συστήματα εφίων υλικών ανταποκρινόμενα σε περιβαλλοντικές αλλαγές, όπως το σχήμα, η θέση, η σκληρότητα, η φυσική συχνότητα, η απόσβεση, η τριβή και η διείσδυση υδρατμών. Σήμερα, μια μεγάλη ποικιλία από κράματα, κεραμικά, πολυμερή και γέλες έχει βρεθεί ότι παρουσιάζουν συμπεριφορές μνήμης σχήματος. Έχει ερευνηθεί εκτενώς από μηχανικής πλευράς αλλά και η θεμελιώδη θεωρία των SMMs και μια μεγάλη ποικιλία διαφορετικών SMMs είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα.

Τα εμπορεύσιμα προϊόντα μνήμης σχήματος βασίζονται κυρίως σε μεταλλικά κράματα μνήμης σχήματος (SMAs), είτε εκμεταλλευόμενα την αλλαγή σχήματος λόγω του φαινομένου μνήμης σχήματος είτε της υπέρ ελαστικότητας του υλικού, των δύο κύριων φαινομένων των SMAs. Πολυμερή μνήμης σχήματος (SMPs) και γέλες αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς ενώ επίσης μέσα στα τελευταία χρόνια έχουν γίνει εμπορεύσιμα κάποια προϊόντα που βασίζονται σε μαγνητικά κράματα μνήμης σχήματος. Κεραμικά υλικά μνήμης σχήματος (SMC), τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν όχι μόνο από τη θερμοκρασία αλλά και από ελαστική ενέργεια, ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο, βρίσκονται κυρίως σε ερευνητικό στάδιο.

Παρόλο που αναμφίβολα η μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία βρίσκεται στο τομέα της βιοτεχνολογίας και σε εφαρμογές βιοϊατρικής, τα υλικά μνήμης σχήματος γίνονται όλο και πιο σημαντικά σε πολλούς άλλους τομείς της τεχνολογίας συμπεριλαμβανομένων αεροσκαφών υψηλών επιδόσεων και εξαρτημάτων αυτοκινήτων, διαστημικές εφαρμογές, σεισμικών εφαρμογών, μικρο-ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων (MEMS), τηλεπικοινωνιών, συνθετικά πολυμερή και πολλά άλλα, όπως στον τομέα των υφασμάτων και της ένδυσης.

3.2 Ιστορικό υπόβαθρο στα υλικά μνήμης σχήματος

Ο θεμέλιος λίθος στην ιστορία των υλικών μνήμης σχήματος ήταν η ανακάλυψη της ψευδοελαστικής συμπεριφοράς των κραμάτων Au-Cd το 1932 από τον Σουηδό φυσικό Arne Olander [1-64]. Αργότερα το 1938 ο Greninger και ο Mooradian παρατήρησαν το σχηματισμό και την εξαφάνιση της μαρτενσιτικής φάσης με την αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας κραμάτων Cu-Zn. Το 1949 ο Kurdjumov και ο Khandros κατέγραψαν εκτενώς το φαινόμενο της μνήμης και της θερμοελαστικής συμπεριφοράς της μαρτενσιτικής φάσης και σύντομα τους ακολούθησαν το 1951 ο Chang και ο Read [1-65].

Παρόλα αυτά, η επανάσταση στα υλικά μνήμης σχήματος ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Ο William J. Buehler και οι συνεργάτες του στο US Naval Ordnance Laboratory ανακάλυψαν τυχαία το φαινόμενο της μνήμης σχήματος σε ένα κράμα νικελίου-τιτανίου (NiTi) [1-66]. Αργότερα το κράμα αυτό προωθήθηκε στο εμπόριο με την ονομασία Nitinol (ακρωνύμιο του Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratories). Από τη γέννηση του Nitinol, έχει γίνει παγκοσμίως εξαιρετικά εκτενή έρευνα για να αποσαφηνιστούν τα χαρακτηριστικά της βασικής συμπεριφοράς του φαινομένου μνήμης σχήματος. Σήμερα τα κράματα NiTi είναι τα πιο ευρέως μελετημένα μεταξύ των κραμάτων στα οποία έχει παρατηρηθεί χαρακτηριστικά μνήμης σχήματος.

3.3 Τα υλικά μνήμης σχήματος στα υφάσματα.

Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στο Σχεδιαστικό/Τεχνολογικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη έξυπνων υλικών για κλωστοϋφαντουργικά. Τα κλωστοϋφαντουργικά είναι δυνατών να

εμφανίσουν μοναδικές συμπεριφορές μνήμης σχήματος, με την εισαγωγή κραμάτων και πολυμερών με διαμορφωμένο σχήμα, μέσα στην δομή τους. Τα πρώτα ονομάζονται κράματα μνήμης σχήματος (SMA) και τα δεύτερα πολυμερή μνήμης σχήματος (SMP), και ανήκουν στην οικογένεια των υλικών μνήμης σχήματος (SMM).

Άλλες ιδιότητες των SMMS περιλαμβάνουν την ψευδοελαστικότητα, την υψηλή ικανότητα απόσβεσης και τις ιδιότητες προσαρμογής που οφείλονται στην ικανότητά τους να αντιστρέφουν τη παραμόρφωση κατά την φάση μετάβασης. Τα SMMs μπορούν να αντιληφθούν φυσικές αλλαγές στο περιβάλλον τους, όπως οι θερμικές, μηχανικές, μαγνητικές και ηλεκτρικές. Αυτά τα φυσικά ερεθίσματα τα κάνουν να αντιδρούν μεταβάλλοντας το σχήμα, τη θέση, τη τάση, την ακαμψία, τη φυσική συχνότητα, την απόσβεση, τη τριβή και άλλα στατικά ή δυναμικά χαρακτηριστικά.

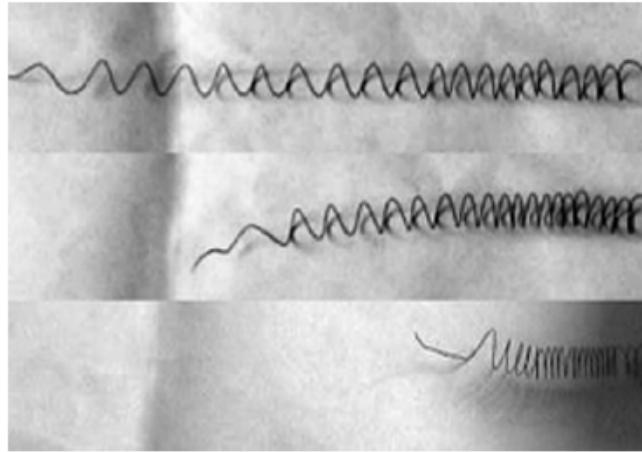
Το κεφάλαιο αυτό θα δείξει πώς επιτυγχάνεται η συμπεριφορά αλλαγής σχήματος των υφασμάτων, προγραμματίζοντας SMA ή με τη κλώση SMP και τελικά με την μετατροπή τους σε ίνες για να εισαχθούν σε μάλλινες, πλεκτές ή άλλες δομές υφασμάτων. Η δυνατότητα χρησιμοποίησής της ικανότητα αλλαγής σχήματος αυτής, σε έξυπνες εφαρμογές, ενέπνευσε την αισθητική νέων σχεδίων για εσωτερικά υφάσματα και πλεκτά ενδύματα και συνέβαλε σε ένα νέο υβριδικό ύφασμα αλλαγής κλίματος για έξυπνα περιβάλλοντα.

3.3.1 Κράματα μνήμης σχήματος

Το πρώτο φαινόμενο μνήμης σχήματος παρατηρήθηκε σε ένα κράμα χρυσού-καδμίου στις αρχές του της δεκαετίας του 1930 και χρειάστηκε να φτάσουμε στη δεκαετία του 1960 μέχρι να ανακαλυφθεί το φθηνότερο και μη τοξικό κράμα νικελίου-τιτανίου. Μέχρι και σήμερα, το κράμα νικελίου-τιτανίου είναι το πιο δημοφιλές SMA και έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών. Άλλα κράματα μνήμης σχήματος είναι αυτά με βάση τον χαλκό και τον σίδηρο.

Στα κράματα ο μηχανισμός μνήμης σχήματος προκαλείται από δύο ξεχωριστές δομικές καταστάσεις: μία ωστενική φάση και μια μαρτενσιτική φάση. Γενικά, η θερμότητα ή η μηχανικά προκαλούμενη πίεση μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή φάσης π.χ. από μαρτενσιτικό σε ωστενικό ή μεταξύ παραλλαγών της μαρτενσιτικής φάσης, κάτι που προκαλεί το φαινόμενο μνήμης σχήματος. Για παράδειγμα με τη θέρμανση, το υλικό μπορεί να αλλάξει από μαρτενσιτικό σε ωστενικό, μέσω αδιάχυτης μεταμόρφωσης, που οδηγεί σε ανάκτηση του σχήματος. Ως εκ τούτου, με την προϋπόθεση ότι έχει δοθεί στο υλικό μία συγκεκριμένη φυσική μορφή στην υψηλής θερμοκρασίας ωστενική φάση, σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία μπορεί να παραμορφωθεί, αλλά θα «θυμάται» την αρχική μορφή όταν αναθερμανθεί. Η Εικόνα 3.1 απεικονίζει την διαδικασία ανάκτησης σχήματος ενός ελατηρίου SMA.

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό των SMAs είναι ότι επιτρέπουν ένα αμφίδρομο αποτέλεσμα μνήμης σχήματος, γνωστό και ως ολόπλευρο αποτέλεσμα μνήμης σχήματος. Αυτό επιτρέπει επαναλαμβανόμενες κυκλικές εφαρμογές καθώς το υλικό μπορεί να θυμάται ένα σχήμα σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα κράματα είναι σε θέση να ανακτήσουν ένα μεγάλο ποσοστό του αρχικού τους σχήματος σε σχέση με τη παραμόρφωσή τους (έως και 100% του αρχικά προγραμματισμένου σχήματός τους). Παρόλα αυτά, εμφανίζουν χαμηλό εύρος πίεσης (έως και 8%) σε σχέση με τα πολυμερή.



3.1 Διαδικασία ανάκτησης σχήματος ελατηρίου SMA.

3.3.2 Πολυμερή μνήμης σχήματος

Το φαινόμενο της μνήμης σχήματος και ο μηχανισμός του στα πολυμερή είναι μοναδικός και διαφορετικός από αυτόν που συμβαίνει σε μέταλλα και κεραμικά. Ο μηχανισμός στηρίζεται σε μια δομή από σταυροειδείς δεσμούς σε μοριακό επίπεδο. Στη περίπτωση των θερμοευαίσθητων πολυμερών μνήμης σχήματος, χαμηλότερα από τη θερμοκρασία μετάβασης του γυαλιού T_g , το πολυμερές είναι ένα στιβαρό από σταυροειδείς δεσμούς δίκτυο αλυσίδων, όμως πάνω από το T_g , το δίκτυο αυτό δίνει τη θέση του σε μια ελαστική κατάσταση. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος μπορεί να δημιουργηθεί προσδίδοντας ένα σχήμα ενώ το πολυμερές είναι στην ελαστική κατάσταση και «παγώνοντας» αυτήν την κατάσταση εντροπίας, σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτή η παγωμένη μορφή μπορεί μετά να απελευθερωθεί μόνο σε μια υψηλότερη θερμοκρασία.

Πρόσφατα, καταγράφηκε η ανάπτυξη πολυμερών μνήμης σχήματος ευαίσθητων σε UV ακτινοβολία. Σε αυτή τη περίπτωση, ο μηχανισμός στηρίζεται στην εισαγωγή φωτοευαίσθητων ομάδων μέσα στο πολυμερές δίκτυο, δίνοντας το επιθυμητό σχήμα. Το πολυμερές εκτίθεται σε UV φως, που αναγκάζει τις φωτοευαίσθητες ομάδες να διασταυρωθούν δημιουργώντας το νέο σχήμα. Μεταγενέστερη έκθεση σε φως διαφορετικού μήκους κύματος διασπά τους σταυροειδείς δεσμούς και επαναφέρει το αρχικό σχήμα.

Ο μηχανισμός επαναφοράς σχήματος των SMP εξαρτάται από τον συνδυασμό ενός μερικώς κρυσταλλικού, σκληρού τμήματος και ενός μαλακού άμορφου τμήματος στην θερμοκρασία μετάβασης T_g . Πάνω από τη T_g , το μόνιμο σχήμα μπορεί να αλλάξει με την εφαρμογή μιας εξωτερικής πίεσης. Αφού ψυχθεί κάτω από τη T_g , το άμορφο τμήμα παγώνει σε μια ναλώδη, μη-κρυσταλλική κατάσταση υψηλής ελαστικότητας και ως εκ τούτου αποκτά το προσωρινό σχήμα. Το υλικό επανέρχεται στο μόνιμο του σχήμα με θέρμανση πάνω από τη T_g .

Τα πολυμερή μνήμης σχήματος έχουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κράματα. Έχουν μικρό βάρος, μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες πιέσεις (έως και 400%), έχουν μια ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών ανάκτησης, έχουν μικρό κόστος κατασκευής και επεξεργάζονται ευκολότερα. Για εφαρμογές σε υφάσματα, όταν γνέθονται είναι πιο εύκαμπτα και μπορούν να αναμειχθούν εύκολα με άλλα συμβατικά νήματα και πλεκτές και υφαντές δομές.

3.3.3 Υλικά αλλαγής χρώματος

Τα θερμοχρωμικά υλικά αλλάζουν χρώμα με την αλλαγή στην θερμοκρασία. Μπορούν να δημιουργηθούν ως ημιαγώγιμες ενώσεις, από υγρούς κρυστάλλους ή μεταλλικές ενώσεις. Η αλλαγή του χρώματος συμβαίνει σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία, η οποία μπορεί να

ποικίλει. Πρόσφατες μελέτες αφορούν την ανάπτυξη θερμοευαίσθητων χρωστικών ουσιών με βάση τα πολυμερή που μπορούν να αλλάξουν αναστρέψιμα και ορατά, χρώμα σε μια καθορισμένη θερμοκρασία μεταξύ 15 και 35 °C. Η θερμοκρασία αλλαγής χρώματος (που ονομάζεται θερμοχρωμική μετάβαση) μπορεί να αλλάξει από την δομή της χρωστικής ουσία, με βαφή πολυμερούς βάσης, που χρησιμοποιείται και μπορεί να εξατομικευτεί με χημική τροποποίηση. Στην πραγματικότητα, τα θερμοχρωμικά πολυμερή φιλμ επικάλυψης είναι ανιχνευτές θερμότητας που ανιχνεύουν αλλαγές στην θερμοκρασία αλλάζοντας οπτικά.

Με διαφορετικής σύστασης θερμοχρωμικές βαφές, μπορούν να παραχθούν πολλά διαφορετικά χρώματα. Οι θερμοχρωμικές βαφές μπορούν να εισαχθούν σε ένα διάλυμα επικάλυψης του φιλμ ή απευθείας σαν μπογιά με ένα ειδικό συνδετικό (όπως το PEG) για υφασμένες επιφάνειες. Υλικά που περιέχουν 0.1-1.0% κατά βάρος, θερμοχρωμική βαφή στο πολυμερές υποδοχής έχουν μια οπτικά αναστρέψιμη, ανακτήσιμη θερμοχρωμική μετάβαση. Ο συνδυασμός SMM και θερμοχρωμικής επικάλυψης είναι ένας ενδιαφέρων τομέας που παράγει ταυτόχρονα αλλαγές χρώματος και σχήματος, σε κλωστοϋφαντουργικά υλικά.

3.4 Τεχνικές απαιτήσεις για υφάσματα και ρούχα αλλαγής σχήματος

3.4.1 Αλλαγή σχήματος με εφαρμογή ερεθίσματος

Τα τεχνητά αλλά και φυσικά υλικά έχουν από τη φύση τους την ιδιότητα να αλλάζουν σχήμα. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι το βαμβάκι, το οποίο διογκώνεται όταν εκτίθεται σε υγρασία και συστέλλεται ξανά όταν στεγνώσει. Αυτή η συμπεριφορά δεν έχει χρησιμοποιηθεί για αισθητικά αποτελέσματα λόγω του ότι οι αλλαγές δεν είναι αισθητές με γυμνό μάτι. Στην περίπτωση των υφασμάτων και των ενδυμάτων αλλαγής σχήματος, μια σημαντική απαίτηση είναι να υπάρχει ένα αισθητό, ορατό φαινόμενο αλλαγής σχήματος. Αυτό συνεπώς οδηγεί σε δύο ουσιώδη κριτήρια: την αποτελεσματικότητα του υλικού και την δυνατότητα, το φαινόμενο να προκαλείται όπως και όταν απαιτείται.

Σε ένα υφαντό, πλεκτό ή μη υφάνσιμο, η αλληλεπίδραση μεταξύ νημάτων και ινών συνεισφέρει στην στερεότητα και στις μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος. Με την ανάμειξη SMMs, αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σαν αντιδραστική δύναμη που μπορούν να περιορίσουν το φαινόμενο των SMMs. Επιπλέον, για παράδειγμα, στην περίπτωση wrap-spun πολυμερών ινών μνήμης σχήματος, η συστροφή των συμβατικών ινών γύρω από έναν πυρήνα νήματος μνήμης σχήματος, εμποδίζει τον πυρήνα απ' το να συντελέσει την λειτουργία αλλαγής σχήματος. Η κατάσταση αυτή επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο όταν το νήμα μετατραπεί σε ύφασμα. Για αυτό το λόγο είναι θεμελιώδες, η δύναμη αλλαγής σχήματος να είναι μεγαλύτερη από την δύναμη που αντιστέκεται μέσα στην δομή του υφάσματος.

Το δεύτερο κριτήριο είναι η δυνατότητα το φαινόμενο να προκαλείται στο σωστό βαθμό, όταν χρειάζεται, ή κάτω από φυσιολογικές συνθήκες χρήσης. Θερμοευαίσθητα κράματα και πολυμερή μνήμης σχήματος μπορούν να προγραμματιστούν, ώστε να αντιδρούν σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η οποία εμπίπτει εντός μιας ευρύτερης κλίμακας. Παρόλα αυτά ο προγραμματισμός προϋποθέτει ότι το μέγιστο φαινόμενο επιτυγχάνεται μέσα στις θερμοκρασίες χρήσης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα ερεθίσματα, όπως το ηλεκτρικό ρεύμα, το μαγνητικό πεδίο και η UV ακτινοβολία. Η αλλαγή σχήματος σε κράματα νικελίου- τιτανίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στην πολικότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Για τα SMPs, γίνεται προσπάθεια να γίνουν τα πολυμερή αγωγά, παρόλα αυτά έχει γίνει αρκετή πρόοδος. Όσο για την αντίδραση κραμάτων μνήμης σχήματος με μαγνητισμό, έχει βρεθεί ότι ποικίλουν πολύ, για αυτό και είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές.

3.4.2 Προβλήματα σχετικά με την επεξεργασία

Η εισαγωγή υλικών μνήμης σχήματος σε υφάσματα δοκιμάζεται εδώ και 15 χρόνια, παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα πολλές από τις δυσκολίες μετατροπής των υλικών σε υφάσματα και ρούχα. Τα κράματα, λόγω της χαμηλής τους τάσης, είναι δύσκολο να πλεχθούν και να υφανθούν. Όσον αφορά τις αισθητικές απαιτήσεις, κάποια καινοτόμες πλεκτές ή υφαντές δομές απαιτούν επιπλέον ελαστικότητα λόγω εύκολης παρασκευής και καταλληλότητας. Τα πολυμερή, που έχουν μεγαλύτερη τάση και είναι καταλληλότερα για κλωστοϋφαντουργική επεξεργασία, είναι ευκολότερο να μετατραπούν σε ίνες, υφάσματα και ρούχα. Το κλωστοϋφαντουργικό υλικό από υλικά μνήμης σχήματος πρέπει να μπορεί να προγραμματιστεί. Εάν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, ίσως να μην είναι δυνατόν να επεξεργαστεί όλο το κλωστοϋφαντουργικό υλικό, έτσι το κράμα πρέπει να προγραμματιστεί προτού εισαχθεί στην κλωστοϋφαντουργική δομή. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην δημιουργία κάποιων φαινομένων. Για πρώτη φορά κατάφεραν να χρησιμοποιήσουν προγραμματισμένα SMA με επιτυχία σε υφάσματα και προγραμματισμένα SMP σε μια σειρά από υφαντές δομές.

3.4.3 Αντοχή των φαινομένων αλλαγής σχήματος

Η αντοχή των φαινομένων κατά την διάρκεια της χρήσης περιλαμβάνει απαιτήσεις για αντοχή στην τριβή που προκαλείται από τη γήρανση και τη φθορά, αλλά και καλή απόδοση σε κυκλική επανάληψη του φαινομένου μνήμης σχήματος κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Είναι γνωστό ότι τα κράματα μνήμης σχήματος μπορούν να υποστούν παραμόρφωση και επαναφορά του σχήματος πολλές φορές, αλλά πολύ λιγότερα είναι γνωστά σχετικά με τα SMPs. Η υστέρηση και η κόπωση των SMMS σε επανειλημμένη φόρτιση, έχει μελετηθεί σε κάποια έκταση όσο αναφορά τα κράματα μετάλλων. Μεταξύ άλλων παραμέτρων, η θερμοκρασία, η μικρο-δομή και η ποιότητα της επιφάνειας του υλικού αναπόφευκτα επηρεάζουν την κόπωση τους. Ο Bhuniya [1-69] ανέφερε ότι η προσθήκη μικρής ποσότητας τιτανίου στα SMAs μειώνει την διάβρωση της μικρο-δομής λόγω γήρανσης. Αυτό έχει ενδιαφέρον για εφαρμογές όπου η αντίδραση μνήμης σχήματος πρέπει να είναι αποτελεσματική τουλάχιστον μέχρι την προκαθορισμένη διάρκεια ζωής του προϊόντος προκειμένου να μπορέσει να δικαιολογηθεί το κόστος.

3.4.4 Αισθητική υποβάθμιση

Πέρα από την απόδοση, αισθητικά, τα υφάσματα αλλαγής σχήματος πρέπει να επιδιώκεται να έχουν όσο το δυνατόν λιγότερη υποβάθμιση, οπτικά αλλά και στην αφή, κατά την πάροδο του χρόνου. Αυτό αφορά ιδιαίτερα τα προϊόντα που θα βρεθούν κάτω από σκληρές περιβαλλοντολογικές συνθήκες π.χ. κλωστοϋφαντουργικά είδη εσωτερικών χώρων, όπως περσίδες παραθύρων που είναι εκτεθειμένες σε ισχυρό ηλιακό φως και περιβαλλοντική ρύπανση. Τα κράματα νικελίου-τιτανίου είναι σε γενικές γραμμές ανθεκτικά στο περιβάλλον και δεν θα υποστούν διάβρωση. Όσον αφορά τα πολυμερή μνήμης σχήματος, λίγα είναι γνωστά για τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα στην όψη και την υφή τους. Πολλά πολυμερή γίνονται συχνά εύθραυστα, άκαμπτα και αλλάζουν χρώμα με τη γήρανση, ειδικά όταν εκτίθενται σε σκληρές περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει την όψη, την αφή και την άνεση, που είναι κάποια από τα κλωστοϋφαντουργικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τα είδη ένδυσης.

3.5.5 Απαιτήσεις για τη μόδα και τα είδη ένδυσης

Οι απαιτήσεις για τη μόδα και τα είδη ένδυσης είναι ελαφρώς υψηλότερες από ότι στα υφάσματα που δεν προορίζονται για να φορεθούν, ειδικά εάν το υλικό προορίζεται να φορεθεί πάνω στο δέρμα και πρέπει να πλένεται. Η σχετικά σκληρή υφή των κραμάτων και ο

μεγάλος όγκος των νημάτων από πολυμερή μνήμης σχήματος δεν είναι απαγορευτικό για τη χρήση τέτοιων υλικών σε υφάσματα, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν αραιά, αλλά με σημαντικές οπτικές και λειτουργικές επιπτώσεις. Επίσης έδειξαν πώς η ανάμειξη με συμβατικά ή εξειδικευμένα νήματα, μπορεί να βελτιώσει την αφή και τις ιδιότητες αποκατάστασης σχήματος. Τα κράματα θέτουν μια ιδιαίτερη πρόκληση στους σχεδιαστές καθώς είναι αυτά που παράγουν τα σημαντικότερα φαινόμενα μνήμης σχήματος, όμως την ίδια ώρα επηρεάζουν δυσμενώς την αφή και την άνεση.

3.6 Παραγωγή υφασμάτων και ρουχισμού με υλικά μνήμης σχήματος

3.6.1 Εξώθηση των SMP

Σε ένα πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα, χρησιμοποιήθηκε ένα SMP με βάση την πολυουρεθάνη. Τα πολυμερή σφαιρίδια πριν την επεξεργασία ξηράθηκαν και εξώθηκαν με την χρήση ενός ESL Labspin 892 σε μονόκλιωνα και πολύκλιωνα νήματα. Η Tg του πολυμερούς ήταν 25 °C. Τα πρώτα σφαιρίδια ρητίνης ξηράθηκαν επί οκτώ ώρες σε ένα φούρνο κυκλοφορίας χοάνης στους 80 °C έως ότου η υγρασία γίνει λιγότερη από 0,03%. Χωρίς ξήρανση της ρητίνης, το ιξώδες του καθίσταται πολύ χαμηλό όταν λιώσει, προκαλώντας παραμόρφωση αφρίζοντας, αναβοσβήνοντας και πέφτοντας στο ακροφύσιο. Οι θερμοκρασίες του μηχανήματος που είναι κατάλληλες για επεξεργασία νήματος SMP διαμέτρου από 0.4 mm μέχρι 0.6 mm είναι οι ακόλουθες:

πίσω (ζώνη τροφοδοσίας): 170-180 °C

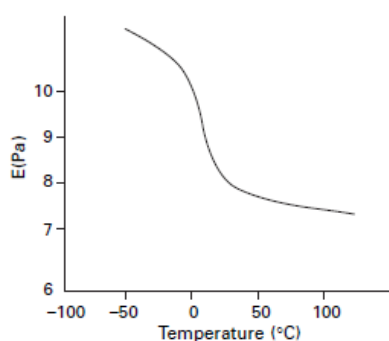
κέντρο (συμπίεση): 175-185 °C

μπροστά (ζώνες μέτρησης): 170-180 °C.

Το κλειδί αυτής της διαδικασίας είναι να ελεγχθεί το ιξώδες του SMP στο ακροφύσιο στο μηχανήμα εξώθησης, ενώ εξασφαλίζεται ομοιόμορφη τήξη του πολυμερούς. Το ιξώδες του SMP βασίζεται περισσότερο στην θερμοκρασία από ότι στα παραδοσιακά πολυμερή, απαιτώντας αυστηρό έλεγχο της θερμοκρασίας και της επεξεργασίας κατά την εξώθηση. Για να ελεγχθεί η διάμετρος του νήματος SMP, ο ρυθμός εξώθησης του νήματος πρέπει επίσης να ρυθμιστεί.

3.2 Χαρακτηριστικά των ινών, διάγραμμα εξάρτησης συντελεστής ελαστικότητας E από τη θερμοκρασία

Χαρακτηριστικά Ινών	
Διάμετρος Ινών	0.10-0,34 mm
Εφελκυστική τάση	0.1-0.8 kN/mm ²
Επιμήκυνση κατά την θραύση	260-980%



Πρέπει να σημειωθεί ότι η δύναμη επαναφοράς του προ-σχηματοποιημένου παγωμένου SMP θεωρείται ασθενής αφού η μαλακή κατάσταση του SMP προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Αρκετές φυσικές ιδιότητες των SMPs, όπως και των SME, αλλάζουν αισθητά λόγω μεταπτώσεως στη θερμοκρασία, ιδιαίτερα στην θερμοκρασία μεταπτώσεως γυαλιού του μαλακού τμήματος. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν τον συντελεστής ελαστικότητας, σκληρότητας και ευελιξίας. Για παράδειγμα, ο εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία συντελεστής ελαστικότητας E' του SMP παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2, στην οποία ο συντελεστής ελαστικότητας ενός SMP αλλάζει δραματικά όταν θερμαίνεται πάνω από την θερμοκρασία μεταπτώσεως γυαλιού του μαλακού τμήματος.

3.6.2 Σχηματισμός νήματος και υφασμάτων

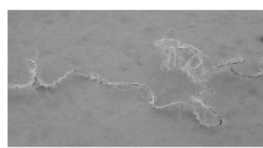
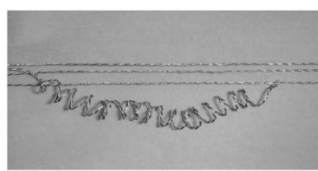
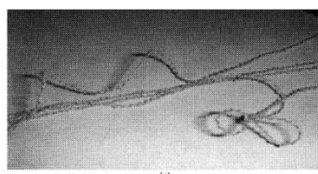
Με την χρήση ενός Gemmel and Dunsmore Fancy Wrap Spinner, οι εξωθούμενες ίνες SMP χρησιμοποιήθηκαν ως:

- νήματα πυρήνα
- υλικό μείξης με άλλα νήματα (πολυεστέρα, βισκόζη και Lurex)
- νήματα σε μη αναμεμειγμένα νήματα

Τα νήματα πλέχτηκαν και υφάνθηκαν σε τρισδιάστατα μεταβαλλόμενες δομές. Η πλέξη και η ύφανση του υλικού δεν παρουσίασαν δυσκολίες, όπως στην περίπτωση πλέξης SMA. Ένα εύρος από ίνες και πολύπλοκές δομές υφασμάτων από SMP φτιαχτήκαν, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.

3.6.3 Προγραμματισμός σχήματος

Σε αντίθεση με τα SMA, τα οποία πρέπει να προγραμματιστούν πριν την εισαγωγή τους στη κλωστοϋφαντουργική δομή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας επεξεργασίας, τα SMPs επεξεργάζονται μετά την εισαγωγή τους στα νήματα και τα υφάσματα. Για αυτό το λόγο είναι δυνατόν να προγραμματιστεί το σχήμα όλου του υφάσματος για το φαινόμενο μνήμης σχήματος. Η επεξεργασία στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε στην θερμοκρασία των 50 °C. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος στο ύφασμα ήταν ξεκάθαρα ορατό κατά την εφαρμογή μιας εξωτερικής πηγής θερμότητας όπως οικιακές ηλεκτρικές συσκευές στεγνώματος μέσω θερμού αέρα.



3.3 Ίνες και πολύπλοκές δομές υφασμάτων από SMP

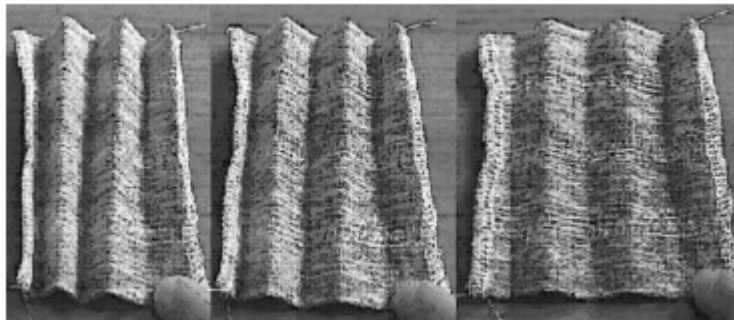
3.6.4 Επίδραση του SMP σε υφάσματα

Το κύριο ορατό φαινόμενο των υφασμάτων προκύπτει από το γεγονός ότι περιοχές που περιέχουν SMP είναι ιδιαίτερα παραμορφώσιμες, αλλά κατά την θέρμανση, παίρνουν ξανά την αρχική τους μορφή. Τα ορατά φαινόμενα στη υφή και την δομή που διερευνήθηκαν από αυτή την παραμόρφωση ήταν:

- άνοιγμα και κλείσιμο των κενών μέσα στην δομή του υφάσματος
- επιφανειακές κινήσεις
- δομές με σχήμα κηρήθρας
- αυξημένα αποτελέσματα διπλού υφάσματος.

Βρέθηκε ότι το φαινόμενο σε SMP νήματα ήταν λιγότερο έντονο, πιθανώς ως αποτέλεσμα των συμβατικών ινών περιορίζοντας την κίνηση ανάκτησης του πολυμερούς.

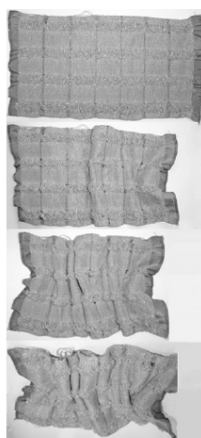
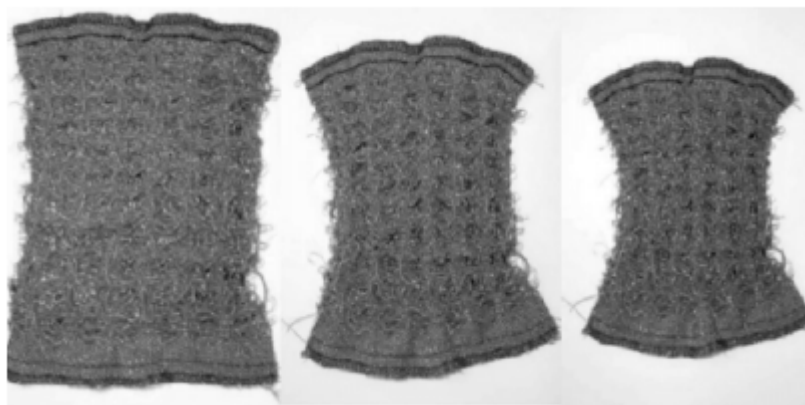
Η Εικόνα 3.4 παρουσιάζει την απόδοση της μνήμης σχήματος των κλωστοϋφαντουργικών δειγμάτων SMP με ομοιόμορφα και πυκνά υφασμένες ίνες SMP διαμέτρου 0,4mm, στην δομή του υφάσματος. Για να παρατηρήσουμε το SME στα υφάσματα, το SMP καλύπτεται με δύο φύλλα αλουμινίου και παραμορφώνεται στο σχήμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4 κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Το δείγμα στη συνέχεια τοποθετείται στο ψυγείο κάτω από μηχανική πίεση. Το νήμα SMP ανακτά το αρχικό του σχήμα σε υψηλή θερμοκρασία ενώ ήταν παραμορφωμένο σε χαμηλή θερμοκρασία κατά τη θέρμανση σε $T > T_g$, κάτι το οποίο επιτρέπει στο δείγμα υφάσματος να αλλάζει με την περιβαλλοντική θερμοκρασία. Αυτό γίνεται επειδή η ίδια κατάσταση του SMP νήματος σε υψηλή θερμοκρασία, προέρχεται από τη κατάσταση εξώθησης όταν δηλαδή βγαίνει από το μηχάνημα εξώθησης χωρίς καμία επιπλέον κατάρτιση μνήμης σχήματος.



3.4 Κλωστοϋφαντουργικό υλικό SMP καλυπτόμενο με δύο φύλλα αλουμινίου

Χαμηλότερα της θερμοκρασίας μετασχηματισμού T_g , το σχήμα κάμψης του κλωστοϋφαντουργικού υλικού μπαίνει σε αδράνεια για να παρέχει μια επιπλέον δύναμη για την κατάσταση παραμόρφωσης. Αφού το δείγμα θερμανθεί στην θερμοκρασία μετασχηματισμού T_g , το σε αδράνεια SMP γίνεται μαλακό και επανέρχεται στο αρχικό επίπεδο σχήμα. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο μνήμης σχήματος στο SMP νήμα είναι μονόδρομη και είναι δύσκολο να εκτελεστεί ανάστροφα η διαδικασία τροποποίησης του σχήματος. Το πρόβλημα λύνεται με την προσθήκη κάποιων υπέρ-ελαστικών ινών ενίσχυσης.

Παραδοσιακές ίνες διαφόρων υλικών μπορούν να αναμειχθούν και να υφανθούν με ίνες SMP όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5. Το νήμα SMP υφάνθηκε ευρύχωρα και χαλαρά κατά μήκος του υφαντού ώστε να αφήνει περιθώρια για το SME να λάβει χώρα.



3.5 Υφάσματα με ενσωματωμένα υλικά μνήμης σχήματος

Σε αντίθεση με το δείγμα που εμφανίζεται στην Εικόνα 3.3, η σύνθετη δομή σταθεροποιεί το ύφασμα στη πεπλατυσμένη κατάσταση. Το SME μεταβαίνει ομοίως από την αρχική επίπεδη κατάσταση του σε χαμηλή θερμοκρασία σε μια ανάγλυφη κατάσταση με κυρτά άκρα, σε υψηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση αυτή, η πλήρης συρρίκνωση συμβαίνει λόγω του ότι ο βαθμός ελαστικότητας του SMP μειώνεται δραματικά όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος υπερβαίνει τη θερμοκρασία T_g .

Η διαδικασία ανάκαμψης μπορεί να περιγραφεί ως μια μεταμόρφωση στην οποία παρουσιάζεται μια σταδιακή μεταβολή σχήματος κατά τον μετασχηματισμό. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός υφασμάτων που βασίζονται σε ίνες SMP αναμειγμένες με διάφορα είδη ευλύγιστων και ελαφρών ινών μπορούν να παρουσιάσουν ενδιαφέροντα και αισθητικά χαρακτηριστικά, όπως στην Εικόνα 3.5. Η αλλαγή του σχήματος του υφάσματος εξαρτάται από το σχεδιασμό του υφάσματος και την επεξεργασία του SMP σε μια δεδομένη

θερμοκρασία. Είναι φανερό, ότι ο σχεδιασμός και η επεξεργασία της μνήμης σχήματος μπορεί να δημιουργήσει διαφορετικές εμφανίσεις με διαφορετικές ίνες υφάσματος, παρουσιάζοντας σημαντική αλλαγή σχήματος σε αντίδραση με τις περιβαλλοντικές μεταβολές.

3.7 Γενικά πεδία εφαρμογής.

Η πρόσφατη έλευση των προηγμένων έξυπνων υλικών έχει ανοίξει τον δρόμο για πολλές χρήσιμες εφαρμογές στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας. Αν και σχετικά λίγες δομές είναι σήμερα φτιαγμένες με τέτοια υλικά, η δυναμική αγορά για εφαρμογές από αυτά τα υλικά μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Οι μοναδικές ιδιότητες των πολυμερών μνήμης σχήματος που προκύπτουν από θερμικά επαγόμενη φάση μεταμόρφωσης έχει εκμεταλλευτεί εμπορικά για να παράγει μια ποικιλία προϊόντων. Λόγω των ιδιοτήτων των πολυμερών μνήμης σχήματος μπορούν να βρουν αρκετά τεχνικά πεδία κατάλληλά για εφαρμογή. Πολυμερή μνήμη σχήματος μπορούν να γίνουν επιχρίσματα, αφρός και ακόμα και να μετατραπούν απευθείας σε ίνες. Αυτές μπορούν να είναι κάποιες από τις τελικές χρήσεις αυτών των έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών, και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

3.7.1 Ιατρικά κλωστοϋφαντουργικά

Η έξυπνη ίνα φτιαγμένη από πολυμερή μνήμης σχήματος που σχεδιάστηκε από την MnemoScience⁶, δένεται μόνη της σε έναν τέλειο κόμπο. Τα χαρακτηριστικά του πολυμερούς υλικού της MnemoScience περιλαμβάνει συμβατότητα με τα υγρά του σώματος, ιδιότητες διατήρησης σχήματος, διατήρηση δύο σχημάτων στη μνήμη, υψηλή στερεότητα σχήμα, υψηλή ανάκτηση σχήματος και την ικανότητά να σχηματίζει προσωρινά και μόνιμα σχήματα. Το ράμμα συστέλλεται στο μόνιμο του σχήμα όταν θερμανθεί και δένεται μόνο του σε κόμπο όταν θερμανθεί λίγους βαθμούς πάνω από την θερμοκρασία του σώματος. Έτσι το ράμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σφραγίσει δύσκολα τραύματα όταν η προσβασιμότητα είναι περιορισμένη. Άλλες εφαρμογές των ευφών ινών περιλαμβάνουν νάρθηκες και βίδες για την συγκόλληση οστών.

Χειρουργικά προστατευτικά ενδύματα

Επιχρισμένα πολυμερή υλικά μνήμης σχήματος μπορούν να βελτιώσουν την θερμοφυσιολογική άνεση των χειρουργικών προστατευτικών ενδυμάτων, σε κλινοσκεπάσματα και προϊόντα ακράτειας λόγω των προσαρμοστικών στην θερμοκρασία χαρακτηριστικών διαχείρισης της υγρασίας.

Άλλες εφαρμογές

Η εταιρεία Kimberly-Clark κατοχύρωσε στην Πατέντα 6 627 673 τα υλικά μνήμης σχήματος που ενεργοποιούνται με την υγρασία. Τα υλικά θα μπορούσαν να βρουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε προϊόντα υγιεινής, όπως πάνες, γυναικεία εσώρουχα και προϊόντα για την ακράτεια. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, σε προϊόντα που περιέχουν κάποιο ελαστικό τμήμα. Το τέντωμα του υλικού που αντιδρά στην υγρασία δημιουργεί τη λανθάνουσα παραμόρφωση.

3.7.2 Υπαίθρια ένδυση

Μεμβράνες πολυμερών μνήμης σχήματος μπορούν να εισαχθούν σε υφάσματα πολλών στρωμάτων, όπως αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία προστατευτικών

⁶ <http://medicaldevicelicensing.com/public/companies/view/14354/mnemoscience>

ενδυμάτων ή δραστηριοτήτων αναψυχής. Το πολυμερές μνήμης σχήματος επανέρχεται μέσα σε μία ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο στην δημιουργία ενδυμάτων με προσαρμόσιμα χαρακτηριστικά [1-67]. Η χρήση ενός σύνθετου φιλμ από πολυμερές μνήμης σχήματος ως εσωτερική επένδυση σε πολυστρωματικά ρούχα υπαίθριας ένδυσης θα μπορούσε να τα κάνει να χρησιμοποιούνται ως προστατευτική ενδυμασία παρέχοντας προσαρμόσιμη θερμομόνωση.

Το United States Army Soldier Systems Center⁷ ανέπτυξε μια στολή με μεμβράνη από πολυμερές μνήμης σχήματος και μονωτικό υλικό που διατηρεί τον φορέα ζεστό σε θαλάσσια περιβάλλοντα αλλά και δεν εμποδίζει την εφίδρωση στην στεριά. Μοριακοί πόροι ανοίγουν και κλείνουν αντιδρώντας στην θερμοκρασία του αέρα και του νερού για να μειώσουν ή να αυξήσουν την απώλεια θερμότητας. Επίσης μπορούν να φτιαχτούν ενδύματα με υλικά μνήμης σχήματος. Η διαμόρφωση του σχήματος σε υψηλή θερμοκρασία παρέχει ζάρες και πτυχώσεις σε ενδύματα [1-68], όπως αθλητικά παντελόνια και φούστες.

3.7.3 Καθημερινή ένδυση

Η διαπερατότητα των υφασμάτων με επικάλυψη ή με απανωτές στρώσεις SMPs, αλλάζει καθώς αλλάζει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ή του φορέα για να σχηματίσει έναν ιδανικό συνδυασμό θερμικής μόνωσης και διαπερατότητας της υγρασίας. Όταν η θερμοκρασία του σώματος είναι χαμηλή, το ύφασμα παραμένει λιγότερο διαπερατό και διατηρεί το σώμα ζεστό. Όταν το σώμα ιδρώσει, επιτρέπει στην υγρασία να διαφύγει στο περιβάλλον αφού η διαπερατότητα στην υγρασία γίνεται πολύ υψηλή με την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος. Αυτό απελευθερώνει θερμότητα από το ένδυμα. Η χρήση μιας σύνθετη μεμβράνη από πολυμερή μνήμης σχήματος ως μεσοφοδράρισμα παρέχει ένα σύστημα ένδυσης με δυνατότητα προστασίας σε μια σειρά από καιρικές συνθήκες.

3.7.4 Αθλητική ένδυση

Η αθλητική ένδυση θα πρέπει να παρέχει προστασία από τον άνεμο και τις καιρικές συνθήκες, να διαχέει τον ιδρώτα και να έχει ικανότητα να τεντώνεται καθώς και ιδιότητες ανάκτησης. Οι ίνες μνήμης σχήματος πολυουρεθάνης αντιδρούν σε εξωτερικά ερεθίσματα με έναν προκαθορισμένο τρόπο και έχουν εφαρμογές στην αθλητική ένδυση.

4. Επίλογος

Συνοψίζοντας τα παραπάνω θα καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα υλικά αλλαγής φάσης και μνήμης σχήματος ουσιαστικά αρχίζουν τώρα να αναπτύσσονται, έχοντας βρει μικρό ουσιαστικά αριθμό εφαρμογών σύμφωνα με τις δυνατότητες τους υπάρχει μεγάλο περιθώριο μελέτης και βελτίωσης των ιδιοτήτων τους.

Το πιο σημαντικό από όλα και ο κύριος λόγος ανάπτυξης των έξυπνων υλικών στην κλωστοϋφαντουργία αποτελεί το γεγονός ότι προδιαγράφεται ιδιαίτερα συναρπαστικό το, όχι και τόσο μακρινό μέλλον, για την ένδυση και την κλωστοϋφαντουργία, μακριά από τις δυσοίωνες προβλέψεις για μείωση της ανταγωνιστικότητας των ανεπτυγμένων χωρών και την οριστική επικράτηση των φθηνών αγορών. Το σημαντικότερο στοιχείο σε όλα αυτά βρίσκεται ίσως στο γεγονός ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογική έρευνα και οι δυνατότητες εφαρμογής τους δημιουργούν νέες αγορές για τη βιομηχανία ένδυσης και αποτελούν το βασικό ανταγωνιστικό της πλεονέκτημα. Εξάλλου, η τεχνολογία αιχμής που απαιτείται δεν είναι, προς το παρόν τουλάχιστον, διαθέσιμη σε χώρες χαμηλού κόστους, γεγονός που μπορεί να αναδειχθεί σε ανεκτίμητο όπλο στη μάχη της διατήρησης της παραγωγικής υποδομής των ανεπτυγμένων χωρών.

⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Army_Soldier_Systems_Center

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Mattila H.R . Intelligent textiles and clothing . The Textile Institute , Woodhead publishing limited (Cambridge, England)

[2] Κουτεντάκης, Γιάκας, Έξυπνες ίνες και ρούχα ΕΤΑΚΕΙ.

[3] Καζάνη Βασιλική, Παθητική ηλιακή θέρμανση κτιρίων με χρήση στρώματος υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στους εσωτερικούς τοίχους, διπλωματική εργασία Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο σχολή μηχανολόγων μηχανικών, ημερομηνία έκδοσης 18/10/2011,

Αναφορές

- [1-1] Weder, M. and Hering, A., How effective are PCM materials Experience from laboratory measurements and controlled human subject test. International Man-made Fibres Congress, 13.–15.09, Dornbirn, Austria, 13p.
- [1-2] Meinander, H., *Introduction of a new test method for measuring heat and moisture transmission through clothing materials and its application on winter work wear*. Technical research Center of Finland, Publications 24, Espoo, 1985, 63 p.
- [1-3] Branson, D. H. and Saltin, B. S., Conceptualization and Measurement of Clothing Comfort: Toward a Metatheory, ITAA Spec. Pub. Int. Textile Apparel Assoc. 4, 1991, pp
- [1-4] Choi, Kyeyoun, Thermal Storage/Release and Mechanical Properties of Phase Change Materials on Polyester Fabrics. *Textile Research Journal*, Apr. 2004, 6 p. Energy savers. A consumer guide to energy efficiency and renewable energy. Phase change materials for solar heat storage. Available from: <http://www.eere.energy.gov/consumerinfo/factsheets/b103.html> Printed out 18.6.2005.
- [1-5] Cox, R., Synopsis of the new thermal regulating fiber Outlast. *Chemical Fibers International*, Vol. 48, December 1998, pp.
- [1-6] Pause, B., New possibilities in medicine: Textiles treated with PCM microcapsules. Lecture No. 627, 10th International Symposium for Technical Textiles, Nonwovens and Textile Reinforced Materials, 7 p.
- [1-7] Light and soft: the new Outlast® Adaptive Comfort® liner is suited very well for summer jackets regulating the temperature actively (Outlast Europe).
- [1-8] Rupp, J., Interactive textiles regulate body temperature. *International Textile Bulletin* 1/99, pp.
- [1-9] Nicht zu warm und nicht zu kalt. *Bekleidung und Wäsche* 1/99, pp. 24–26.
- [1-10] <http://comfortcooling.se/ENG/news.html> Printed out 29.6.2005.
- [1-11] Pause, B., Tailored to the purpose: Computer-optimized development of thermoregulated active wear. Lecture No. 333. International Avantex-symposium, Frankfurt, Germany, November 27–29.11.2000. 8 p.
- [1-12] Cox, R., Outlast – Thermal Regulation where it is needed. 39th International Man- Made Fibres Congress, 13–15 Sept. 2000, Dornbirn, Austria. 7 p.
- [1-13] ASTM D 7024-04. *Standard Test Method for Steady State and Dynamic Thermal Performance of Textile Materials*.
- [1-14] Outlast technology: New intelligent materials are helping those on duty. Press release. Heidenheim, 28 April, 2005.
- [1-15] Outlast/Uco present new developments. Press release. Heidenheim, 8 July, 2005.
- [1-16] <http://www.tst-sweden.se/Broschyr-brand-eng.pdf> Printed out 29.6.2005.
- [1-17] Spring/Summer 2006: Outlast focuses on lightness. Press release. Heidenheim, 2
- [1-18] Vigo T.L., “Intelligent fibrous materials”, *J. Text. Inst.*, 1999, **90**, (3)
- [1-19] Bryant Y.G., Colvin D.P., “Fibre with reversible enhanced thermal storage properties and fabrics made therefrom”, US Patent 4756 958, 1988.
- [1-20] Colvin D.P., Bryant Y.G., “Thermally enhanced foam insulation”, US Patent 5 637 389, 1996.
- [1-21] Bryant Y.G., Colvin D.P., “Fabric with reversible enhanced thermal properties”, US Patent 5 366 807, 1994.
- [1-22] Buckley T., “Phase change thermal control materials, method and apparatus”, US Patent 6 319 599, 2001.
- [1-23] Clark T., McKervey M.A., “Saturated hydrocarbons” in *Comprehensive organic chemistry* vol. 1, 38-111, ed. by Stoddart J.F., Pergamon Press Ltd., Oxford 1979.
- [1-24] Herbig J.A., “Microencapsulation” in *Encyclopaedia of Polymer Science and Technology*, vol. 8, 719-736, New York 1968.
- Intelligent textiles with PCMs 61
- [1-25] Cox R., “Synopsis of the new thermal regulating fibre Outlast”, *Chemical Fibers Int.*, 1998
- [1-26] Pushaw R.J., “Coated skived foam and fabric article containing energy absorbing phase change material”, US Patent 5 677 048, 1997.
- [1-27] Zuckerman J.L., Pushaw R.J., Perry B.T., Wyner Daniel M., “Fabric coating containing energy absorbing phase change material and method of manufacturing same”, US Patent 6 514 362, 2003.
- [1-28] Colvin V.S., Colvin D.P., “Microclimate temperature regulating pad and products made therefrom”, US Patent 6 298 907, 2001.
- [1-29] Colvin D.P., Bryant Y.G., “Microclimate cooling garment”, US Patent 5 415 222, 1995.
- [1-30] Mulligan J.C., Colvin D.P., Bryant Y.G. “Microencapsulated phase-change material suspensions for heat transfer in spacecraft thermal systems”, *J. of Spacecraft and Rocket*, 1996, **332**, (2).
- [1-31] Brown R.C., Raspberry J.D., Overmann S.P., “Microencapsulated phase-change materials as heat media in gas fluidised beds”, *Powder Technology*, 1998, **98**, 15. Yamagishi Y., Takeuchi H., Pyatenko A.T., Kayukawa N., “Characteristics of microencapsulated PCM slurry as a heat-transfer fluid”, *AIChE Journal*, 1999, **45** (4), 696–707.
- [1-32] Cho J., Kwon A., Cho Ch., “Microencapsulation of octadecane as phase change material by interfacial polymerisation in an emulsion system”, *Colloid Polym. Sci.*, 2002, **280**.
- [1-33] Zhang X.X., Tao X.M., Yick K.L., Wang X., “Structure and thermal stability of microencapsulated phase change materials”, *Colloid Polym. Sci.* 2004, **282**.
- [1-34] Kim J.H., Cho G.S., “Thermal storage/release, durability, and temperature sensing properties of thermostatic fabrics treated with octadecane-containing microcapsules”, *Textile Res. J.* **72**(12), 1093–1098, 2002.
- [1-35] Choi K., Cho G., Kim P., Cho CH., “Thermal storage and mechanical properties of phase change materials on polyester fabrics”, *Textile Res. J.* 2004, **74**(7), 292–296.
- [1-36] Chung H., Cho G., “Thermal properties and physiological responses of vapour permeable water repellent fabrics treated with microcapsule containing PCMs”, *Textile Res. J.* 2004, **74** (7),

- [1-37] Hartmann M.H., "Stable phase change materials for use in temperature regulating synthetic fibres, fabrics and textiles", US Patent 6 689 466, 2004.
- [1-38] Vigo T.L., Frost C.M., "Temperature-sensitive hollow fibres containing phase change salts", *Textile Res. J.*, 1982, **52** (10),
- [1-39] Vigo T.L., Frost C.M., "Temperature-adaptable textile fibres and method of preparing same", US Patent 4 871 615, 1989.
- [1-40] Vigo T.L., Frost C.M., "Temperature-adaptable fabrics", *Textile Res. J.*, 1985, **55** (12), 737–743.
- [1-41] Vigo T.L., Bruno J.S., "Temperature-adaptable textiles containing durably bound polyethylene glycols", *Textile Res. J.*, 1987, **57** (7),
- [1-42] Harlan S.L., "A new concept in temperature-adaptable fabrics containing polyethylene glycols for skiing and skiing-like activities", Chapter 15 in *High-Tech Fibrous Materials* eds Vigo T.L., Turbak A., ACS, Washington DC, 1991.
- [1-43] Pause B., "Thermal insulation effect of textiles with phase change materials", *Technical Tex. Int.*, 1999, (9),
- [1-44] Pause B., "Computer-optimized design of thermo-regulated active wear", *Technical Tex. Int.*, 2001, (11),
- [1-45] Havenith G., "An individual model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response", *Journal of Applied Physiology*, 2001, **90**: 1943–1954.
- [1-46] 30. Holmes D.A., "Performance characteristics of waterproof breathable fabrics", *J. of Ind. Tex.*, 2000, **29** (4),
- [1-47] DeMartino R.N., "Improved comfort polyester. Part III. Wearer trials", *Text. Res. J.*, 1984, **44** (5),
- [1-48] Slater K., "Comfort properties of textiles", *Textile Prog.*, 1977, **9**, (4).
- [1-49] Shim H., McCullough E.A., Jones B.W., "Using Phase Change Materials in Clothing", *Textile Res. J.*, 2001, **71** (6),
- [1-50] Ghali K., Ghaddar N., Harathani J., Jones B., "Experimental and numerical investigation of the effect of phase change materials on clothing during periodic ventilation", *Textile Res. J.*, 2004, **74** (3),
- [1-51] Li Y., Zhu Q., "A model of heat and moisture transfer in porous textiles with Phase Change Materials", *Textile Res. J.*, 2004, **74** (5), 447–457.
- [1-52] Cox R., "Repositioning acrylic fibres for the new millennium", *Chemical Fib. Int.*, 2001, **51** (2),
- [1-53] Leskovsek M., Jedrinovic G., Stankovic-Elesin U., "Spinning polypropylene fibres with microcapsules", Proceedings of 2nd ITC & DC, ed. Faculty of Textile Technology, University of Zagreb, 2004,
- [1-54] Lottenbach R., Sutter S., "Method for producing temperature-regulating surfaces with phase change material", Patent WO 02095314, 2002.
- [1-55] Pause B., "Nonwoven Protective Garments with Thermo-regulating Properties", *J. of Industrial Tex.*, 2003, **33** (2),
- [1-56] Weder M., Hering A., "How effective are PCM materials? Experience from laboratory measurements and controlled human subject tests", 39th International Man-Made Fibres Congress, 13–15.09.2000, Dornbirn/Austria.
- [1-57] Nuckols, M.L., "Analytical modeling of a diver dry suit enhanced with microencapsulated phase change material", *Ocean Engineering*, 1999, **26**, 547–564.
- [1-58] Pause B., "Possibilities for air-conditioning buildings with Phase Change Material", *Technical Tex. Int.*, 2001, **44** (1),
- [1-59] Rock M., Sharma V., "Heating/warming textile articles with phase change components", US Patent 6 723 967, 2004.
- [1-60] Pause B., "Thermal control of automotive interiors with phase change material", Patent WO 02083440, 2002.
- [1-61] Pause B., "Driving more comfortably with phase change materials", *Technical Tex. Int.*, 2002, **45** (3),
- [1-62] Hittle D.C., Andre T.L., "A new test instrument and procedure for evaluation of fabrics containing phase change materials", *ASHRAE Trans.* 2002, **107**, (1), 175–182.
- [1-63] ASTM D 7024-04 "Standard Test Method for Steady State and Dynamic Thermal Performance of Textile Materials".
- [1-64] K. Otsuka, C. M. Wayman, (1998), *Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity, Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, (1998) pp. 27–48.
- [1-65] J. Ryhänen, (1999), *Biocompatibility Evaluation of Nickel-titanium Shape Memory Metal Alloy* (Ph.D. thesis), University of Oulu, Oulu University Library, 1999.
- [1-66] W. J. Buehler, F. E. Wang (1967), A Summary of Recent Research on the NITINOL Alloys and their Potential Application in Ocean Engineering, *Ocean Engineering*, 1, (1967) pp. 105–120, Pergamon Press.
- [1-67] Potential uses of shape memory film in clothing', *Technical-Textiles-International* (through Textile Technology Index), 1999; 8(8), 17–19.
- [1-68] Russell D A, Hayashi S, and Yamada T, 'The potential use of memory film in clothing', *Techtextil Symposium – New Protective Textiles* (through Textile Technology Index database), April, 1999, 12–15.
- [1-69] Bhuniya, A. K., Chattopadhyay, P. P., Datta, S. and Banerjee, M. K., 'On the Degradation of Shape Memory Effect in Trace Ti-added Cu–Zn–Al Alloy', *Materials Science and Engineering*