



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

**Μελέτη ιδιοτήτων υλικού “Thermonassa I” σε  
επίπεδο μικροδομής και εκτίμηση συντελεστή  
θερμικής αγωγιμότητας**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΗΛΙΑΣ Σ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ**

**Επιβλέπων :** Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

## Μελέτη ιδιοτήτων υλικού “Thermonassa I” σε επίπεδο μικροδομής και εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΗΛΙΑΣ Σ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ**

**Επιβλέπων :** Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2015.

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....  
**ΗΛΙΑΣ Σ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ**

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού», του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Συγκεκριμένα ευχαριστώ ιδιαίτερω τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της εργασίας αυτής, καθώς και για τη στήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε, με υποδείξεις και παρατηρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου για την ολοκλήρωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Δρ. Δημήτριο Κοσσυβάκη για τη συνεργασία και την ουσιαστική βοήθειά του κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας καθώς επίσης και για τις χρήσιμες συμβουλές και διορθώσεις του τελικού κειμένου.

Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω και στην κ. Αικατερίνη Θωμά για την προθυμία της και την πολύτιμη συμβολή της στο αντικείμενο της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφερε σε όλο το διάστημα των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η ροή θερμότητας που παρατηρείται προς χώρους ή αντικείμενα χαμηλότερης θερμοκρασίας είναι αδύνατο να παρεμποδιστεί εντελώς όμως μπορεί να περιοριστεί, χρήσει κατάλληλων θερμομονωτικών υλικών συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Η έρευνα στον τομέα της θερμομόνωσης επικεντρώνεται μεταξύ άλλων στην ανάπτυξη νέων υλικών, υψηλής απόδοσης με ιδιότητες καλύτερες από τις ήδη υπάρχουσες.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται και καταγράφονται ορισμένες ιδιότητες του νέου θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”, της εταιρίας Ερμώνασσα Α.Ε. και εξάγονται συμπεράσματα σε σχέση με την εφαρμογή και χρήση του. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν δοκίμια χαλκού επικαλυμμένα με το εν λόγω υλικό. Το “Thermonassa I” εξαιτίας της μορφής του και του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται υπερτερεί έναντι των συνηθισμένων θερμομονωτικών υλικών σε ευελιξία και χρόνο εφαρμογής.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται αφορά αφενός τη διερεύνηση της αντοχής του υλικού σε επίπεδο μικροδομής και αφετέρου τη θερμική του αγωγιμότητα. Το “Thermonassa I” όπως προέκυψε από τη λεπτομερή εξέταση της μικροδομής του με SEM/EDS αποτελείται από κενές μικρόσφαιρες οξειδίων κυρίτερα  $\text{SiO}_2$ , οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις καλές μονωτικές ιδιότητες του υλικού.

Οι δοκιμές χάραξης στην επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού κατέδειξαν ένα φτωχό υλικό με αξιοσημείωτη ευαισθησία, γεγονός που αποτελεί εμφανές μειονέκτημα. Επίσης από τη μελέτη της μικροδομής του υλικού έπειτα από κάμψη παρατηρήθηκε σημαντική αντοχή στις μικρότερες μονωτικές μικρόσφαιρες με διάμετρο κάτω των 10  $\mu\text{m}$ .

Συνοψίζοντας η χρήση του “Thermonassa I” προτείνεται για μονώσεις επίπεδων επιφανειών υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα υποβάλλεται σε μηχανικές καταπονήσεις. Στην περίπτωση εφαρμογών όπως εύκαμπτες σωληνώσεις για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού θα ήταν αναγκαία η παρουσία μικροσφαιρών  $\text{SiO}_2$  διαμέτρου έως 10  $\mu\text{m}$ .

**Λέξεις Κλειδιά:** θερμομόνωση, θερμική αγωγιμότητα, μικροδομή, Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης

## Abstract

Heat always flows from a region of higher temperature to a region of lower temperature. However thermal insulation can reduce heat flow. Research on thermal insulation field focuses on the development of new materials with better properties than the existing ones.

In the present study certain properties of the new thermal insulation material "Thermonassa I", manufactured by Ermonassa S.A. were investigated. Particularly, copper specimens coated with the above material were examined. Comparing with the miscellaneous traditional thermal insulation materials "Thermonassa I", due to its form provides more flexibility and requires less application time.

The experimental procedure is intended both to investigate material's strength in a microstructure scale and also to estimate its thermal conductivity. It was found after detailed examination by SEM/EDS that "Thermonassa I" consists of empty oxide microspheres, mainly  $\text{SiO}_2$ . These are responsible for the good insulating properties of the material.

Scratch tests on material's surface revealed a relatively poor material with remarkable sensitivity, fact that is an obvious disadvantage. Bending tests of the "Thermonassa I" illustrated a remarkable endurance for insulating microspheres with diameter below  $10\ \mu\text{m}$ .

Summarizing "Thermonassa I" can be used in flat surfaces provided that it will be free of mechanical fatigue. Applications such as bendable pipelines imply the presence of  $\text{SiO}_2$  microspheres of diameter less than  $10\ \mu\text{m}$ .

**Keywords:** Thermonassa I, thermal insulation, thermal conductivity, microstructure, SEM, Scanning Electron Microscopy

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων .....	10
Κατάλογος Πινάκων .....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
1.1. Θερμομόνωση .....	13
1.2. Αντικείμενο Διπλωματικής .....	14
1.3. Οργάνωση Κειμένου .....	15
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΜΕΓΕΘΗ .....	17
2.1. Μεταφορά Θερμότητας .....	17
2.2. Θερμική Αγωγιμότητα .....	17
2.3. Θερμική Διαχυτότητα .....	21
3. ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	23
3.1. Ταξινόμηση .....	23
3.2. Φυσικές Ιδιότητες .....	25
3.3. Περιβαλλοντικές Ιδιότητες .....	26
3.4. Συνήθη Θερμομονωτικά Υλικά .....	27
Υαλοβάμβακας .....	27
Πετροβάμβακας .....	28
Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) .....	29
Αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) .....	30
Πολυουρεθάνη (PUR) .....	31
Αφρώδες γυαλί .....	33
Αφρώδης διογκωμένος φελλός .....	34
Ξυλόμαλλο .....	34
Περλίτης .....	36
3.5. Εξελεγμένα Θερμομονωτικά Υλικά .....	37
Vacuum Insulation Panel (VIP) .....	37
Gas-Filled Panel (GFP) .....	39
Aerogel .....	40
3.6. Σύγκριση μεταξύ Παραδοσιακών και Σύγχρονων Θερμομονωτικών Υλικών .....	41
3.7. Η Έρευνα στον τομέα της Θερμομόνωσης .....	42
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	44
4.1. Μέθοδοι Μόνιμης Κατάστασης .....	44
4.1.1. Μέθοδος της Θερμαινόμενης Επιφάνειας (Guarded Hot Plate Method) .....	45
4.1.2. Θερμιδομετρική Μέθοδος (Calorimeter Method) .....	46
4.1.3. Μέθοδος της Ακτινικής Ροής Θερμότητας (Radial Heat Flow) και Μέθοδος της Αξονικής Ροής Θερμότητας (Axial Heat Flow) .....	48
4.1.4. Μέθοδος του Θερμαινόμενου Σύρματος (Hot Wire) .....	48
4.2. Μέθοδοι Μη-Μόνιμης Κατάστασης .....	48
4.2.1. Μέθοδος Μεταβολής της Ακτινικής Ροής Θερμότητας (Dynamic Radial Heat Flow Method) .....	49
4.2.2. Τεχνική Laser-Flash (Laser-Flash Method) .....	50
4.2.3. Μέθοδος Θερμαινόμενου Δίσκου (Transient Hot-Disk Method) .....	51



4.2.4. Μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος (Transient Hot-Wire Method) .....	52
4.2.5. Μέθοδοι Επιβολής Διαταραχής είτε Παλμικής (Pulse Transient) είτε Βηματικής (Step-wise Transient Method) .....	55
4.3. Σύγκριση μεταξύ των Μεθόδων Μόνιμης και Μη-Μόνιμης Κατάστασης.....	55
5. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ .....	57
5.1. Γενικά .....	57
5.2 Αρχή Λειτουργίας .....	57
5.3. Αλληλεπιδράσεις Δέσμης Ηλεκτρονίων - Δείγματος .....	58
5.3.1. Ελαστική Σκέδαση .....	59
5.3.2. Μη Ελαστική Σκέδαση .....	60
5.3.3. Ακτίνες Χ.....	61
5.4. Περιγραφή Οργάνου.....	63
5.4.1. Πηγή Ηλεκτρονίων .....	64
5.4.2. Σύστημα Πληροφοριών .....	64
5.5. Εφαρμογές .....	65
6. ΤΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ “THERMONASSA I”.....	66
6.1. Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες.....	66
6.2. Κυριότερες Εφαρμογές.....	67
6.3. Τα Μελετώμενα Δείγματα .....	68
6.3.1. Γεωμετρία και Διαστάσεις .....	68
6.3.2. Μικροδομή .....	71
6.3.3. Επιφάνεια Διεπαφής.....	72
6.4. Δοκιμή Χάραξης της Επιφάνειας του Υλικού.....	73
6.5. Δοκιμή σε Κάμψη .....	76
6.6. Εκτίμηση Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας .....	77
7. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	86

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ράβδος μήκους $L$ , που διασχίζεται από θερμική ροή, κατά την κατεύθυνση $+x$ .....	18
Εικόνα 2: Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) συνήθων δομικών στοιχείων .....	20
Εικόνα 3: Συνοπτική κατάταξη κυριότερων θερμομονωτικών υλικών .....	24
Εικόνα 4: Διάφορες μορφές υαλοβάμβακα (ρολά, πλάκες και κοχύλια).....	27
Εικόνα 5: (Αριστερά) διάφορες μορφές πετροβάμβακα και (δεξιά) όψη πετροβάμβακα από μικροσκοπιο .....	28
Εικόνα 6: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης σε διάφορα πάχη .....	30
Εικόνα 7: Πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης σε διάφορα πάχη .....	31
Εικόνα 8: Ψεκασμός αφρού πολυουρεθάνης .....	32
Εικόνα 9: Πλάκες αφρώδους γυαλιού .....	33
Εικόνα 10: Πλάκες φελλού σε διάφορα πάχη .....	34
Εικόνα 11: Εξωτερική μόνωση σκελετού οπλισμένου σκυροδέματος με πλάκες ξυλόμαλλου	35
Εικόνα 12: Πλάκες και κοχύλια περλίτη για εφαρμογές θερμομόνωσης.....	36
Εικόνα 13: (Αριστερά) τυπική δομή VIP με τα επιμέρους μέρη του και (δεξιά) σύγκριση πάχους VIP και εξηλασμένης πολυστερίνης XPS με ισοδύναμη θερμική αντίσταση .....	37
Εικόνα 14: Τέσσερις διαφορετικοί τύποι εξωτερικού περιβλήματος VIP σε τομή. Διακρίνονται για κάθε έναν συμβολισμός και σύσταση.....	38
Εικόνα 15: Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσεως των ετών για δύο διαφορετικού μεγέθους πάνελ VIP (50 cm x 50 cm x 1 cm, 100 cm x 100 cm x 2 cm) και τρεις τύπους εξωτερικού περιβλήματος (AF, MF1, MF2) .....	38
Εικόνα 16: Δομή ενός GFP .....	39
Εικόνα 17: (Αριστερά) σπρίτα πάνω από aerogel τα οποία προστατεύονται από τη φλόγα που βρίσκεται από κάτω και (δεξιά) aerogel ως θερμομονωτικό υλικό υψηλής απόδοσης.....	41
Εικόνα 18: Εφαρμογή της νανοτεχνολογίας σε θερμομονωτικά υλικά υψηλής απόδοσης.....	43
Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμαινόμενης επιφάνειας σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C177 .....	45
Εικόνα 20: Σχηματικό διάγραμμα θερμοδομετρικής διάταξης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C201.....	47
Εικόνα 21: Σχηματικό διάγραμμα των επιμέρους συσκευών μιας πειραματικής διάταξης της μεθόδου μεταβολής της ακτινικής ροής θερμότητας.....	50
Εικόνα 22: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης της τεχνικής Laser-Flash .....	51
Εικόνα 23: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης της μεθόδου θερμαινόμενου δίσκου .....	52
Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα ιδανικής πειραματικής διάταξης θερμαινόμενου σύρματος, για τη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας ρευστών .....	53
Εικόνα 25: Φαινόμενα αλληλεπίδρασης δέσμης ηλεκτρονίων - δείγματος.....	58
Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση σκέδασης οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων .....	59
Εικόνα 27: Σχηματική απεικόνιση σκέδασης δευτερογενών ηλεκτρονίων.....	60
Εικόνα 28: Περίπτωση παραγωγής χαρακτηριστικών ακτίνων Χ.....	61
Εικόνα 29: Παράδειγμα παραγωγής ηλεκτρονίων Auger .....	62
Εικόνα 30: Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης .....	63
Εικόνα 31: Εφαρμογές μόνωσης σωληνώσεων με “Thermonassa I” .....	68
Εικόνα 32: Σκαρίφημα των υπό εξέταση δοκιμίων .....	69

Εικόνα 33: Υπολογισμός πάχους “Thermonassa I” στο 6 <sup>ο</sup> δοκίμιο με τη βοήθεια του λογισμικού ImageJ .....	70
Εικόνα 34: Λεπτομέρειες της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” χρήσει SEM .....	71
Εικόνα 35: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων Χ για την ανάλυση της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” .....	72
Εικόνα 36: Λεπτομέρειες της επιφάνειας διεπαφής χαλκού – θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” χρήσει SEM .....	72
Εικόνα 37: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων Χ για την ανάλυση της διεπιφάνειας χαλκού – θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” .....	73
Εικόνα 38: Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με νύχι όπως φαίνεται χρήσει SEM .....	74
Εικόνα 39: Γενική άποψη των δύο εγχαράξεων, (α) με καπάκι του στυλό επάνω και κατασαβίδι κάτω και (β) με κατασαβίδι αριστερά και καπάκι του στυλό δεξιά .....	74
Εικόνα 40: Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με καπάκι του στυλό όπως φαίνεται χρήσει SEM .....	75
Εικόνα 41: Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με λεπτό κατασαβίδι όπως φαίνεται χρήσει SEM .....	75
Εικόνα 42: Λεπτομέρειες από την επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” σε δοκίμιο που είχε υποστεί κάμψη .....	76
Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.....	77
Εικόνα 44: (Αριστερά) δοκίμιο με στερεωμένο θερμοζεύγος στο μέσον της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” και (δεξιά) η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.....	77
Εικόνα 45: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1 <sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6 <sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν $T_{plate}=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	79
Εικόνα 46: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1 <sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6 <sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν $T_{plate}=39.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	80
Εικόνα 47: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1 <sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6 <sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν $T_{plate}=51.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	81

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας διάφορων υλικών .....	19
Πίνακας 2: Συντελεστές θερμικής διαχυτότητας διάφορων υλικών.....	21
Πίνακας 3: Κυριότερες ιδιότητες συνηθέστερων θερμομονωτικών υλικών.....	36
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” .....	66
Πίνακας 5: Αναλυτικό πάχος εξεταζόμενων δοκιμίων .....	70
Πίνακας 6: Μετρήσεις με θερμοζεύγος στα δοκίμια χαλκού - θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες της θερμαινόμενης επιφάνειας .....	78

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### *1.1. Θερμομόνωση*

Η θερμομόνωση σχετίζεται άμεσα με τη θερμότητα. Η τελευταία είναι γνωστή από τη φυσική ως μια μορφή ενέργειας. Σύμφωνα με βασική αρχή της θερμοδυναμικής από κάθε περιοχή, χώρο ή αντικείμενο σχετικά υψηλής θερμοκρασίας, παρατηρείται ροή θερμότητας προς περιοχές, χώρους και αντικείμενα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Στη μετακίνηση αυτή οφείλεται η εμφάνιση θερμικών απωλειών. Οι θερμικές απώλειες αν και δεν είναι δυνατό να εμποδιστούν τελείως, μπορούν να περιοριστούν χρησιμοποιώντας κατάλληλα υλικά (θερμομονωτικά) με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες.

Με τη θερμομόνωση επιδιώκουμε αρχικά να μειώσουμε την ταχύτητα ροής της θερμότητας από και προς έναν χώρο. Για παράδειγμα στην περίπτωση μιας κατοικίας κατά τη χειμερινή περίοδο μειώνουμε την ταχύτητα ροής της θερμότητας προς το περιβάλλον και επιτυγχάνουμε διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας, με την περιοδική προσθήκη μικρών ποσοτήτων θερμότητας (θέρμανση). Αντίστοιχα κατά τη θερινή περίοδο, η θερμομόνωση επιβραδύνει την εισροή εξωτερικής θερμότητας και επιτρέπει στα μηχανήματα κλιματισμού να λειτουργούν με πολύ χαμηλότερο κόστος.

Η κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των συστημάτων ψύξης - θέρμανσης δεν αποτελούσε πρόβλημα, μέχρι τη στιγμή που τα διαθέσιμα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων μειώθηκαν και έπαψαν να είναι φθηνά (πετρελαϊκή κρίση 1973). Επακόλουθο αυτού ήταν μία παγκόσμια προσπάθεια διαφύλαξης και ορθολογικότερης εκμετάλλευσης των αποθεμάτων ενέργειας.

Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος κατανάλωσης ενέργειας των κτιρίων αφορά τη θέρμανση και την ψύξη τους, γίνεται φανερό πως η χρησιμοποίηση πιο ενεργειακά αποδοτικών θερμομονωτικών υλικών θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τα θερμικά και ψυκτικά φορτία. Το παραπάνω θα είχε ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση στη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται.

Ωστόσο, η θερμομόνωση δεν αποφέρει μόνο οικονομικά οφέλη λόγω της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας αλλά και περιβαλλοντικά. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συνοδεύεται από εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων και από μειωμένες εκπομπές εκλυόμενων ρύπων προς την ατμόσφαιρα.

Επιπλέον η θερμομόνωση επιδρά θετικά και στο εσωκλίμα διότι βοηθάει στη διατήρηση ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας σε όλο το κτίριο. Οι τοίχοι, οι οροφές και τα πατώματα καθίστανται θερμότερα κατά την περίοδο θέρμανσης και ψυχρότερα κατά την περίοδο δροσισμού. Ταυτόχρονα ορισμένα θερμομονωτικά υλικά έχουν θετικές επιπτώσεις και όσον αφορά στην ηχομόνωση των κτιρίων, διότι λειτουργούν είτε ως φράγματα είτε ως απορροφητές του ήχου.

Η θερμομόνωση δεν περιορίζεται μόνο στα νεόδμητα κτίρια, αλλά και στα υφιστάμενα κτίρια, καθώς σε αυτά παρουσιάζονται μεγάλες απώλειες θερμότητας. Για τη μείωση των απωλειών γίνονται εκτεταμένες προσπάθειες, με στόχο την ανεύρεση τρόπων διόρθωσης των στρεβλώσεων του παρελθόντος που σχετίζονται με τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιρίων [Παπαδόπουλος, 2004].

Κάτω από συνθήκες οικονομικά προσιτές, μια καλή θερμική μόνωση πρέπει να εξασφαλίζει υγιεινή, άνετη και ευχάριστη διαβίωση, χωρίς να διαταράσσεται το θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και χωρίς να προκαλούνται σοβαρές θερμικές αλληλεπιδράσεις κρύου ή ζέστης ανάμεσα σε αυτό και στο χώρο που το περιβάλλει. Άλλωστε το θερμικό ισοζύγιο είναι αυτό που κυρίως καθορίζει το αίσθημα άνεσης του ανθρώπινου οργανισμού.

Πρόσθετα θα πρέπει να επιτυγχάνεται οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας, λόγω του περιορισμού των θερμικών απωλειών από το κέλυφος του κτιρίου καθώς και ελάττωση του αρχικού κόστους κατασκευής της εγκατάστασης του συστήματος κεντρικής θέρμανσης ή κλιματισμού. Αυτά συνοδεύονται από ταυτόχρονη προστασία από τους θορύβους αφού τα περισσότερα από τα θερμομονωτικά υλικά είναι και ηχομονωτικά. Τέλος, όπως ειπώθηκε, βελτιώνεται η προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα, αφού μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, περιορίζεται αντίστοιχα και η ποσότητα των καυσαερίων που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

## ***1.2. Αντικείμενο Διπλωματικής***

Στην παρούσα εργασία μελετώνται και καταγράφονται ορισμένες ιδιότητες του νέου θερμομονωτικού υλικού "Thermonassa I", της εταιρίας Ερμώνασσα Α.Ε. και εξάγονται συμπεράσματα σε σχέση με την εφαρμογή και χρήση του. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν δοκίμια χαλκού επικαλυμμένα με το εν λόγω υλικό. Με τη βοήθεια λογισμικού επεξεργασίας εικόνας αξιοποιήθηκαν κατάλληλες φωτογραφίες από το

SEM για να υπολογιστούν τα ακριβή πάχη των δοκιμίων. Από το σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X που δημιουργούνται στην επιφάνεια μελέτης από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων ελήφθη η στοιχειομετρική μικροανάλυση EDS τόσο της επιφάνειας του θερμομονωτικού όσο και της επιφάνειας διεπαφής. Με τον τρόπο αυτό αντλήθηκαν πληροφορίες για τη σύσταση του συγκεκριμένου υλικού.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε μετέπειτα αποσκοπούσε αφενός στη διερεύνηση της αντοχής του υλικού σε επίπεδο μικροδομής και αφετέρου στην εκτίμηση της θερμικής του αγωγιμότητας. Όσον αφορά την αντοχή, δοκίμιο υποβλήθηκε σε δοκιμές χάραξης και άλλο σε κάμψη για να μελετηθεί η συμπεριφορά του υλικού σε αυτές τις καταπονήσεις. Κάθε φορά εξετάστηκε η επίδραση των καταπονήσεων αυτών στη μικροδομή του υλικού.

Για την εκτίμηση της θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας με θερμοζεύγος και θερμόμετρο υπερύθρων. Υλοποιήθηκε ενδεικτικά προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας εντός των δοκιμίων, με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

### **1.3. Οργάνωση Κειμένου**

Από άποψη δομής, η εργασία αυτή μαζί με την Εισαγωγή αποτελείται από συνολικά επτά κεφάλαια. Συγκεκριμένα:

- Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας. Γίνεται αναφορά στους τρόπους μετάδοσης της θερμότητας και ορίζονται τα μεγέθη θερμική αγωγιμότητα και θερμική διαχυτότητα. Παρατίθενται ακολούθως οι τιμές των παραπάνω μεγεθών για διάφορα υλικά.
- Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνονται θέματα που αναφέρονται στα θερμομονωτικά υλικά. Αρχικά κατατάσσονται σε κατηγορίες με βάση τη χημική τους σύνθεση, τη δομή τους και ανάλογα με την πρώτη ύλη των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Περιγράφονται στη συνέχεια οι φυσικές καθώς και οι περιβαλλοντικές ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν. Ακολουθεί η καταγραφή των συνηθέστερων θερμομονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα καθώς και των πιο εξελιγμένων. Επιχειρείται τέλος σύγκριση των δύο παραπάνω.
- Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι σύγχρονες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας, που διακρίνονται σε μόνιμης και μη-μόνιμης κατάστασης. Αναπτύσσονται τα

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μεθόδου και αντιπαραβάλλονται συγκριτικά.

- Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο δίνεται μια σαφής περιγραφή της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης. Περιγράφονται οι βασικές διατάξεις ενός τέτοιου μικροσκοπίου, το πώς λειτουργεί και αναφέρονται παραδείγματα στα οποία βρίσκει εφαρμογή.
- Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνονται πληροφορίες για το εν λόγω θερμομονωτικό υλικό, τις ιδιότητες και τις βασικές εφαρμογές του. Περιγράφονται τα υπό εξέταση δείγματα, οι δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε.
- Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.



# 2

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΜΕΓΕΘΗ

### *2.1. Μεταφορά Θερμότητας*

Η μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα υλικό πραγματοποιείται με τη σύγχρονη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, συναγωγή (ή μεταφορά) και ακτινοβολία. Επιγραμματικά, αγωγή καλείται η μετάδοση θερμότητας με ενδομοριακές δυνάμεις με κατευθείαν μοριακή μεταφορά ενέργειας που οφείλεται στην περιστροφή, δόνηση ή κίνηση των μορίων. Ακτινοβολία καλείται η μεταφορά θερμότητας που πραγματοποιείται με απορρόφηση, εκπομπή και σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην κίνηση μάζας ενός ρευστού που οφείλεται σε πεδία ταχύτητας, που δημιουργούνται μέσα σε ένα ρευστό (υγρό ή αέριο).

### *2.2. Θερμική Αγωγιμότητα*

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η ροή θερμότητας συνδέεται με το γεγονός ότι σε ένα σώμα η ενέργεια ταλάντωσης των ατόμων (ή των μορίων) του γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία. Αν για κάποιο λόγο η θερμοκρασία μιας περιοχής του σώματος είναι υψηλότερη από ότι στο υπόλοιπο σώμα, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ατόμων η αυξημένη ενέργεια ταλάντωσης των ατόμων αυτών θα αρχίσει να μεταδίδεται στα γειτονικά άτομα, ωστόσο εξισωθεί η θερμοκρασία σε όλη τη μάζα του υλικού.

Μακροσκοπικά, η διάδοση της ενέργειας ταλάντωσης των ατόμων εκδηλώνεται ως ροή θερμότητας από τις θερμότερες προς τις ψυχρότερες περιοχές του σώματος και τείνει να εξισώσει τη θερμοκρασία, όταν η θερμική ισορροπία του σώματος έχει διαταραχθεί.

Στα μέταλλα, η κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων δίνει έναν πρόσθετο μηχανισμό διάδοσης της θερμότητας. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται ταχύτατα σε ολόκληρο τον όγκο του μετάλλου (τυπικά ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο θα προσπεράσει μερικές εκατοντάδες άτομα πριν συγκρουσθεί) και έτσι μεταφέρουν ενέργεια πολύ πιο αποτελεσματικά. Για το λόγο αυτό η θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων είναι

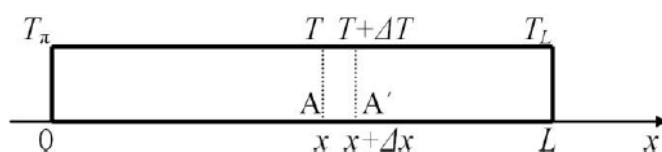
δεκάδες ή και εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από εκείνη των διηλεκτρικών υλικών.

Ο όρος θερμική αγωγιμότητα αναφέρεται σε εκείνη την ιδιότητα του υλικού, που χαρακτηρίζει την κατανομή της ενέργειας σε αυτό, όταν η θερμική του ισορροπία διαταραχτεί από την επιβολή μιας ενεργειακής μεταβολής [Fourier, 1822]. Πρόκειται για ένα παράδειγμα φαινομένου μεταφοράς και εκδηλώνεται εκεί όπου η θερμοκρασία ενός σώματος δεν είναι η ίδια σε όλα του τα σημεία.

Για την ποσοτική περιγραφή του φαινομένου, θεωρούμε μια ομογενή ράβδο μήκους  $L$ , η οποία βρίσκεται πάνω στον άξονα  $x$ , με το ένα της άκρο στο σημείο  $x = 0$  και το άλλο στο  $x = L$  (Εικ. 1). Η ράβδος έχει σταθερή εγκάρσια διατομή εμβαδού  $S$ . Έστω ότι έχουμε δύο επίπεδα  $A$  και  $A'$ , κάθετα στον άξονα της ράβδου, που βρίσκονται στις θέσεις  $x$  και  $x+\Delta x$  αντίστοιχα.

Αν η θερμότητα ρέει μόνο προς την κατεύθυνση  $+x$ , τα επίπεδα αυτά θα είναι επιφάνειες σταθερής θερμοκρασίας, έστω  $T$  και  $T+\Delta T$  αντίστοιχα. Πειραματικά βρίσκεται ότι για μικρά  $\Delta x$ , η ποσότητα θερμότητας  $Q$ , που ρέει στη μονάδα του χρόνου από την επιφάνεια  $A$  προς την  $A'$ , είναι ανάλογη του εμβαδού  $S$  και του λόγου  $\Delta T/\Delta x$ . Έχουμε δηλαδή:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$



**Εικόνα 1:** Ράβδος, μήκους  $L$ , που διασχίζεται από θερμική ροή, κατά την κατεύθυνση  $+x$ . Το άκρο στο  $x=0$  βρίσκεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_\pi$ , ενώ το άλλο άκρο της ( $x = L$ ) βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_L$ .

Ο συντελεστής  $\lambda$ , που χαρακτηρίζει το υλικό και ονομάζεται *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας*, μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάρτητος της θερμοκρασίας για μικρές περιοχές θερμοκρασίας. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ροή της θερμότητας είναι αρνητική (προς τα αρνητικά  $x$ ), όταν ο λόγος  $\Delta T/\Delta x$  είναι θετικός. Στην οριακή περίπτωση μιας πλάκας απειροστού πάχους  $dx$ , μεταξύ των άκρων της οποίας υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας  $dT$ , ισχύει ο *θεμελιώδης νόμος της θερμικής αγωγιμότητας*:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Το πηλίκο  $dT/dx$  λέγεται *θερμοβαθμίδα* και εκφράζει τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ , ο οποίος αποτελεί φυσική ιδιότητα του υλικού αφού το χαρακτηρίζει από άποψη θερμικής συμπεριφοράς, προσδιορίζεται πειραματικά και εκφράζεται σε  $W/(mK)$ . Υλικά με μεγάλο  $\lambda$  είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας ενώ αυτά με μικρό  $\lambda$  είναι κακής ποιότητας αγωγοί, ή αλλιώς μονωτές.

Ως  $1 W/(mK)$  ορίζεται η ποσότητα θερμότητας που περνά ανά δευτερόλεπτο μέσα από τις απέναντι πλευρές κύβου ακμής 1m (από ομοιογενές και ισότροπο υλικό), όταν η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των επιφανειών αυτών διατηρείται σταθερή, ίση με 1K.

**Πίνακας 1: Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας διάφορων υλικών**

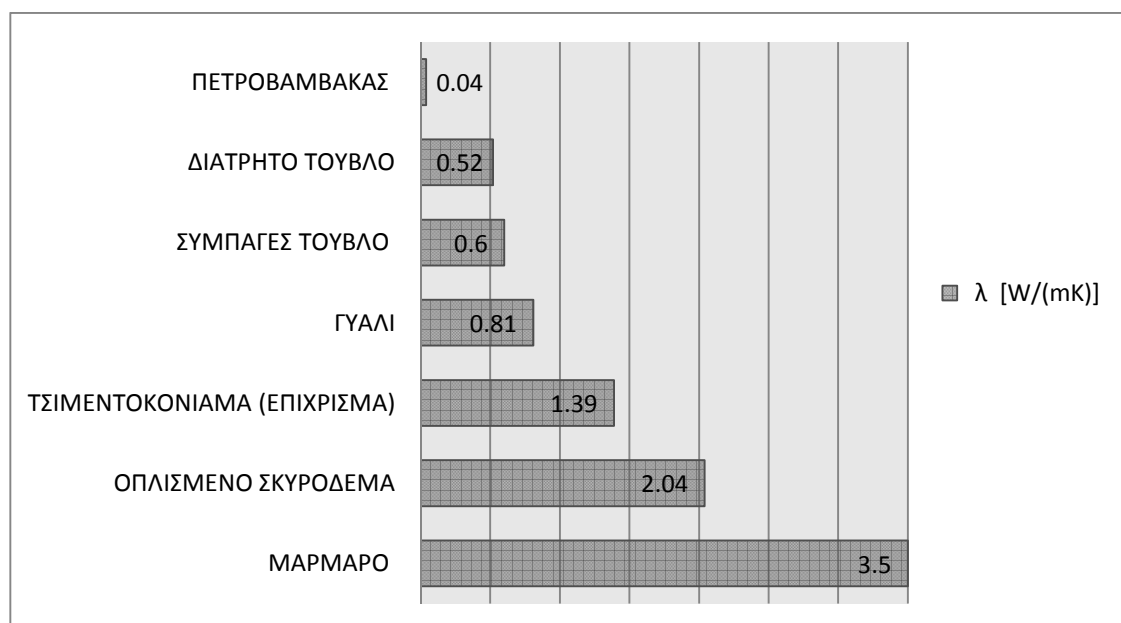
Υλικά		$\lambda$ [ $W/(mK)$ ]
Μεγάλης Αγωγιμότητας	Χαλκός	390
	Αλουμίνιο	201
	Ορείχαλκος	110
	Σίδηρος	67
Μέσης Αγωγιμότητας	Μάρμαρο	3.5
	Πυρίμαχο Υλικό	1.7
	Γυαλί	0.81
Μονωτές	Αμίαντος	0.17
	Φελλός	0.04
	Μαλλί	0.02

Στην περίπτωση που δύο αντικείμενα με διαφορετικές θερμοκρασίες έρθουν σε επαφή τότε εμφανίζεται ροή θερμικής ενέργειας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα (*θερμοροή*). Το παραπάνω φαινόμενο δημιουργεί προβλήματα απωλειών ενέργειας.

Στα κτίρια η θερμότητα ρέει με φυσικό τρόπο από ένα θερμό χώρο σε έναν ψυχρότερο. Κατά τη χειμερινή περίοδο (περίοδος θέρμανσης) αυτή η ροή θερμότητας κινείται είτε άμεσα από όλους τους θερμαινόμενους χώρους του κτιρίου προς τους παρακείμενους μη θερμαινόμενους χώρους και προς το εξωτερικό περιβάλλον, είτε έμμεσα διαμέσου των εσωτερικών οροφών, τοίχων και δαπέδων, οπουδήποτε ή οποτεδήποτε παρουσιάζεται θερμοκρασιακή διαφορά. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο (περίοδος δροσισμού) η θερμότητα ρέει από το εξωτερικό περιβάλλον προς το εσωτερικό του κτιρίου.

Για να μειωθούν οι απώλειες λόγω θερμοροής επιβάλλεται η χρήση υλικών με

χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ . Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται ως θερμομονωτικά. Η θερμομόνωση στα ομοιογενή και ισότροπα υλικά τουλάχιστον, ταξινομείται με όρους συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ , του οποίου η φυσική σημασία έγκειται στην αντίσταση στη θερμοροή. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση στη θερμοροή και επομένως η αποτελεσματικότητα θερμομονωτικού υλικού. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατασκευές.



Εικόνα 2: Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) συνήθων δομικών στοιχείων

### Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του $\lambda$

Η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  ενός υλικού εξαρτάται από:

- τη φύση του υλικού
- τη δομή του (πορώδες, πυκνότητα)
- τη θερμοκρασία
- την υγρασία
- την πίεση

Η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από τη χημική σύσταση του υλικού, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Πιο συγκεκριμένα αύξηση της υγρασίας σημαίνει και αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ανεπιθύμητη για ένα θερμομονωτικό υλικό, καθώς το εγκλωβισμένο νερό με το κατά πολύ

μεγαλύτερο  $\lambda$  από αυτό του αέρα καταλαμβάνει τη θέση του τελευταίου. Σημειώνεται ότι το νερό και ο πάγος έχουν περίπου 24 και 92 φορές αντίστοιχα, μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  από τον αέρα. Για το λόγο αυτό η υγρασία θεωρείται και το μεγαλύτερο αίτιο προβλημάτων της θερμομόνωσης σε μια κατασκευή.

Γενικά για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  ισχύει ότι:

- Τα αέρια έχουν μικρές τιμές  $\lambda$ , υποδεκαπλάσιες των υγρών.
- Τα στερεά παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις τιμές  $\lambda$  γεγονός που οφείλεται στη φυσική δομή τους.
- Τα μέταλλα σε καθαρή κατάσταση έχουν μεγάλες τιμές  $\lambda$ , ενώ τα κράματά τους παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές από τα συστατικά τους.
- Για ινώδη σώματα (π.χ. υφαντά, ξύλο) η τιμή του  $\lambda$  είναι μεγαλύτερη για αγωγή κατά μήκος των ινών, από την αντίστοιχη τιμή για αγωγή κάθετα σε αυτές.

Τα υλικά με τις ακραίες τιμές  $\lambda$  είναι ο άργυρος ( $\lambda_{Ag} = 418 \text{ W/(mK)}$ ) και η ειδικής παρασκευής πηκτή από πυρίτια (silica gel) από την οποία έχει αφαιρεθεί ο αέρας ( $\lambda_{sil.gel} = 0.00207 \text{ W/(mK)}$ ).

### **2.3. Θερμική Διαχυτότητα**

Η θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity) είναι μια ιδιότητα των υλικών που εμφανίζεται στην μεταβατική (transient) ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας. Ο *συντελεστής θερμικής διαχυτότητας*  $k$  εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα διαμέσου ενός υλικού και έχει μονάδες  $\text{m}^2/\text{s}$ . Κατά μία έννοια, η θερμική διαχυτότητα είναι το μέτρο της θερμικής αδράνειας [Venkanna, 2010] και ισχύει:

$$k = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2.3)$$

όπου  $\lambda$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού,  $\rho$  η πυκνότητά του και  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητά του υπό σταθερό όγκο. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμικής διαχυτότητας για διάφορα υλικά και χημικά στοιχεία.

**Πίνακας 2: Συντελεστές θερμικής διαχυτότητας διάφορων υλικών [Holman, 2002]**

<b>Υλικό / Χημικό Στοιχείο</b>	<b><math>k</math> [<math>mm^2/s</math>]</b>
Πυρολυτικός Γραφίτης (parallel to layers)	1220
Ήλιο (300 K, 1 atm)	190
Άργυρος, καθαρός (99.9%)	165.63
Υδρογόνο (300 K, 1 atm)	160
Χρυσός	127
Χαλκός (25 °C)	111
Πυρίτιο	88
Αργίλιο	84.18
Κασσίτερος	40
Υδρατμοί (1 atm, 400 K)	23.38
Σίδηρος	23
Άζωτο (300 K, 1 atm)	22
Αέρας (300 K)	19
Χάλυβας ,1% άνθρακα	11.72
Χάλυβας, ανοξειδωτος 304A / 27 °C	4.2
Πυρολυτικός Γραφίτης (normal to layers)	3.6
Χάλυβας, ανοξειδωτος 310 / 25 °C	3.352
Χαλαζίας	1.4
Τούβλο	0.52
Γυαλί	0.34
Νερό / 25 °C	0.143
Nylon	0.09
Ξύλο	0.082
PVC	0.08

# 3

## ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν την ιδιότητα της θερμικής αντίστασης στον αέρα που περιέχεται μέσα τους, ο οποίος θεωρείται κακός αγωγός της θερμότητας, δηλαδή έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Σε θεωρητικό επίπεδο η θερμική αγωγιμότητα ελαχιστοποιείται σε συνθήκες κενού, επειδή η έλλειψη μάζας καθιστά αδύνατη τη μεταφορά της θερμότητας με αγωγή. Στην πράξη, η μικρότερη δυνατή θερμική αγωγιμότητα επιτυγχάνεται όταν υπάρχει ακίνητος, ξηρός αέρας.

Τα θερμομονωτικά υλικά επιτυγχάνουν το σκοπό τους, ακριβώς επειδή διαθέτουν στην «πορώδη» μάζα τους πολλούς μικρούς θύλακες ακίνητου αέρα, εγκλωβισμένου σε κυψέλες ή μέσα σε ένα πλέγμα ινών. Για το λόγο αυτό τα θερμομονωτικά υλικά έχουν κατά κανόνα και μικρό φαινόμενο βάρος. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  ενός πορώδους υλικού είναι μικρότερος σε σχέση με το  $\lambda$  του ίδιου υλικού εάν αυτό ήταν πιο συμπαγές.

Το παραπάνω καθώς και η λειτουργία του πορώδους των υλικών οδήγησε στην ανάπτυξη θερμομονωτικών υλικών, κοινό γνώρισμα των οποίων είναι η ύπαρξη σε μεγάλο ποσοστό πόρων που περιέχουν είτε αέρα είτε κάποιο άλλο αέριο που χαρακτηρίζεται ως κακός αγωγός της θερμότητας και άρα διαθέτει μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$ . Η πορώδης δομή των βιομηχανικά παραγόμενων μονωτικών υλικών επιτυγχάνεται με τη χρήση λεπτών ακανόνιστων ινών ή με την παραγωγή κυψελίδων από στερεοποιητικά υλικά.

Η θερμική τους αγωγιμότητα καθορίζεται πρωταρχικά από τον αριθμό και το μέγεθος των κυψελών που υπάρχουν στη μάζα του υλικού τους και που περιέχουν τον ακίνητο, με θερμομονωτικές ιδιότητες, αέρα.

### 3.1. Ταξινόμηση

Υπάρχουν τρεις τρόποι ταξινόμησης των θερμομονωτικών υλικών [Παπαδόπουλος, 2004]:

1. Με βάση τη χημική σύνθεση των συστατικών τους διακρίνονται σε:
  - Οργανικά

- Ανόργανα
- Σύνθετα (περιέχουν οργανικές και ανόργανες ενώσεις).

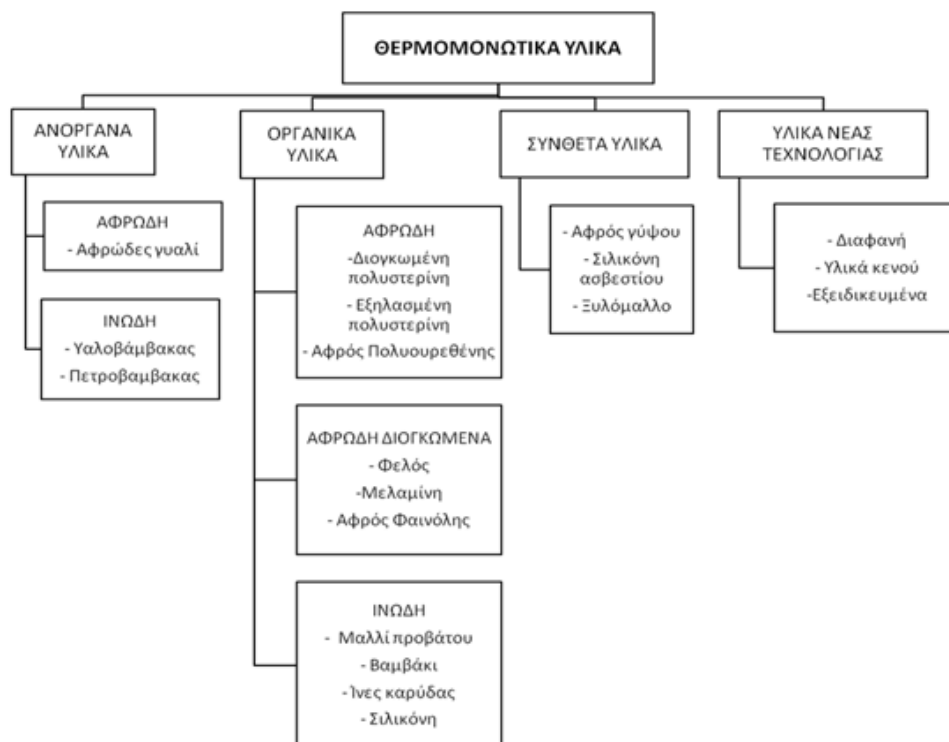
2. Με βάση την πρώτη ύλη των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους, τα οποία διακρίνονται σε:

- Ορυκτά υλικά (όπως άμμος, βασάλτης, βωξίτης, δολομίτης, γυαλί καινούριο ή ανακυκλωμένο)
- Πετροχημικές πρώτες ύλες για αφρώδες πλαστικό (όπως στυρόλιο, ουρεθάνη, φορμαλδεΐδη)
- Οργανικά φυσικά υλικά (όπως φελός, ξύλο, φυτικές ίνες, κυτταρίνη, μαλλί).

Σημειώνεται ότι για την παραγωγή των θερμομονωτικών υλικών, εκτός των πρώτων υλών χρησιμοποιούνται και άλλες βοηθητικές ύλες, ως συνδετικά και ενισχυτικά μέσα για τη δημιουργία των κυψελωτών δομών, αλλά και για την επίτευξη λοιπών επιθυμητών ιδιοτήτων.

3. Με βάση τη δομή τους τα θερμομονωτικά υλικά χωρίζονται σε:

- Αφρώδη (ο αέρας υπάρχει μέσα τους με μορφή φυσαλίδων)
- Ινώδη (ο αέρας περιέχεται ανάμεσα στις ίνες τους όπως ακριβώς συμβαίνει σε ένα μάλλινο ύφασμα).



Εικόνα 3: Συνοπτική κατάταξη κυριότερων θερμομονωτικών υλικών



Σε ευρωπαϊκό επίπεδο στην αγορά θερμομονωτικών υλικών κυριαρχούν τα ανόργανα ινώδη υλικά (υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας) με ποσοστό περίπου 60%. Τα οργανικά αφρώδη (εξηλασμένη και διογκωμένη πολυστερίνη, πολυουρεθάνη) ακολουθούν με 30% ενώ τελευταία έπονται λοιπά υλικά (κυρίως ξυλόμαλλο, φελλός και αφρώδες γυαλί) με συνολικό ποσοστό 10%.

### **3.2. Φυσικές Ιδιότητες**

Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα θερμομονωτικά υλικά διακρίνονται σε φυσικές και περιβαλλοντικές [Παπαδόπουλος, 2004]. Οι φυσικές ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών περιγράφουν τη συμπεριφορά των τελευταίων κάτω από ορισμένες συνθήκες και παρουσιάζονται παρακάτω:

*-Πυκνότητα*

*-Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ )*

*-Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης* ώστε το υλικό να διατηρεί τη θερμομονωτική του ικανότητα. Πρακτικά αφορά τα θερμοκρασιακά όρια μέσα στα οποία ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβάλλεται ανεπαίσθητα.

*-Αντοχή στην επίδραση της υγρασίας* που εκφράζεται με τα μεγέθη:

- *Συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών* που εκφράζει τη δυσκολία με την οποία διαχέονται υδρατμοί διαμέσου της μάζας του υλικού (πρακτικά θεωρείται ανεξάρτητος της θερμοκρασίας και της πίεσης και είναι αδιάστατο μέγεθος)
- *Ποσότητα υγρασίας εξομοίωσης* (εκφράζει το ποσό της υγρασίας που απορροφήθηκε στο υλικό υπό ορισμένες συνθήκες σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος)

*-Πυραντοχή* (κλάσεις πυραντοχής κατά DIN 4102, A1/A2/A3/B1/B2/B3/C1/C2/C3)

- Τα μη εύφλεκτα δομικά υλικά τυποποιούνται ως A1 ή A2 (καμία ανάφλεξη και ανάφλεξη για χρόνο μέχρι 20 sec αντίστοιχα)
- Τα υλικά που αντιστέκονται στη φωτιά ως B1
- Κανονικά υλικά ως B2
- Εύφλεκτα υλικά ως B3
- Αν σημαντικά συστατικά του δομικού υλικού δεν καίγονται, το δομικό υλικό χαρακτηρίζεται με τα γράμματα AB.

- Όριο διαρροής (αντοχή σε εφελκυσμό) και Όριο θραύσης
- Βαθμός απορρόφησης ήχου
- Ευκολία κατεργασίας και τοποθέτησης
- Διάρκεια ζωής σε σχέση με τη φθορά στο χρόνο (προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές γήρανσης των υλικών και από πολυετείς παρατηρήσεις σε πραγματικές συνθήκες)

### **3.3. Περιβαλλοντικές Ιδιότητες**

Οι περιβαλλοντικές ιδιότητες περιγράφουν τον οικολογικό χαρακτήρα των θερμομονωτικών υλικών. Υπάρχουν συγκεκριμένοι ενεργειακοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί κατά την παραγωγή των υλικών αυτών. Η πολιτική αυτή υιοθετείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση η οποία υποχρεώνει τους κατασκευαστές να φέρουν περιβαλλοντική πιστοποίηση στα προϊόντα τους.

Πρόκειται για την *περιεχόμενη πρωτογενή ενέργεια, τις εκπομπές ρύπων στη διάρκεια ζωής του θερμομονωτικού και την αντοχή σε προσβολές από μικροοργανισμούς και έντομα.*

Η περιεχόμενη πρωτογενής ενέργεια εκφράζει το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας όγκου ή μάζας θερμομονωτικού υλικού, συνήθως σε μονάδες  $KWh/m^3$  ή  $KWh/Kg$  υλικού. Τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται γενικότερα μια τάση για χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό προτιμώνται υλικά με χαμηλή περιεχόμενη ενέργεια. Σε αυτήν περιλαμβάνεται η ενέργεια για κάθε διεργασία, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι και την τελική τοποθέτηση του υλικού στο κτίριο.

Όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων, πρόκειται για τους επικίνδυνους ρύπους που εκπέμπονται, κυρίως κατά την παραγωγή του θερμομονωτικού υλικού. Κυριότεροι θεωρούνται το CO, που είναι τοξικό και το CO<sub>2</sub> που αποτελεί το βασικότερο αέριο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα θερμομονωτικά υλικά είναι εκτεθειμένα σε έντομα, σκώρο, τρωκτικά και μύκητες. Έτσι, προστίθενται σε αυτά διάφορες χημικές ουσίες με στόχο την προστασία τους από βιολογικούς παράγοντες. Επειδή οι ουσίες αυτές επιβαρύνουν το περιβάλλον συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση τους και να αναζητούνται άλλοι τρόποι αντιμετώπισης επιθέσεων από μικροοργανισμούς.

### 3.4. Συνήθη Θερμομονωτικά Υλικά

#### Υαλοβάμβακας

Ο υαλοβάμβακας ανήκει στην κατηγορία των ινωδών μονωτικών υλικών ορυκτής προέλευσης και η πρώτη του ύλη είναι η φυσική άμμος, στην οποία προστίθενται διάφορα ρευστά συστατικά και ανακυκλωμένα προϊόντα.

Το μείγμα λιώνει στους 1100 °C σε ηλεκτρικό φούρνο και το ρευστό γυαλί πλέον, διοχετεύεται με ταχύτητα σε στρεφόμενο δίσκο με σπές. Εξαιτίας της φυγόκεντρης δύναμης δημιουργούνται λεπτότατες ίνες, που στη συνέχεια με την προσθήκη συνδετικών υλών συνενώνονται, δίνοντας το τελικό προϊόν. Αυτό διαμορφώνεται πλέον σε ρολά (χωρίς ή με επικάλυψη φύλλου αλουμινίου, υαλοϋφάσματος ή ασφαλτικού χαρτιού), πλάκες ή κοχύλια (για μόνωση σωληνώσεων), σε διάφορες διαστάσεις και πυκνότητες (13 - 110 Kg/m<sup>3</sup>) με ποικίλες φυσικές και μηχανικές αντοχές. Ο αέρας που εγκλωβίζεται ανάμεσα στις ίνες είναι υπεύθυνος για τις θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες του υλικού. Όσο μικρότερο είναι το πάχος των ινών και όσο μεγαλύτερο το μήκος τους, τόσο αυξάνεται το κόστος του υλικού αλλά και η θερμική προστασία που προσφέρει.



Εικόνα 4: Διάφορες μορφές υαλοβάμβακα (ρολά, πλάκες και κοχύλια)

Ο υαλοβάμβακας παρουσιάζει καλή συμπεριφορά στην πυρκαγιά καθώς ανήκει στις A1, A2 και B1 κατηγορίες πυραντοχής, είναι άοσμος ενώ μεταφέρεται και τοποθετείται εύκολα. Δε φθείρεται με το πέρασμα του χρόνου, διατηρώντας παράλληλα όλες του τις ιδιότητες και επίσης δεν προσβάλλει τα μέταλλα και προσβάλλεται μόνο από υδροχλωρικό οξύ. Οι ιδιότητές του δεν επηρεάζονται από την ηλιακή ακτινοβολία, δεν προσβάλλεται από έντομα και παράσιτα και η απορρόφηση υγρασίας όταν βρίσκεται σε ελεύθερη κατάσταση είναι μηδενική.

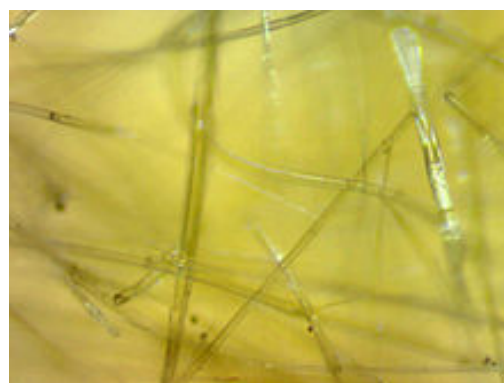
Διαθέτει επίσης ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών από  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η αντοχή στον εφελκυσμό ( $0.005\text{ N/mm}^2$ ) καθώς και το όριο θραύσης ( $0.005 - 0.015\text{ N/mm}^2$ ) κρίνονται ικανοποιητικά. Ωστόσο, εμφανίζει μικρή αντοχή σε συμπίεση και ως εκ τούτου δεν προσφέρεται η χρήση του για δάπεδα και δώματα με ισχυρές φορτίσεις.

## Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας ανήκει στην κατηγορία των ινωδών μονωτικών υλικών. Κύρια συστατικά του είναι ορυκτογενή πετρώματα όπως ο βασάλτης, ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης και ο βωξίτης.

Το μείγμα λιώνει σε ηλεκτρικό φούρνο στους  $1520\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ινοποιείται με περιστροφική κίνηση και οι παραγόμενες ίνες (διαμέτρου μικρότερης από  $4\text{ ή }5\text{ }\mu\text{m}$ ) αποκτούν την συνεκτικότητά τους με προσθήκη συγκολλητικής ρητίνης ανθεκτικής σε υψηλή θερμοκρασία. Η υψηλή υδροαπωθητικότητα επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό των ινών με ειδικές πυριτικές ενώσεις.

Το τελικό προϊόν διατίθεται σε μορφή ρολών, πλακών ή κοχυλιών, σε διάφορες διαστάσεις και πυκνότητες ( $30 - 200\text{ Kg/m}^3$ ), με ή χωρίς επικάλυψη αλουμινίου, ασφαλικής στρώσης, υαλοφάσματος ή μεταλλικού πλέγματος, με ποικίλες φυσικές και μηχανικές αντοχές. Ο πετροβάμβακας έχει θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες, όπως άλλωστε και ο υαλοβάμβακας, υπερτερεί όμως στην αντοχή στη φωτιά (οι ίνες του αντέχουν μέχρι και στους  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στα κτίρια, αντίστοιχο με του υαλοβάμβακα, αλλά και περισσότερες χρήσεις σε βιομηχανικές μονώσεις (λέβητες, πόρτες πυρασφάλειας, αγωγοί εξαερισμού).



Εικόνα 5: (Αριστερά) διάφορες μορφές πετροβάμβακα και (δεξιά) όψη πετροβάμβακα από μικροσκόπιο

Ο πετροβάμβακας εκτός από υψηλή πυκνότητα έχει και ιδιαίτερα καλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που κυμαίνεται από 0.033 έως 0.045  $W/(mK)$ . Η υψηλή θερμομονωτική ικανότητά του όμως επηρεάζεται σημαντικά στην περίπτωση προσβολής του από την υγρασία, έτσι ώστε να κρίνεται αναγκαία η λήψη μέτρων προστασίας από αυτήν είτε με την προσθήκη οργανικών ενώσεων του πυριτίου είτε με την τοποθέτηση επικάλυψης φύλλων αλουμινίου ή γύψου.

Πρόκειται επιπλέον για άκαυστο υλικό, άοσμο, ενώ οι ιδιότητες του δεν επηρεάζονται από την ηλιακή ακτινοβολία. Σε μεγάλες πυκνότητες, έχει υψηλές μηχανικές αντοχές, εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και δε φθείρεται με το πέρασμα του χρόνου, διατηρώντας παράλληλα όλες τις ιδιότητές του και την σταθερότητα των διαστάσεών του. Τέλος, δεν προσβάλλεται από διαλύτες, έντομα και τρωκτικά και δεν προσβάλλει τα μέταλλα. Ο πετροβάμβακας διαθέτει πολύ καλή συμπεριφορά στην πυρκαγιά, καθώς ανήκει στις A1, A2 και B1 κατηγορίες πυραντοχής. Αντίθετα, εμφανίζει μικρή αντοχή στον εφελκυσμό (0.005  $N/mm^2$ ) και χαμηλό όριο θραύσης από 0.00012 έως 0.0075  $N/mm^2$ .

### **Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)**

Ο αφρός πολυστερίνης παράγεται από διόγκωση πολυμερισμένου στυρολίου και αποτελείται από 1.5 έως 2% πολυστερίνη και 98 με 98.5% αέρα, ανάλογα με την πυκνότητα (DIN 18164). Ο αέρας βρίσκεται εγκλωβισμένος μέσα σε μεγάλο αριθμό κυψελίδων. Για την αύξηση της πυραντοχής χρησιμοποιούνται βρωμιούχοι κυκλικό υδρογονάνθρακες. Στο εμπόριο συναντάται σε πλάκες για εφαρμογές σε τοίχους, τοιχία, πλάκες σκυροδέματος και υπόγεια. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής διογκωμένης πολυστερίνης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στα κτίρια ως θερμομόνωση δωματίων, τοίχων και πατωμάτων.

Η διογκωμένη πολυστερίνη διαθέτει ικανοποιητική θερμομονωτική ικανότητα (0.029 - 0.041  $W/(mK)$ ). Ωστόσο απαιτείται προσοχή κατά την παραγωγή της, διότι αν σχηματιστούν κενά που δε διαμορφώνουν κλειστούς πόρους, είναι δυνατό να εισχωρήσει νερό και να αυξηθεί σημαντικά ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Γενικότερα πάντως, η διογκωμένη πολυστερίνη παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάχυση υδρατμών και στην απορρόφηση υγρασίας. Επιπρόσθετα, διαθέτει καλές ιδιότητες όσον αφορά στην αντοχή στον εφελκυσμό και στη συμπίεση.



**Εικόνα 6: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης σε διάφορα πάχη**

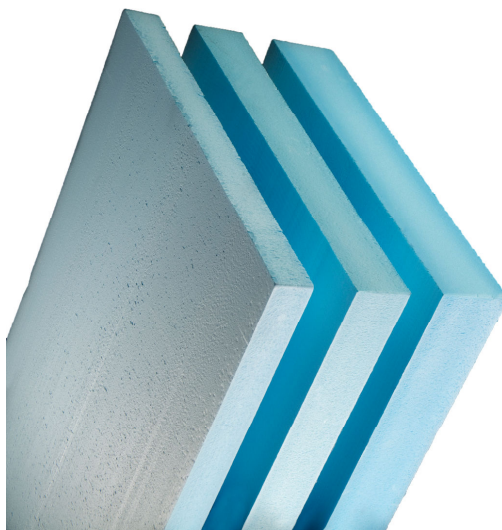
Το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης της, είναι μικρότερο από αυτό του υαλοβάμβακα και του πετροβάμβακα, καθώς κυμαίνεται από  $-70$  έως  $90$  °C. Η διογκωμένη πολυστερίνη ανήκει στα εύφλεκτα υλικά και κατατάσσεται στις κατηγορίες πυραντοχής B1 και B2. Ακόμη προσβάλλεται από έντομα, τρωκτικά και χημικούς διαλύτες (κετόνες, βενζόλιο, βενζίνη κ.ά.) ενώ είναι ευαίσθητη στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς σε εκτεταμένης διάρκειας έκθεση στον ήλιο μεταβάλλει το χρώμα της σε ελαφρώς κιτρινωπό και έπειτα σκληραίνεται και θρυμματίζεται. Ιδιαίτερο πλεονέκτημα της διογκωμένης πολυστερίνης αποτελεί η ευκολία τοποθέτησής της.

### **Αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)**

Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη, συγγενές θερμομονωτικό υλικό της διογκωμένης πολυστερίνης, έχει όμοια σύσταση με αυτήν, αλλά διαφορετική μέθοδο επεξεργασίας. Για την παραγωγή αφρώδους εξηλασμένης πολυστερίνης χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη η πολυστερίνη, το διοξείδιο του άνθρακα ως προωθητικό αέριο σε ποσοστό από 3 έως 7%, στοιχείο για την αύξηση της πυραντοχής σε ποσοστό από 1 έως 6% και ως βοηθητικές ύλες το ταλκ και χρωστικές ουσίες που δίνουν το χαρακτηριστικό για κάθε εταιρία χρώμα στο τελικό προϊόν.

Παράγεται σε μορφή πλακών, διαφορετικής πυκνότητας ανάλογα την εφαρμογή, με επίπεδη ή ανάγλυφη επιφάνεια. Ακόμη παράγονται πλάκες με επικάλυψη τσιμεντοκονίας ή ψηφίδας, στη μία τους πλευρά, για χρήση στις κατασκευές όπως στο αντεστραμμένο δώμα. Η αφρώδης εξηλασμένη πολυστερίνη διαθέτει καλές θερμομονωτικές ιδιότητες με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που κυμαίνεται από  $0.025$  έως  $0.035$   $W/(mK)$ . Η τιμή του συντελεστή αυτού οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θερμική αγωγιμότητα του μείγματος αέρα και αερίων που κατέχουν περίπου το 95% του όγκου του υλικού. Ωστόσο, σημειώνεται ότι οι

παραπάνω τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αποτελούν τις τιμές κατά τη χρήση της εξηλασμένης πολυστερίνης. Στην πραγματικότητα κατά την παραγωγή της ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι μικρότερος αλλά σταδιακά αυξάνεται.



**Εικόνα 7: Πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης σε διάφορα πάχη**

Ο τρόπος παραγωγής της εξηλασμένης πολυστερίνης, δηλαδή η κατεργασία της εξέλασης, είναι υπεύθυνη για τη μεγάλη αντοχή της στον εφελκυσμό (0.3 έως 0.35 N/mm<sup>2</sup>) και στη συμπίεση, στην αυξημένη αντίσταση στη διάχυση υδρατμών και στην απορρόφηση νερού. Το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης της είναι σχετικά περιορισμένο, καθώς το κατώτερο κυμαίνεται στους -60 °C και το ανώτερο όριο ανέρχεται στους 75 °C. Η εξηλασμένη πολυστερίνη έχει όμοια συμπεριφορά με την διογκωμένη πολυστερίνη σε ότι αφορά την προσβολή της από έντομα και τρωκτικά και την ευαισθησία της σε διαλύτες και στην ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποχρωματίζει την επιφάνεια της και καθιστά τις κυψέλες της εύθραυστες.

Παρά τη χρήση επιβραδυντών καύσης με τον εμπλουτισμό της εξηλασμένης πολυστερίνης με στοιχεία αύξησης της πυραντοχής σε ποσοστό από 1 έως 6% κατά τη διαδικασία παραγωγής της, η ίδια παραμένει εύφλεκτο υλικό και κατατάσσεται στις B1 και B2 κατηγορίες πυραντοχής.

### **Πολυουρεθάνη (PUR)**

Ο αφρός πολυουρεθάνης είναι σκληροποιημένος αφρός, του οποίου οι πόροι σε ποσοστό τουλάχιστον 90% είναι κλειστοί και παρασκευάζεται με την βοήθεια καταλυτών και προωθητικών μέσων, μέσω της χημικής αντίδρασης των πολυϊσοκυανικών ενώσεων με συνδετικό μέσο πολυολένιο ή με διάσπαση των πολυϊσοκυανικών ενώσεων.

Αυτή η μορφή αφρού χρησιμοποιείται για την επικάλυψη των καθαρών από ξένες ουσίες επιφανειών στο εργοτάξιο με επί τόπου ψεκασμό και ιδιαίτερα κυλινδρικών, σφαιρικών και καμπύλων επιφανειών. Εναλλακτικά διατίθενται στο εμπόριο σκληρές πλάκες και μορφοποιημένα κομμάτια από αφρό, πλάκες με επιφανειακή επίστρωση αδιαβροχοποιημένου χαρτιού, πολλαπλών στρωμάτων ή φύλλων αλουμινίου. Αυτές παράγονται και σχηματοποιούνται από τον αφρό πολυουρεθάνης στο εργοστάσιο και οι πλάκες έρχονται έτοιμες για τοποθέτηση στο εργοτάξιο. Μία τρίτη μορφή χρήσης του αφρού πολυουρεθάνης είναι και τα ειδικά μορφοποιημένα κοχύλια που βρίσκουν εφαρμογή στη μόνωση σωληνώσεων.



**Εικόνα 8: Ψεκασμός αφρού πολυουρεθάνης**

Ο αφρός πολυουρεθάνης αποτελεί το θερμομονωτικό υλικό με το μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας,  $0.02 \text{ W}/(\text{mK})$ . Ωστόσο, με την από το 1995 απαγόρευση της χρήσης FCKW ως προωθητικού μέσου και με την αντικατάσταση του από το πεντάνιο, αυξήθηκε η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και ως σήμερα ο αφρός πολυουρεθάνης δεν κατάφερε ακόμη να φτάσει την παραπάνω ελάχιστη τιμή.

Όσον αφορά στην αντοχή σε εφελκυσμό, αντέχει σε αναπτυσσόμενες τάσεις που κυμαίνονται από 20 έως 30  $\text{N}/\text{cm}^2$ , συντελεστή αντίστασης στη διάχυση υδρατμών από 50 έως και πάνω από 100 και παρουσιάζει εξαιρετικά μικρή απορρόφηση υγρασίας. Ουσιαστικά δηλαδή πρόκειται για ένα αδιάβροχο υλικό, λόγω της κλειστής δομής των κυψελίδων του.

Το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης είναι σχετικά περιορισμένο, αν συγκριθεί με αυτό του υαλοβάμβακα και του πετροβάμβακα με κατώτερο όριο τους  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  και ανώτερο τους  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ο αφρός πολυουρεθάνης δεν παρέχει ικανοποιητική προστασία αν και κατά την παραγωγή του προστίθενται μέσα αύξησης της πυραντοχής και κατατάσσεται στις B1 και B2 κατηγορίες πυραντοχής. Για την εκπλήρωση των όρων πυρασφαλείας στις εφαρμογές στα κτίρια, ο αφρός μπορεί να



περιέχει και άλλα μέσα αύξησης της πυραντοχής. Σημειώνεται ότι κατά την καύση του παράγει σε μικρές ποσότητες τοξικά αέρια.

Ο αφρός πολυουρεθάνης επηρεάζεται αν μείνει εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς οι επιφανειακές κυψέλες αδυνατίζουν και το υλικό θρυμματίζεται. Διαθέτει ιδιαίτερα καλές συγκολλητικές ιδιότητες, αφού προσκολλάται στα περισσότερα οικοδομικά υλικά, γι' αυτό και συχνά παρασκευάζεται επιτόπου στα έργα με εκτόξευση με ψεκασμό.

### **Αφρώδες γυαλί**

Πρόκειται για ένα άκαυστο υλικό υψηλών προδιαγραφών, ορυκτής προέλευσης και κυψελωτή δομή, που χρησιμοποιείται σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα βασικά συστατικά του αφρώδους γυαλιού είναι φυσικά όπως άμμος, δολομίτης και ανθρακικό νάτριο. Παρασκευάζεται με επεξεργασία διογκωτικού μέσου σε δύο τύπους, με μορφή ανοικτών ή κλειστών πόρων και είναι ανθεκτικό στη σήψη, στα παράσιτα και σε οργανικά διαλυτικά, οξέα και ασθενή αλκαλικά.

Οι πλάκες αφρώδους γυαλιού ( $\lambda : 0.04 - 0.06 W/(mK)$ ) μπορούν να τοποθετηθούν σε όλες τις περιοχές της κτιριακής κατασκευής όπου απαιτείται θερμομόνωση. Είναι εξαιρετικά κατάλληλες για τη μόνωση περιοχών του κτιρίου που έχουν επαφή με υγρασία ή με το έδαφος, όπως τα υπόγεια. Είναι επίσης κατάλληλες για τη θερμομόνωση φυτεμένων στεγών, κάτω από το χώμα, αρκεί να εξασφαλίζεται αερισμός της στέγης. Τρίμματα αφρώδους γυαλιού ( $\lambda : 0.09 W/(mK)$ ) τοποθετούνται στο διάκενο δικέλυφων τοιχοποιιών και σε άλλα δομικά διάκενα. Σε υγρές περιοχές απαιτείται η υγρομονωτική τους προστασία.



**Εικόνα 9: Πλάκες αφρώδους γυαλιού**

## Αφρώδης διογκωμένος φελλός

Ο διογκωμένος φελλός ανήκει στα οργανικά αφρώδη θερμομονωτικά υλικά. Η παραγωγή του γίνεται με τη βοήθεια της θερμότητας, του εγκλωβισμένου νερού και ρητίνης, χωρίς την προσθήκη προωθητικού μέσου. Για την κατασκευή των πλακών φελλού από κυψελίδες φελλού χρειάζονται ασφαλικά πρόσθετα. Συναντάται στο εμπόριο με τη μορφή πλακών και κοχυλιών. Παρουσιάζει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ 0.04 και 0.065  $W/(mK)$ , ενώ ενδείκνυται για ηχομόνωση καθώς διαθέτει καλές ηχομονωτικές ιδιότητες.



Εικόνα 10: Πλάκες φελλού σε διάφορα πάχη

## Ξυλόμαλλο

Το ξυλόμαλλο ανήκει στην κατηγορία των σύνθετων θερμομονωτικών υλικών και αποτελείται από ξυλώδεις ίνες ή ακόμη και καλάμια, φύκια και άλλα λεπτά οργανικά υλικά και συγκολλητική ύλη τσιμέντο ή καυστική μαγνησία.

Παρουσιάζει, συγκρινόμενο με άλλα θερμομονωτικά υλικά, σχετικά υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας με συντελεστή  $\lambda$ , 0.07 – 0.09  $W/(mK)$  δηλαδή απαιτεί αύξηση του πάχους της θερμομονωτικής στρώσης. Το μειονέκτημα αυτό εξισορροπείται από άλλα πλεονεκτήματα που προσφέρει, όπως σταθερότητα των πλακών του, εξαιρετική πρόσφυση στο οπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς πρόσθετη στήριξη, καθώς και εξίσου καλή πρόσφυση του επιχρίσματος πάνω στην επιφάνειά του. Το ξυλόμαλλο παρουσιάζει μικρή αντίσταση στη διάχυση υδρατμών αλλά και μικρή ταχύτητα προσρόφησης υδρατμών. Έτσι η υγρασία δε διεισδύει γρήγορα στη μάζα του και στεγνώνει εύκολα, χωρίς να συγκρατεί υγρασία. Τρεις κατηγορίες προϊόντων κυκλοφορούν στο εμπόριο:

- Ελαφρές πλάκες από ξυλόμαλλο: Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται μεγάλες ίνες ξυλόμαλλου από μη επεξεργασμένο ξύλο και είτε τσιμέντο είτε καυστικό οξείδιο του μαγνησίου.
- Σύνθετες πλάκες από ξυλόμαλλο και διογκωμένη πολυστερίνη: Οι ελαφρές προκατασκευασμένες πολυστρωματικές πλάκες από πολυστερίνη περιβάλλονται με επένδυση από τη μία ή και από τις δύο πλευρές με λεπτές πλάκες ξυλόμαλλου.
- Σύνθετες πλάκες από ξυλόμαλλο και πετροβάμβακα: Οι ελαφρές προκατασκευασμένες πολυστρωματικές πλάκες από ορυκτές ίνες αποτελούνται από ένα στρώμα μονωτικού ορυκτοβάμβακα και δύο επιφάνειες από ορυκτό συνδετικό ξυλόμαλλο που το περιβάλλουν.



**Εικόνα 11: Εξωτερική μόνωση σκελετού οπλισμένου σκυροδέματος με πλάκες ξυλόμαλλου**

Οι πλάκες με ορυκτοβάμβακα, παρουσιάζουν, σε περίπτωση μόνιμης έκθεσης σε βροχή, πρόβλημα συγκράτησης υγρασίας στο εσωτερικό τους, που οδηγεί στη σήψη τους. Οι πλάκες πολυστερίνης αναιρούν τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του ξυλόμαλλου, επειδή εκπέμπουν μονομερές στυρόλιο και αποκόπτουν την αναπνοή των δομικών στοιχείων που περιβάλλουν.

**Πίνακας 3: Κυριότερες ιδιότητες συνηθέστερων θερμομονωτικών υλικών**

	Αφρώδη οργανικά			Ινώδη ανόργανα		Σύνθετα
	Διογκωμένη Πολυστερίνη	Εξηλασμένη Πολυστερίνη	Πολύ-ουρεθάνη	Πετρο-βάμβακας	Υαλο-βάμβακας	Ξυλόμαλλο
Συντελ. θερμικής αγωγιμότητας [W/(mK)]	0.029 - 0.041	0.025 - 0.035	0.020 - 0.040	0.033 - 0.045	0.030 - 0.045	0.070 - 0.090
Κατηγορία Πυραντοχής κατά DIN 4102	B2-B1	B2-B1	B2-B1	B1-A2-A1	B1-A2-A1	B1
Αντοχή σε συμπίεση [KPa]	Μέχρι 250	Μέχρι 500	Μέχρι 500	Μέχρι 250	Μέχρι 200	Μέχρι 500
Υδατοαπορρόφηση	Μέχρι 3%	Μέχρι 3%	Μέχρι 3%	Μέχρι 3 Kg/m <sup>3</sup>	Μέχρι 5 Kg/m <sup>3</sup>	
Θερμοκρασίες εφαρμογής [°C]	-70 έως 90	-60 έως 75	-50 έως 120	-100 έως 1000	-100 έως 500	-50 έως 250
Συντελ. αντίστασης στη διάχυση υδρατμών	25-200	80-200	50-100	1	1	5 - 10

## Περλίτης

Πρόκειται για μία ευρύτερη οικογένεια διογκωμένων ανόργανων πορωδών υλικών, γνωστότερο των οποίων είναι ο περλίτης. Τα διογκωμένα πορώδη υλικά αποτελούνται από τον περλίτη, το οξειδίο του πυριτίου και το διογκωμένο φυσικό γυαλί (ηφαιστειακής προέλευσης) ή από διογκωμένο γυαλί, το οποίο προέρχεται από καθαρό χωρίς άλλες προσθήκες γυαλί.

**Εικόνα 12: Πλάκες και κοχύλια περλίτη για εφαρμογές θερμομόνωσης**

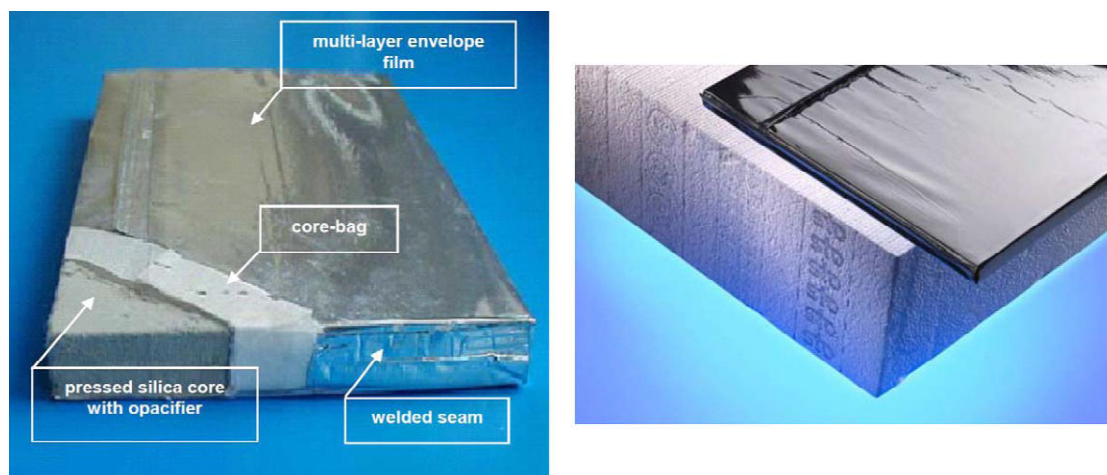
Τα διογκωμένα πορώδη υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως στη θερμομόνωση κτιρίων, στη θερμομόνωση δωματίων και στην εξασφάλιση των κλίσεών τους, στην ηχοπροστασία από κτυπογενείς ήχους δαπέδων και σε περιπτώσεις θερμομόνωσης και εξοικονόμησης βάρους στα επιχρίσματα των οικοδομών.

### 3.5. Εξελιγμένα Θερμομονωτικά Υλικά

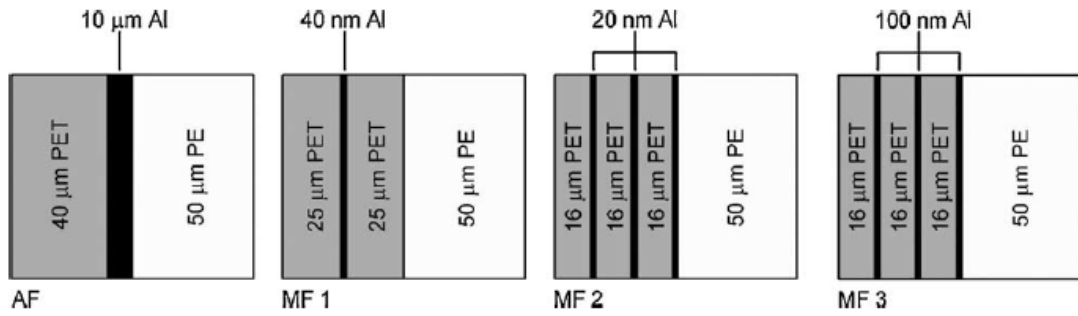
Η έρευνα στον τομέα της θερμομόνωσης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων υλικών, πιο αποδοτικών σε σχέση με τα παραδοσιακά θερμομονωτικά υλικά και με βελτιωμένες ιδιότητες. Στο σημείο αυτό ακολουθεί η περιγραφή των πιο σύγχρονων θερμομονωτικών υλικών, τα οποία παρουσιάζουν και τη μικρότερη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται για θερμομόνωση στις κατασκευές.

#### Vacuum Insulation Panel (VIP)

Το Vacuum insulation panel αποτελείται από έναν πορώδη πυρήνα πυρογενούς πυριτίου (από τον οποίο έχει αφαιρεθεί ο αέρας), περικλειόμενο από πολλαπλά στρώματα επιμεταλλωμένου πολυμερούς (Εικ. 13, 14). Τα VIP είναι αντιπροσωπευτικά των σύγχρονων υλικών θερμομόνωσης. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γι' αυτά κυμαίνεται από 3 - 4  $mW/(mK)$  για τα πρώτα έτη χρήσης τους ενώ φτάνει μετά από γήρανση 25 ετών τα 8  $mW/(mK)$ . Η διαφορά αυτή που παρατηρείται οφείλεται στους υδρατμούς και στη διείδυση του αέρα στον πορώδη πυρήνα διαμέσου των εξωτερικών στρωμάτων [Baetens et al., 2010a].

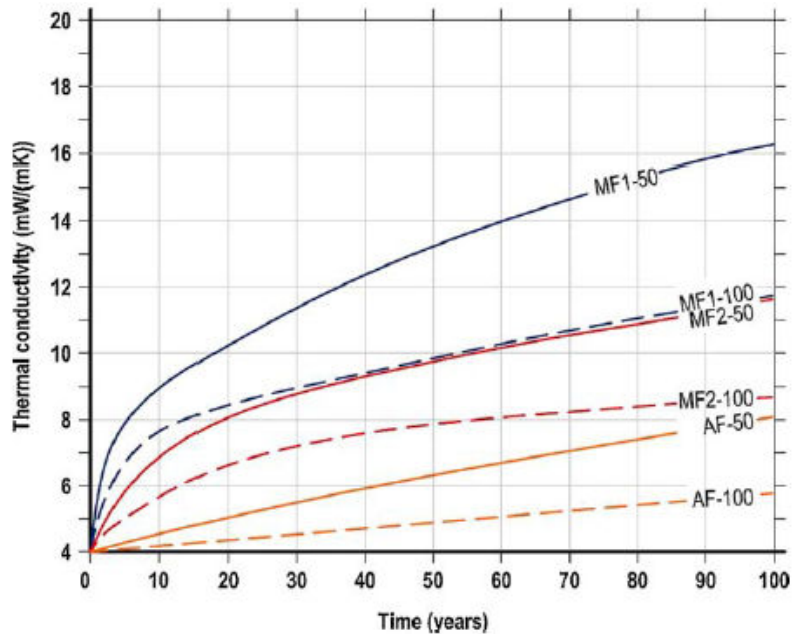


Εικόνα 13: (Αριστερά) τυπική δομή VIP με τα επιμέρους μέρη του και (δεξιά) σύγκριση πάχους VIP και εξηλασμένης πολυστερίνης XPS με ισοδύναμη θερμική αντίσταση [Jelle, 2011]



Εικόνα 14: Τέσσερις διαφορετικοί τύποι εξωτερικού περιβλήματος VIP σε τομή. Διακρίνονται για κάθε έναν συμβολισμός και σύσταση

Συναντώνται διάφοροι τύποι ως προς τη δομή του εξωτερικού περιβλήματος των VIP, μερικοί από αυτούς διακρίνονται στην Εικ. 14. Για κάθε τύπο, η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των VIP μεταβάλλεται διαφορετικά με το χρόνο (Εικ. 15). Η αναπόφευκτη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για τα VIP. Αναφέρεται μάλιστα ότι τρύπημα στο περίβλημα των VIP, το οποίο θα μπορούσε να προκληθεί από καρφή ή κάτι άλλο παρεμφερές, προκαλεί αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού περίπου στα  $20 \text{ mW}/(\text{mK})$ . Προκύπτει έτσι το συμπέρασμα πως τα VIP δεν είναι δυνατό να κοπούν για να προσαρμοστούν ή να τρυπηθούν, χωρίς να χαθεί ένα μεγάλο μέρος της θερμομονωτικής τους απόδοσης. Το γεγονός αυτό αποτελεί ακόμη ένα σημαντικό μειονέκτημα τους.



Εικόνα 15: Θερμική αγωγιμότητα συναρτήσει των ετών για δύο διαφορετικού μεγέθους πάνελ VIP (50 cm x 50 cm x 1 cm, 100 cm x 100 cm x 2 cm) και τρεις τύπους εξωτερικού περιβλήματος (AF, MF1, MF2)

Παρόλα τα μεγάλα μειονεκτήματα των VIP συμπεριλαμβανομένου και του σχετικά υψηλού τους κόστους, συνιστούν ένα σημαντικό κεφάλαιο όσον αφορά τη

θερμομόνωση κτιρίων. Παρουσιάζουν θερμική αγωγιμότητα, ανάλογα με το χρόνο γήρανσης, με τιμές 5 έως 10 φορές μικρότερες από τις τιμές ορισμένων παραδοσιακών θερμομονωτικών υλικών (πετροβάμβακας, προϊόντα πολυστερένιου). Επιπλέον με τη χρήση των VIP εξοικονομείται διαθέσιμος χώρος στα κτίρια αφού το πάχος μονωτικού υλικού που απαιτείται είναι σημαντικά μικρότερο. Η έρευνα σε σχέση με τα VIP έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη εξωτερικών περιβλημάτων που να αποτρέπουν την είσοδο αέρα και υδρατμών στον πυρήνα, για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

### **Gas-Filled Panel (GFP)**

Τα πάνελ με πλήρωση αερίου ή αλλιώς GFP έχουν παρόμοια τεχνολογία με αυτή των VIP. Τα GFP (Εικ. 16) περιέχουν αέριο, θερμικά λιγότερο αγωγίμο από τον αέρα, όπως για παράδειγμα αργό, κρυπτό ή ξένο αντί του κενού που χρησιμοποιείται στα VIP. Η διατήρηση της συγκέντρωσης του αερίου χαμηλής αγωγιμότητας στο εσωτερικό των GFP, καθώς και η αποφυγή διείσδυσης αέρα και υγρασίας μέσα σε αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση των πάνελ αυτών [Baetens et al., 2010b].

Το κενό είναι καλύτερο θερμομονωτικό υλικό σε σχέση με τα διάφορα αέρια τα οποία χρησιμοποιούνται στα GFP. Από την άλλη πλευρά στα GFP δεν απαιτείται η διατήρηση του εσωτερικού κενού όπως συμβαίνει στα VIP. Επιφάνειες χαμηλής εκπομπής στο εσωτερικό των GFP μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Αν και οι αρχικές τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα των GFP υπολογίζονταν αρκετά υψηλές περίπου  $40 \text{ mW}/(\text{mK})$ , στη συνέχεια μετρήθηκαν πολύ χαμηλότερες θεωρητικές τιμές. Συνοψίζοντας, τα GFP διατηρούν αρκετά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των VIP. Όμως το μέλλον των GFP ως θερμομονωτικά υλικά σε κτιριακές εφαρμογές παραμένει αμφίβολο, σε σύγκριση με τα VIP που αποτελούν καλύτερη επιλογή.



Εικόνα 16: Δομή ενός GFP [Jelle, 2011]

## Aerogel

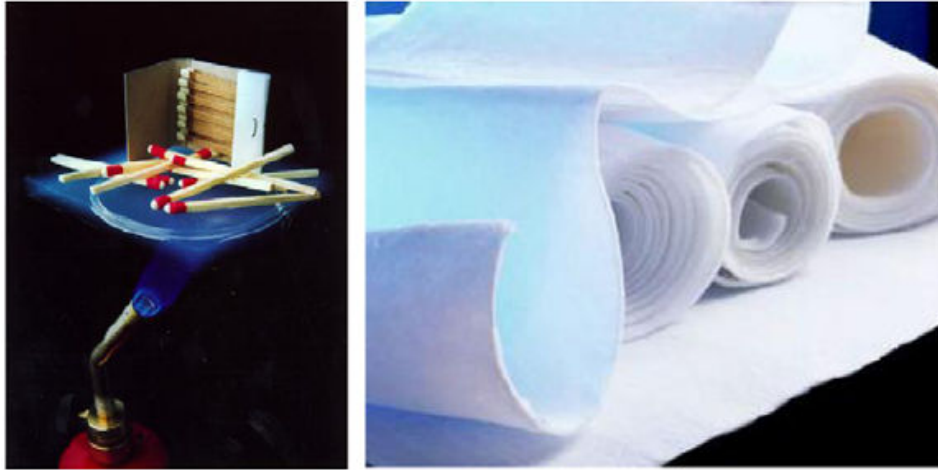
Η πιο διαδεδομένη μορφή είναι το silica aerogel, που φτιάχνεται από διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Το διοξείδιο του πυριτίου μετατρέπεται σε gel με την προσθήκη νερού και στη συνέχεια υπόκειται σε υπερκριτική ξήρανση. Κατά το στάδιο αυτό, θερμαίνεται σε ειδικό αντιδραστήρα στους  $241\text{ }^\circ\text{C}$ , υπό πίεση  $63\text{ atm}$ , με αποτέλεσμα τα υγρά συστατικά του να αντικαθίστανται από αέρα, δημιουργώντας την παράξενη χαρακτηριστική δομή. Σημειώνεται πως αν αποξηρανθεί με οποιοδήποτε άλλο τρόπο, τότε η δομή του καταστρέφεται.

Παρά την εύθραυστη όψη τους, τα aerogel (Εικ. 17) με βάση το πυρίτιο και τον άνθρακα αντέχουν σε φορτία χιλιάδες φορές μεγαλύτερα από το βάρος τους, σε θερμοκρασίες ανώτερες των  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  και σε εκρήξεις ως και ενός κιλού δυναμική. Επίσης απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή οικοδομικών υλικών τα οποία αφήνουν να περνά το φως του ήλιου αλλά παγιδεύουν τη θερμότητά του και τη χρησιμοποιούν για τη θέρμανση του κτιρίου.

Έτσι τα aerogel αποτελούν ακόμα μία σύγχρονη λύση όσον αφορά τα υλικά θερμομόνωσης και ίσως την πιο υποσχόμενη μεταξύ όλων των υφιστάμενων τεχνολογιών [Baetens et al., 2011]. Με τη χρήση μαύρου άνθρακα ώστε να περιοριστεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας μπορούν να μειωθούν στα  $4\text{ mW}/(\text{mK})$  σε πίεση  $50\text{ mbar}$ . Ωστόσο, για τα aerogel που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο έχει παρατηρηθεί θερμική αγωγιμότητα μεταξύ  $13$  και  $14\text{ mW}/(\text{mK})$  σε πίεση περιβάλλοντος.

Το κόστος παραγωγής των aerogel είναι ακόμη πολύ υψηλό. Παρουσιάζουν σχετικά υψηλή αντοχή σε συμπίεση, αλλά είναι πολύ εύθραυστα εξαιτίας της χαμηλής τους αντοχής σε εφελκυσμό. Η αντοχή σε εφελκυσμό θα μπορούσε να αυξηθεί με την ενσωμάτωση μήτρας ινών άνθρακα. Τέλος μια πολύ ενδιαφέρουσα πτυχή των aerogel είναι η δυνατότητά τους να παραχθούν είτε ως αδιαφανή, ημιδιαφανή ή διαφανή υλικά ώστε να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.





Εικόνα 17: (Αριστερά) σπίρτα πάνω από aerogel τα οποία προστατεύονται από τη φλόγα που βρίσκεται από κάτω και (δεξιά) aerogel ως θερμομονωτικό υλικό υψηλής απόδοσης

### **3.6. Σύγκριση μεταξύ Παραδοσιακών και Σύγχρονων Θερμομονωτικών Υλικών**

Τα παραδοσιακά θερμομονωτικά υλικά πλεονεκτούν σε ζητήματα ευελιξίας. Ενδεικτικά αναφέρεται η δυνατότητα που παρέχουν για επιτόπου προσαρμογή στο χώρο της κατασκευής κατά την τοποθέτηση, ενώ είναι και ανθεκτικότερα στη διάτρηση. Ωστόσο μειονέκτημά τους αποτελούν οι σχετικά υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν. Έτσι απαιτείται μόνωση κτιρίων, υπερβολικά μεγάλου πάχους ιδιαίτερα σε ψυχρά κλίματα.

Επιπλέον στα παραδοσιακά θερμομονωτικά υλικά η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της υγρασίας συνεπώς είναι ευπαθέστερα στην πρόσληψη υγρασίας. Για τα περισσότερα παραδοσιακά υλικά θερμομόνωσης, όπως είδαμε, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνονται από  $30 - 40 \text{ mW}/(\text{mK})$ . Από όλα τη χαμηλότερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας παρουσιάζει η πολυουρεθάνη (PUR) με τιμές της τάξης των  $20 \text{ mW}/(\text{mK})$ . Ωστόσο σε περίπτωση πυρκαγιάς, η εκπομπή τοξικού αερίου που εκλύεται κατά την καύση της ελλοχεύει σοβαρούς κινδύνους για την υγεία.

Όπως αναφέρθηκε δύο από τα πιο υποσχόμενα σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά είναι τα VIP και τα aerogel. Αυτά παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Το μέλλον των GFP θεωρείται αμφίβολο σε σύγκριση με τα VIP. Αυτό συμβαίνει επειδή τα VIP φαίνεται να συνιστούν καλύτερη επιλογή, αν αναλογιστεί κανείς ότι εμφανίζουν χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας ενώ παράλληλα είναι και ανθεκτικότερα [Jelle, 2011].

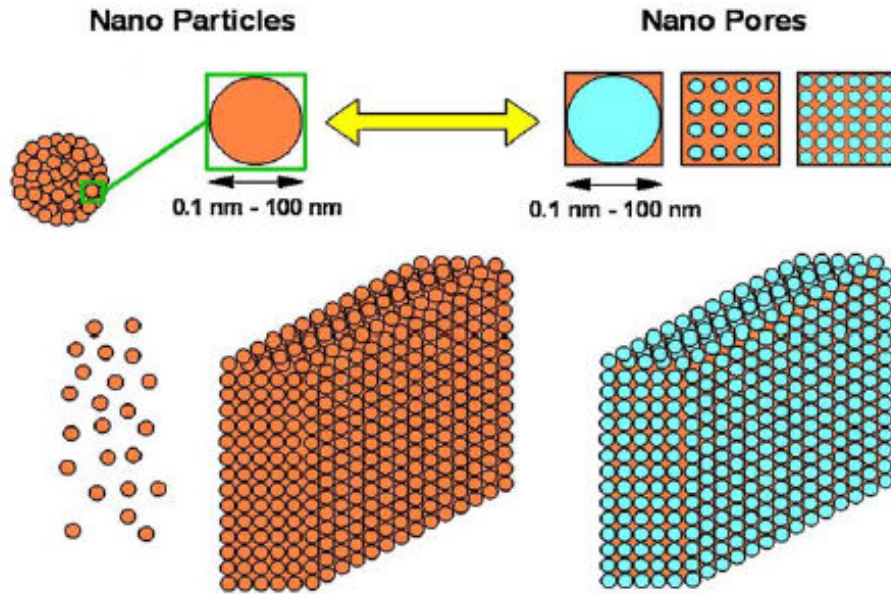
Συγκρίνοντας μεταξύ τους όλα τα θερμομονωτικά υλικά, στα VIP που δεν έχουν υποστεί φθορά λόγω γήρανσης, συναντάται η χαμηλότερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας, περίπου  $4 \text{ mW}/(\text{mK})$ , ενώ για τα aerogel η αντίστοιχη τιμή είναι  $13 \text{ mW}/(\text{mK})$ . Σημειώνεται ωστόσο ότι η θερμική αγωγιμότητα των VIP αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της υγρασίας και της διείσδυσης του αέρα με διάχυση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τιμής της τάξης των  $20 \text{ mW}/(\text{mK})$  για την κατάσταση μη κενού. Η θερμική αγωγιμότητα των aerogel από την άλλη πλευρά δεν θεωρείται ότι αυξάνεται σημαντικά με το χρόνο και ούτε επηρεάζεται από τυχόν διατρήσεις.

Τόσο τα VIP όσο και τα aerogel είναι πολύ δαπανηρά, αλλά έχει αποδειχθεί ότι τα VIP μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικά, ενώ τα aerogel με τη διάφανη ή ημιδιάφανη τους μορφή είναι δυνατό να καλύψουν εφαρμογές που μπορούν να δικαιολογήσουν υψηλότερα κόστη.

### ***3.7. Η Έρευνα στον τομέα της Θερμομόνωσης***

Η μελλοντική έρευνα στον τομέα της θερμομόνωσης διεξάγεται προς δύο κατευθύνσεις. Αφενός για τη βελτίωση των ήδη υφιστάμενων θερμομονωτικών υλικών και αφετέρου για να διερευνηθούν οι δυνατότητες ανακάλυψης και ανάπτυξης νέων υψηλής απόδοσης θερμομονωτικών υλικών και λύσεων με καλύτερες ιδιότητες από τις υπάρχουσες. Στο τελευταίο αποφασιστικά μπορεί να συμβάλλει η νανοτεχνολογία.

Η νανοτεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί ως επιστημονικό εργαλείο για την παραγωγή υψηλής απόδοσης θερμομονωτικών υλικών. Σκοπός της είναι να ελεγχθεί το όλο θέμα σε ατομικό και μοριακό επίπεδο, και τυπικά σωματίδια διαστάσεων μεταξύ 0.1 και 100 nm. Για την έρευνα που εφαρμόζεται στον τομέα της θερμομόνωσης, όπως οπτικοποιείται και στο ακόλουθο σχήμα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται από τα σωματίδια σε πόρους κλίμακας νάνο.



Εικόνα 18: Εφαρμογή της νανοτεχνολογίας σε θερμομονωτικά υλικά υψηλής απόδοσης

# 4

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε η μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα υλικό πραγματοποιείται με τη σύγχρονη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας ωστόσο αναφέρεται μόνο στην περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συνεπώς οι συνθήκες κάθε πειραματικής διάταξης πρέπει να συμφωνούν με την απαίτηση αυτή. Μάλιστα για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στερεών υλικών τόσο η επίδραση της συναγωγής όσο και η επίδραση της ακτινοβολίας θεωρούνται πρακτικά αμελητέες.

Οι τεχνικές μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας βασίζονται στη μετάδοση ενός γνωστού ποσού θερμότητας από μια θερμαινόμενη πηγή στο υπό μελέτη υλικό. Ο τρόπος με τον οποίο η θερμότητα μεταδίδεται στο υλικό είναι χαρακτηριστικός της θερμικής αγωγιμότητάς του.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας ποικίλουν ως προς την πολυπλοκότητα εφαρμογής τους και το διαφορετικό βαθμό ακρίβειας πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις μεθόδους μόνιμης κατάστασης (Steady-State Methods) και στις μεθόδους μη-μόνιμης κατάστασης (Transient Methods).

### ***4.1. Μέθοδοι Μόνιμης Κατάστασης***

Οι μέθοδοι μόνιμης κατάστασης αποτελούν κατεξοχήν μεθόδους μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας και κύριο γνώρισμά τους είναι ότι η χαρακτηριστική θερμοκρασιακή διαφορά, με την οποία σχετίζεται η θερμική αγωγιμότητα (Εξίσ. 2.2), παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο.

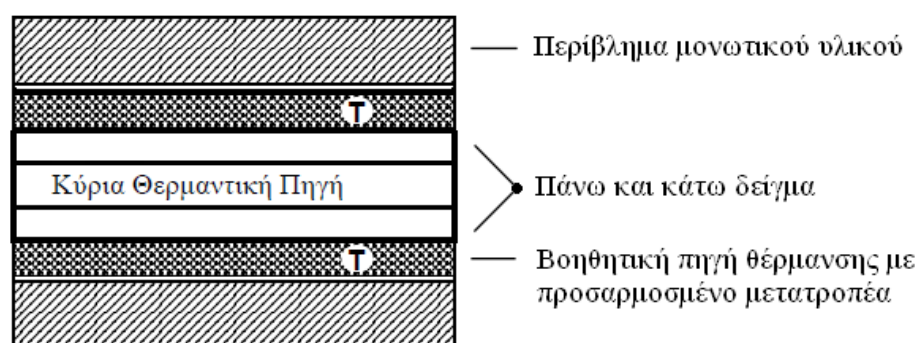
Μεταξύ των διάφορων μεθόδων μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας, μόνιμης κατάστασης, πλέον εφαρμόσιμες τεχνικές αποτελούν η τεχνική της θερμαινόμενης επιφάνειας (Guarded Hot Plate) καθώς και η θερμιδομετρική μέθοδος (Calorimeter

Method). Αυτές οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται από υψηλής ακρίβειας πειραματικά αποτελέσματα απαιτούν όμως μεγάλους πειραματικούς χρόνους δειγματοληψίας, καθώς και δοκίμια μεγάλων διαστάσεων.

#### 4.1.1. Μέθοδος της Θερμαινόμενης Επιφάνειας (Guarded Hot Plate Method)

Η μέθοδος της Θερμαινόμενης Επιφάνειας βασίζεται στη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας, κάτω από συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Συνηθέστερα, γίνεται χρήση δύο όμοιων δοκιμίων, τα οποία υποβάλλονται σε θέρμανση, κάτω από την επίδραση θερμαντικής πηγής, που παρεμβάλλεται ανάμεσα τους.

Σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM C177 τα δύο δοκίμια του υπό εξέταση υλικού τοποθετούνται εκατέρωθεν, της κύριας θερμαντικής πηγής, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση σταθερού ποσού θερμότητας. Βοηθητικές πηγές πλαισιώνουν τα δύο δοκίμια, με στόχο τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους, ανεξάρτητα από το θερμοκρασιακό προφίλ, που επικρατεί σε αυτά, εξαιτίας της επίδρασης της κύριας θερμαντικής πηγής. Επίσης, κατάλληλα ρυθμισμένος μετατροπέας, βρίσκεται τοποθετημένος στις δύο περιφερειακές πηγές θέρμανσης για τη μέτρηση της επίδρασης της ροής θερμότητας μέσα από τα δύο δοκίμια του υπό εξέταση υλικού. Τέλος, κατάλληλο μονωτικό περίβλημα, δρα προστατευτικά και βρίσκεται τοποθετημένο περιμετρικά της διάταξης, ενώ μια σειρά θερμοστοιχείων χρησιμοποιείται για την καταγραφή και τον έλεγχο των θερμοκρασιών, κατά την επίτευξη της μόνιμης κατάστασης [Sheffield and Schorr, 1991].



Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα συσκευής θερμαινόμενης επιφάνειας σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C177

Για την παραπάνω γεωμετρία, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ( $Q/A$ ) μπορεί να υπολογισθεί από την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\left(\frac{Q}{A}\right) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_{\substack{\text{επάνω} \\ \text{δείγμα}}} + \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)_{\substack{\text{κάτω} \\ \text{δείγμα}}} \quad (4.1)$$

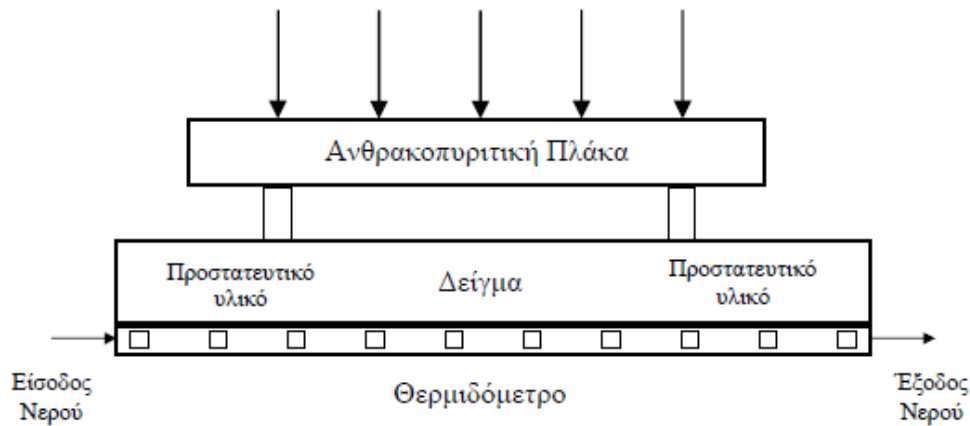
όπου  $A$  η κάθετη επιφάνεια στην κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας (δηλαδή, η επιφάνεια της κύριας θερμαντικής πηγής),  $\Delta T$  η θερμοκρασιακή διαφορά που αναπτύσσεται κατά την ακτινική διεύθυνση και  $\Delta x$  το πάχος των δοκιμίων. Η παραπάνω σχέση αναφέρεται σε συγκεκριμένη γεωμετρία δύο οριζόντιων παράλληλων πλακών απείρων διαστάσεων, οι οποίες έχουν τοποθετηθεί η μία πάνω από την άλλη. Μεταξύ των δύο πλακών βρίσκεται τοποθετημένη η πηγή θέρμανσης, η οποία ευθύνεται για τη μετάδοση σταθερού ποσού θερμότητας και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο σχεδιασμός της συσκευής απαιτεί όσο το δυνατό μικρότερη απόσταση μεταξύ των δύο δοκιμίων, για την αποφυγή απωλειών, ενώ η κύρια δυσκολία έγκειται στην επαφή αυτών με την πηγή θέρμανσης, για την αποφυγή άσκοπων ενεργειακών απωλειών.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι είναι εμπορικά διαθέσιμες, για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στερεών υλικών, πειραματικές διατάξεις που βασίζονται στην παραπάνω μέθοδο.

#### 4.1.2. Θερμιδομετρική Μέθοδος (Calorimeter Method)

Η θερμιδομετρική μέθοδος είναι επίσης μια ιδιαίτερα εφαρμόσιμη μέθοδος μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας, κάτω από συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Αποτελεί από το 1945 πιστοποιημένη μέθοδο για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας πυρίμαχων υλικών, με βάση τους διεθνείς κανονισμούς, κατά ASTM C201.

Στη γενική περίπτωση, θερμότητα διαχέεται στο υπό εξέταση στερεό υλικό, το οποίο περιβάλλεται από μία συστοιχία κατάλληλων προστατευτικών υλικών, μέσα σε ένα υγρόψυκτο θερμιδόμετρο. Κάτω από συνθήκες μόνιμης κατάστασης, η θερμική αγωγιμότητα του στερεού υλικού, υπολογίζεται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας μέσα σε αυτό καθώς και από το ρυθμό με τον οποίο ρέει η θερμότητα μέσα στο υλικό. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα μιας θερμιδομετρικής διάταξης, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στερεών πυρίμαχων υλικών.



**Εικόνα 20: Σχηματικό διάγραμμα θερμιδομετρικής διάταξης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C201**

Τόσο το θερμιδόμετρο, όσο και τα προστατευτικά υλικά, τα οποία περιβάλλουν το προς εξέταση δείγμα, ψύχονται συνεχώς, μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος ψυκτικού νερού, το οποίο τροφοδοτείται μέσω κατάλληλα σχεδιασμένου ψυκτικού κύκλου. Κατάλληλα ενσωματωμένα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της θερμοκρασίας ανάμεσα, στο προς εξέταση δείγμα και στα περιβάλλοντα προστατευτικά υλικά, ενώ άλλα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του εισερχόμενου και εξερχόμενου νερού.

Κάτω από μόνιμες συνθήκες, όταν η θερμοκρασία της πλευράς εκείνης του στερεού υλικού, η οποία υπόκειται άμεσα στην εξωτερική θέρμανση, σταθεροποιηθεί όπως επίσης και όταν η θερμοκρασία μεταξύ του θερμιδόμετρου και των περιβαλλόντων στο δείγμα υλικών δεν είναι μεγαλύτερη από  $\pm 0.03$  K, τότε η θερμική αγωγιμότητα, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{QL}{A(T_2 - T_1)} \quad (4.2)$$

όπου  $Q$  το ποσό θερμότητας που ρέει προς το υπό εξέταση στερεό υλικό,  $L$  το μήκος κατά την ακτινική διεύθυνση μεταφοράς θερμότητας και  $T_1$  και  $T_2$  η χαμηλότερη και η υψηλότερη θερμοκρασία αντίστοιχα, που σημειώνεται κατά μήκος του δείγματος. Το ποσό θερμότητας  $Q$  που μεταφέρεται στο στερεό υλικό, μπορεί επίσης να εκφραστεί, εφαρμόζοντας ένα ενεργειακό ισοζύγιο για όλη τη διάταξη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = \frac{C_p * \Delta T * M}{t} \quad (4.3)$$

όπου  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού,  $\Delta T$  η θερμοκρασιακή διαφορά του ψυκτικού μέσου (νερό) κατά τη είσοδο και τη έξοδό του στο θερμιδόμετρο,  $M$  η μάζα του νερού που μεταφέρεται στο θερμιδόμετρο, κατά το χρονικό διάστημα  $t$ . Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί τελικά να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{C_p * \Delta T * M * L}{A(T_2 - T_1)t} \quad (4.4)$$

#### **4.1.3. Μέθοδος της Ακτινικής Ροής Θερμότητας (Radial Heat Flow) και Μέθοδος της Αξονικής Ροής Θερμότητας (Axial Heat Flow)**

Η αρχή λειτουργίας των δύο αυτών μεθόδων βασίζεται στη μετάδοση ενός σταθερού ποσού θερμότητας στο επάνω μέρος ενός κυλίνδρου μέσα στον οποίο βρίσκεται τοποθετημένο το υπό εξέταση υλικό, ενώ το κάτω μέρος αυτού διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία. Το υλικό που παρουσιάζει κυλινδρική συνήθως διαμόρφωση, παρεμβάλλεται μεταξύ δύο δοκιμίων γνωστής θερμικής αγωγιμότητας και από τη μελέτη του προφίλ θερμότητας μέσα στο υλικό υπολογίζεται η θερμική του αγωγιμότητα.

Συγκεκριμένα η μέθοδος της ακτινικής ροής θερμότητας χρησιμοποιείται συνήθως σε στερεά μονωτικά υλικά και σκόρες και τα υπολογιζόμενα εύρη τιμών θερμικής αγωγιμότητας είναι από 0.01 - 200 W/(mK) ενώ η μέθοδος της αξονικής ροής θερμότητας χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά και καλύπτει τιμές από 10 - 500 W/(mK).

#### **4.1.4. Μέθοδος του Θερμαινόμενου Σύρματος (Hot Wire)**

Η μέθοδος του θερμαινόμενου σύρματος σε μόνιμη κατάσταση εξαιτίας των σημαντικών προβλημάτων που παρουσίαζε καθώς και των μεγάλων αποκλίσεων, έχει αντικατασταθεί πλήρως από την αντίστοιχη μη-μόνιμη κατάσταση, που περιγράφεται παρακάτω και η οποία αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες τεχνικές προσδιορισμού θερμικής αγωγιμότητας [Maglic, 1984].

### **4.2. Μέθοδοι Μη-Μόνιμης Κατάστασης**

Σε αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνονται οι δημοφιλέστερες τεχνικές μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας και χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι η αντίστοιχη θερμοκρασιακή διαφορά (Εξίσ. 2.2), με την οποία σχετίζεται η θερμική αγωγιμότητα, μεταβάλλεται με το χρόνο. Μεταξύ των δημοφιλέστερων είναι η μέθοδος μεταβολής της ακτινικής ροής θερμότητας (Dynamic Radial Heat Flow Method), η τεχνική Laser Flash, η μέθοδος του θερμαινόμενου δίσκου (Transient Hot Disk Method), καθώς και



η μέθοδος του θερμαινόμενου σύρματος (Transient Hot Wire Method).

Από τις μεθόδους μη-μόνιμης κατάστασης αυτές που οδηγούν σε απευθείας μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας είναι οι μέθοδοι: θερμαινόμενου σύρματος, θερμαινόμενης επιφάνειας (Transient Hot Plate) και θερμαινόμενου δίσκου. Οι υπόλοιπες μέθοδοι που αναφέρονται χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμικής διαχυτότητας και συνεπώς για τον έμμεσο υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας.

Οι μέθοδοι μη-μόνιμης κατάστασης είναι πολύ πιο σύντομες, απαιτούν μικρά δείγματα και είναι πιο ακριβείς. Επίσης, επιτρέπουν τη μέτρηση ανομοιογενών υλικών, ή υλικών που χαρακτηρίζονται από πολυστρωματική διαμόρφωση, γεγονός που αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα αυτών, έναντι των μεθόδων μόνιμης κατάστασης.

#### **4.2.1. Μέθοδος Μεταβολής της Ακτινικής Ροής Θερμότητας (Dynamic Radial Heat Flow Method)**

Η μέθοδος μεταβολής της ακτινικής ροής θερμότητας, στηρίζεται σε συνθήκες μη-μόνιμης κατάστασης και η αρχή λειτουργίας της αφορά τη συνεχή θέρμανση ή ψύξη του υπό μελέτη στερεού υλικού. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον προσδιορισμό της θερμικής διαχυτότητας ενός στερεού υλικού. Προτάθηκε για πρώτη φορά το 1935 [Luϊκον, 1966] και έχει χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της θερμικής διαχυτότητας των  $ZrO_2$  [Ginnings, 1960],  $ZrC$  και  $TiC$  [Cape et al., 1963] ενώ πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε για στερεά υλικά, υψηλής περιεκτικότητας σε  $Al_2O_3$  και για άλλα κεραμικά υλικά.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα λειτουργίας της μεθόδου και παριστάνονται όλες οι επιμέρους συσκευές που συνθέτουν μια πειραματική διάταξη. Το προς εξέταση δείγμα θερμαίνεται ή ψύχεται με σταθερό ρυθμό και το θερμοκρασιακό προφίλ προσδιορίζεται μέσω δύο θερμοστοιχείων. Τα τελευταία είναι συνδεδεμένα με κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα συλλογής δεδομένων, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο έλεγχος του σταθερού ρυθμού ψύξης ή θέρμανσης, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (ανορθωτή), ο οποίος τελικά τροφοδοτεί το σύστημα θέρμανσης - ψύξης.



Εικόνα 21: Σχηματικό διάγραμμα των επιμέρους συσκευών μιας πειραματικής διάταξης της μεθόδου μεταβολής της ακτινικής ροής θερμότητας

Για ένα στερεό κυλινδρικό υλικό με μήκος  $l$  και διάμετρο  $d$  ( $l / d > 2$ ). Η εξίσωση προσδιορισμού της θερμικής διαχυτότητας είναι:

$$k = \frac{R^2 \frac{dT}{dt}}{\Gamma * \Delta T} \quad (4.5)$$

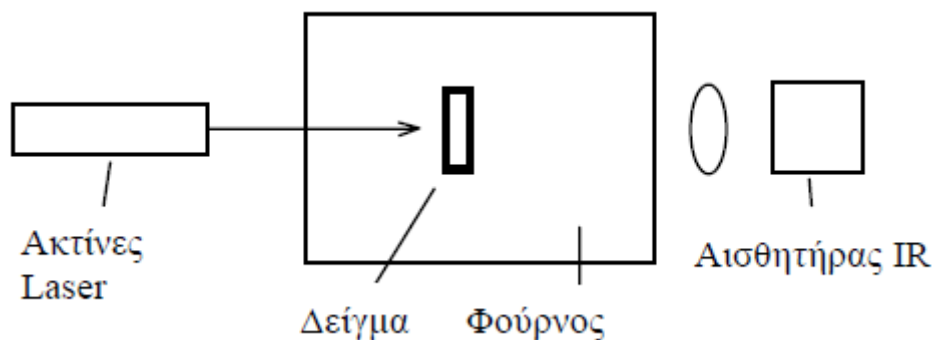
όπου  $\Delta T$  η θερμοκρασιακή διαφορά μέσα στο υλικό,  $R$  το μήκος κατά την ακτινική διεύθυνση μεταφοράς θερμότητας,  $\frac{dT}{dt}$  ο ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης και  $\Gamma$  παράγοντας, ο οποίος αφορά τη γεωμετρία του υπό εξέταση στερεού υλικού. Συγκεκριμένα,  $\Gamma = 4$  για κύλινδρο απείρων διαστάσεων,  $\Gamma = 6$  για σφαίρα και  $\Gamma = 3$  για δίσκο απείρων διαστάσεων. Έχοντας υπολογίσει τη θερμική διαχυτότητα του υλικού, υπολογίζεται έμμεσα στη συνέχεια και η θερμική αγωγιμότητα του τελευταίου, μέσω της εξίσωσης 2.3.

#### 4.2.2. Τεχνική Laser-Flash (Laser-Flash Method)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε τα τελευταία έτη για τη μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας στερεών και λιγότερο των ρευστών ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συνοπτικό σχηματικό διάγραμμα μιας πειραματικής διάταξης που βασίζεται στην τεχνική αυτή.

Αναφορικά με την αρχή λειτουργίας της τεχνικής, το προς μέτρηση δείγμα υπόκειται για μικρό χρονικό διάστημα από τη μία του πλευρά αρχικά, σε ακτίνες laser υψηλής έντασης. Η απορρόφηση της ενέργειας, έχει ως συνέπεια τη μετάδοση του προφίλ θερμότητας, διαμέσου του υλικού στην άλλη πλευρά του δείγματος, όπου βρίσκεται τοποθετημένος κατάλληλος αισθητήρας υπερύθρων, για την καταγραφή

της θερμοκρασιακής του αύξησης.



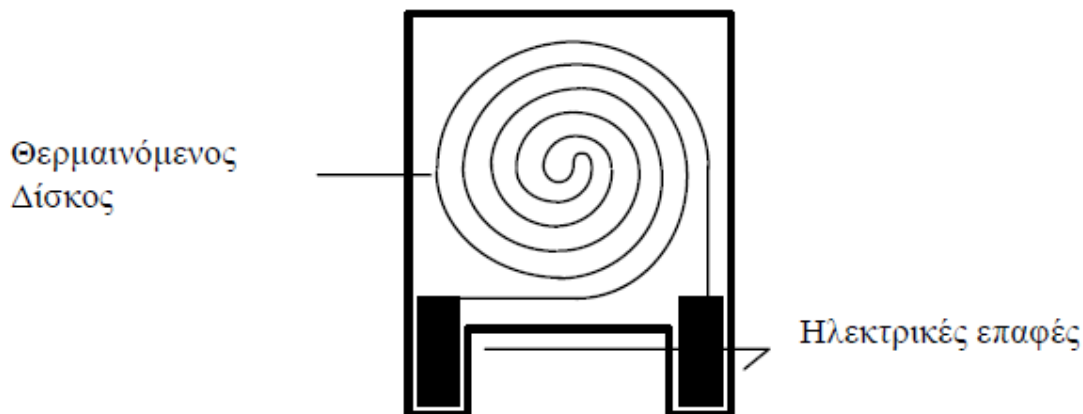
Εικόνα 22: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης της τεχνικής Laser-Flash

Πλεονέκτημα συνιστά η δυνατότητα μετρήσεων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μιας και το δείγμα δε βρίσκεται σε άμεση επαφή με την πηγή θέρμανσης. Παρόλα αυτά, προβλήματα όπως η μη ακτινική μετάδοση θερμότητας, η δυσκολία ρύθμισης της ακτινοβολίας με τρόπο που να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη θέρμανση του δείγματος, καθώς και η πιθανή εμφάνιση πεδίων συναγωγής στην περίπτωση μέτρησης ρευστών ουσιών δυσχεραίνουν τη χρήση της τεχνικής και μειώνουν την ακρίβειά της. Η μέθοδος όμως παρά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει, έχει ήδη εφαρμοστεί για τη μέτρηση διαφόρων σύνθετων υλικών, πολυμερών, μονωτικών υλικών αλλά και ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών, όπως μέταλλα.

#### 4.2.3. Μέθοδος Θερμαινόμενου Δίσκου (Transient Hot-Disk Method)

Μια άλλη μέθοδος μη-μόνιμης κατάστασης που συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία είναι η μέθοδος του θερμαινόμενου δίσκου. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται αποκλειστικά για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στερεών υλικών.

Στην περίπτωση αυτή ένα λεπτό μεταλλικό σύρμα, συχνά κατασκευασμένο από νικέλιο, διαμορφώνεται σε σχήμα σπирάλ όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα και τοποθετείται μεταξύ δύο υμένων κάποιου σκληρού μονωτικού υλικού. Ο αισθητήρας ο οποίος δημιουργείται, τοποθετείται στη συνέχεια μεταξύ δύο δοκιμίων του υπό εξέταση στερεού υλικού και από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του λόγω μιας εξωτερικής πηγής θέρμανσης, υπολογίζεται τελικά η θερμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 23: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης της μεθόδου θερμαινόμενου δίσκου

Αισθητήρες σαν αυτόν είναι εμπορικά διαθέσιμοι συνοδευόμενοι με το απαραίτητο λογισμικό, για τον τελικό υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται, βασίζεται σε αριθμητική μέθοδο επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και όχι σε κάποια αναλυτική λύση. Αυτό άλλωστε αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου, δεδομένου ότι η σπειροειδής διαμόρφωση του αισθητήρα δεν επιτρέπει τη θεωρητική επίλυση. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη σύνθετων πολυμερών συστημάτων και διάφορων μονωτικών υλικών.

#### 4.2.4. Μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος (Transient Hot-Wire Method)

Η τεχνική του Θερμαινόμενου Σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση βασίζεται στη μετάδοση σταθερού ποσού θερμότητας από ένα πολύ λεπτό μεταλλικό σύρμα, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο μέσα στο υπό εξέταση υλικό. Η θέρμανση του σύρματος επιτυγχάνεται με τη διέλευση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Η μεταφορά της θερμότητας από το σύρμα προς το περιβάλλον υλικό, είναι εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.

Η μέθοδος εξαιτίας της ευκολίας και της υψηλής απόλυτης ακρίβειάς της έχει αποκτήσει ευρεία εφαρμογή στη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας ρευστών σε μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών και πιέσεων, καθώς και στη μέτρηση στερεών υλικών - σύνθετων και μη - σε εξίσου ευρύ πεδίο συνθηκών.

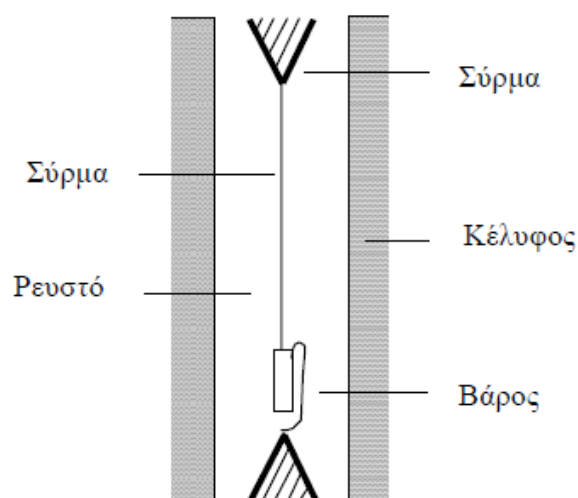
Ιστορικά αναφέρεται ότι η μέθοδος του θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση περιγράφηκε για πρώτη φορά το 1888 από τον Schieirmacher [Schieirmacher, 1888] αλλά η πρώτη πρακτική εφαρμογή της δημοσιεύεται το 1949 από τους Van der Held και Van Drunen [Van der Held and Van Drunen, 1949] και αφορούσε τη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας ρευστών.

Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή της μεθόδου επεκτάθηκε στη μέτρηση

θερμικής αγωγιμότητας πυρίμαχων κεραμικών υλικών και κατοχυρώθηκε ως πρότυπη μέθοδος μέτρησης για τα υλικά αυτά κατά το διεθνές πρότυπο τυποποίησης DIN 51046. Επίσης, μια μικρή διαφοροποίηση της μεθόδου έγινε αποδεκτή από τον ευρωπαϊκό οργανισμό PRE (Fédération Européenne des Fabricants de Produits Réfractaires) ως PRE/R32, ενώ παράλληλα προτάθηκε ως πρότυπη μέθοδος μέτρησης κατά ISO με την κωδική ονομασία ISO/TC33.

Μια τυπική διάταξη θερμαινόμενου σύρματος, για τη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας ρευστών παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα. Στην ιδανική πειραματική διάταξη που απεικονίζεται (Εικ. 24) ισχύουν οι παρακάτω τρεις παραδοχές:

- Η θερμότητα μεταδίδεται μόνο με το μηχανισμό της αγωγής
- Η πηγή θέρμανσης που χρησιμοποιείται είναι απείρου μήκους, γραμμική, συνεχής και απελευθερώνει σταθερό ποσό θερμότητας  $q$  ανά μονάδα μήκους σύρματος
- Το ρευστό μέσα στο οποίο βρίσκεται βυθισμένη η θερμαντική πηγή είναι ασυμπίεστο, έχει σταθερές τιμές πυκνότητας  $\rho$ , ειδικής θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  και εκτείνεται στο άπειρο ως προς την ακτινική διεύθυνση  $r$



Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα ιδανικής πειραματικής διάταξης θερμαινόμενου σύρματος, για τη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας ρευστών

Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας στερεών υλικών σε μια αντίστοιχη διάταξη θερμαινόμενου σύρματος, η πηγή θέρμανσης τοποθετείται σε πρώτο στάδιο μεταξύ δύο δειγμάτων του υπό εξέταση στερεού υλικού. Οι εφαρμογές της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση, μέχρι σήμερα, δεν έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ικανοποιητικές. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τέσσερις κύριες διαφοροποιήσεις της εφαρμογής της τεχνικής στη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας

στερεών υλικών:

1) Η παλαιότερη ολοκληρωμένη εφαρμογή της μεθόδου σε πυρίμαχα μονωτικά υλικά, αναφέρεται από τον Haurin [Haurin, 1960]. Το εύρος τιμών θερμικής αγωγιμότητας, που κάλυπταν οι μετρήσεις ήταν από 0.8 - 1.8 W/(mK) και το αντίστοιχο εύρος θερμοκρασιών ήταν από 300 - 800 K. Η τεχνική του θερμαινόμενου σύρματος όπως χρησιμοποιήθηκε από τον Haurin, αναφέρεται σε ένα θερμοστοιχείο το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο στο κέντρο ενός δοκιμίου και θερμαίνεται μέσω μιας πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Παράλληλα, ένα δίκτυο κατάλληλων φίλτρων εφαρμόζεται για την εξάλειψη σημάτων συνεχούς ρεύματος, επιτρέποντας έτσι τον τελικό υπολογισμό της ηλεκτρεγερτικής τάσης στα άκρα του θερμοστοιχείου.

2) Η δεύτερη προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου στη μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας στερεών υλικών αναφέρεται από τον Mittenbühler [Mittenbühler, 1964]. Η τελευταία στηρίχθηκε πάνω στο Γερμανικό Πρότυπο DIN 51046 και στο αντίστοιχο Ευρωπαϊκό EN 993-14 (1998), τα οποία βρίσκονται σε ισχύ μέχρι σήμερα και πιστοποιούν τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος όπως εφαρμόστηκε κάνει χρήση ενός λεπτού μεταλλικού σύρματος, στο οποίο έχει ηλεκτροκολληθεί θερμοστοιχείο με αποτέλεσμα και τα δύο μαζί να παρουσιάζουν μια σταυροειδή διαμόρφωση. Μια πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος εφαρμόζεται στα άκρα του σύρματος και από τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής του αύξησης, υπολογίζεται τελικά η θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος στερεού υλικού.

3) Μια άλλη διαφοροποίηση της παραπάνω τεχνικής του Mittenbühler στηρίχθηκε πάνω σε ανάλογο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 993-15 (1998). Η τεχνική, όπως εφαρμόστηκε κάνει χρήση ενός θερμοστοιχείου το οποίο τοποθετείται σε απόσταση (συνήθως 1 mm) από το θερμαινόμενο σύρμα, το οποίο δρα ως πηγή θέρμανσης. Η θεωρία της μεθόδου ελαφρώς διαφοροποιείται, αλλά η αρχή λειτουργίας παραμένει η ίδια. Μια άλλη τροποποίηση της παραπάνω τεχνικής, περιγράφεται από τον Vozár [Vozár, 1996]. Η τεχνική αυτή απαιτεί το θερμοστοιχείο και το μεταλλικό σύρμα της μεθόδου τοποθετημένα, σε απόσταση βέβαια μεταξύ τους αλλά μέσα σε ένα μονωτικό σωλήνα, κατασκευασμένο από κάποιο κεραμικό υλικό. Ο αισθητήρας, ο οποίος διαμορφώνεται, τοποθετείται στη συνέχεια μέσα στο προς μέτρηση στερεό υλικό, το οποίο βέβαια φέρει τις απαραίτητες αυλακώσεις.

4) Όλες οι παραπάνω διαφοροποιήσεις της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση, κάνουν χρήση ενός θερμοστοιχείου για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και συνεπώς η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται σε ένα μόνο σημείο. Η επόμενη εξέλιξη της μεθόδου, αναφέρεται για πρώτη φορά από τον Morrow [Morrow, 1979], ο οποίος εισήγαγε την καινοτομία της ταυτόχρονης μέτρησης της

θερμοκρασίας μέσω του σύρματος και όχι μέσω κάποιου θερμοστοιχείου. Δηλαδή ο ρόλος του σύρματος είναι διπλός, λειτουργεί ως πηγή θέρμανσης, μεταδίδοντας ορισμένο ποσό θερμότητας προς το υπό μελέτη υλικό, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την καταγραφή της θερμοκρασιακής αύξησης του υλικού, που βρίσκεται σε επαφή με το σύρμα και έχει την ίδια θερμοκρασία με αυτό.

#### **4.2.5. Μέθοδοι Επιβολής Διαταραχής είτε Παλμικής (Pulse Transient) είτε Βηματικής (Step-wise Transient Method)**

Η αρχή λειτουργίας των δύο αυτών μεθόδων μη-μόνιμης κατάστασης παρουσιάζεται ιδιαίτερα απλή. Το στερεό υλικό που εξετάζεται, υπό τη μορφή τριών όμοιων δοκιμίων, υποβάλλεται σε θέρμανση, είτε μέσω μιας παλμικής διαταραχής είτε μέσω μιας βηματικής αντίστοιχα. Από το θερμοκρασιακό προφίλ, το οποίο αναπτύσσεται υπολογίζεται αρχικά η θερμική του διαχυτότητα και στη συνέχεια και η θερμική του αγωγιμότητα (Εξίσ. 2.3).

Στις δύο αυτές μεθόδους, η πηγή θέρμανσης υπό τη μορφή μεταλλικού ελάσματος, βρίσκεται τοποθετημένη μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κομματιού του υπό εξέταση στερεού υλικού, ενώ μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου κομματιού βρίσκεται τοποθετημένο ένα θερμόμετρο για την καταγραφή της μεταβολής της θερμοκρασίας. Η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό είτε με τη μορφή παλμού είτε με τη μορφή βηματικής διαταραχής, εξαιτίας της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το μεταλλικό έλασμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο μέθοδοι χαρακτηρίζονται από ευρύ πεδίο θερμοκρασιών λειτουργίας δηλαδή 100 – 3300 K και το εύρος τιμών θερμικής διαχυτότητας κυμαίνεται από  $10^{-7} - 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### **4.3. Σύγκριση μεταξύ των Μεθόδων Μόνιμης και Μη-Μόνιμης Κατάστασης**

Μια γενική διαπίστωση είναι ότι οι μέθοδοι μόνιμης κατάστασης, απαιτούν μεγάλη χρονική διάρκεια πειραματικής δειγματοληψίας, μεγάλων διαστάσεων δοκίμια και έχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης υψηλών τιμών θερμικής αγωγιμότητας. Αντίθετα οι αντίστοιχες μέθοδοι μη-μόνιμης κατάστασης, είναι σύντομες και χρησιμοποιούνται συνήθως για την πρόβλεψη χαμηλών τιμών θερμικής αγωγιμότητας.

Επίσης, πέρα από την αμεσότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων, άλλο ένα συγκριτικό πλεονέκτημα των μεθόδων μη-μόνιμης κατάστασης είναι ότι επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας ενός ανισότροπου υλικού, προσδιορίζοντας παράλληλα τις θερμοφυσικές ιδιότητες όλων των επιπλέον υλικών που το απαρτίζουν.

Για τα περισσότερα υλικά όπως είναι φυσικό, ίδιες τιμές θερμικής αγωγιμότητας και διαχυτότητας προκύπτουν, τόσο από την εφαρμογή μιας τεχνικής που βασίζεται σε μόνιμη κατάσταση, όσο και από μιας αντίστοιχης που βασίζεται σε μη-μόνιμη κατάσταση. Περιπτώσεις, στις οποίες παρατηρείται απόλυτη συμφωνία τιμών μεταξύ των δύο διαφορετικών κατηγοριών μετρήσεων αφορούν ιδιαίτερα σταθερά και αδιαφανή υλικά.

Στην περίπτωση των διαφανών και ημιδιαφανών στερεών υλικών, η συμφωνία μεταξύ των τιμών δεν είναι ιδιαίτερα καλή. Επίσης η κατηγορία των σύνθετων υλικών, παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των διάφορων τεχνικών μέτρησης [Taylor, 1989].

Υπάρχουν όμως και ορισμένες κατηγορίες υλικών, των οποίων οι υπολογιζόμενες τιμές θερμοφυσικών ιδιοτήτων μέσω διάφορων τεχνικών, δε συμφωνούν καθόλου. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα συνήθη κράματα υψηλών θερμοκρασιών, τα ασταθή υλικά, καθώς και τα μονωτικά ινώδη υλικά, που παρουσιάζουν μεγάλο πορώδες.



# 5

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

### *5.1. Γενικά*

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών.

Η ικανότητα των οπτικών μικροσκοπίων περιορίζεται λόγω της φύσης του φωτός σε επίπεδα μεγεθύνσεων έως 1,000× και σε διακριτική ικανότητα έως 0.2 μm. Η απαίτηση για μεγεθύνσεις μεγαλύτερες του 10,000× οδήγησε στην ανακάλυψη και εφαρμογή των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης ή διαπερατότητας (TEM, Transmission Electron Microscope) ήταν το πρώτο είδος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και στη συνέχεια ακολούθησε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscope).

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο με λειτουργία περίπου παρόμοια με αυτήν του οπτικού μικροσκοπίου, μόνο που το πρώτο χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, ώστε να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού).

Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού. Επομένως το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως τη μορφολογία και τη σύσταση της υπό μελέτη επιφάνειας και χρησιμοποιείται για την εξέταση της μικροδομής στερεών δειγμάτων και για τη λήψη εικόνων υψηλού βαθμού διεύθυνσης.

### *5.2 Αρχή Λειτουργίας*

Μια καλά εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του εξεταζόμενου

δείγματος με το οποίο και αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες Χ. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

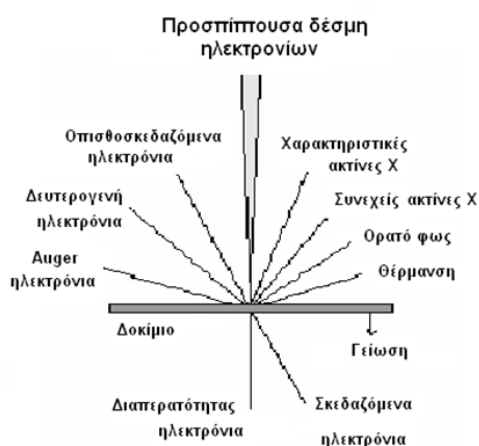
Η διείδυση της δέσμης στο δείγμα καθορίζεται από τις παραμέτρους που ακολουθούν και κυριότερα από τις δύο τελευταίες:

- Αριθμός ηλεκτρονίων της δέσμης (emission current)
- Διάμετρος της δέσμης (spot size)
- Ταχύτητα / Ενέργεια των ηλεκτρονίων (accelerating voltage)
- Είδος του δείγματος (Μέσος ατομικός αριθμός του δείγματος)

### 5.3. Αλληλεπιδράσεις Δέσμης Ηλεκτρονίων - Δείγματος

Οι αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν ανάμεσα στο δείγμα και στα ηλεκτρόνια της δέσμης παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί και περιλαμβάνουν:

- Φόρτιση (charging), συσσώρευση φορτίου ηλεκτρονίων στο δείγμα  
(Για να μην συμβαίνει αυτό το δείγμα θα πρέπει να είναι αγωγίμο και συνδεδεμένο με γείωση ή να χρησιμοποιείται χαμηλό δυναμικό επιτάχυνσης)
- Ελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων  
(Μεγαλύτερη γωνία, μικρότερη απώλεια ενέργειας)
- Μη ελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων  
(Μικρότερη γωνία, μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας)
- Θέρμανση του δείγματος

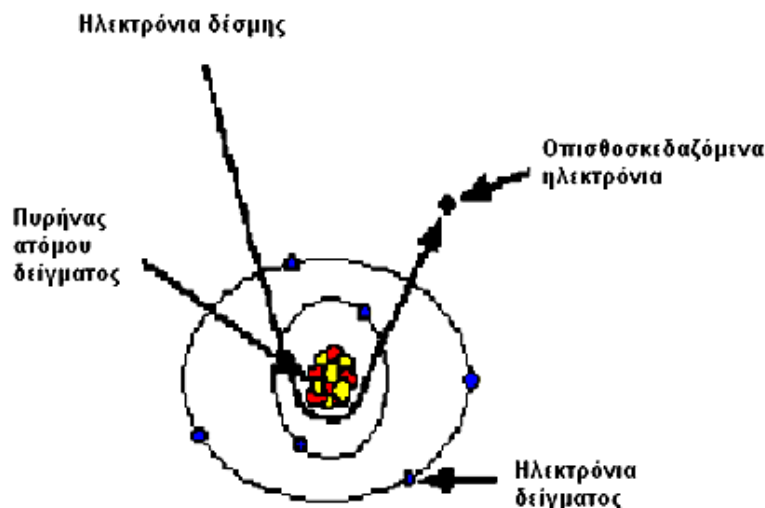


Εικόνα 25: Φαινόμενα αλληλεπίδρασης δέσμης ηλεκτρονίων - δείγματος

### 5.3.1. Ελαστική Σκέδαση

Περιλαμβάνονται τα ελαστικά σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δέσμης (elastically scattered primary electrons) τα οποία δεν ανιχνεύονται από το σύστημα και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (backscattered electrons, BSE)

Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης με ενέργεια π.χ. 30 KeV φθάνουν στην επιφάνεια του δείγματος, διεισδύουν σε βάθος που εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό. Τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν προς τυχαίες κατευθύνσεις μέσα στο δείγμα και συγκρούονται με τα άτομα του δείγματος. Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται ελαστικά με τον πυρήνα του ατόμου (ειδικά σε μεγάλα άτομα) και σκεδάζονται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς σημαντική απώλεια της ενέργειάς τους (διατηρούν το 50 με 80% της αρχικής ενέργειας). Εκείνα τα ηλεκτρόνια που σκεδάζονται προς τα πίσω με γωνία  $180^\circ$  λέγονται οπισθοσκεδαζόμενα. Αυτά έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος από το δείγμα.



Εικόνα 26: Σχηματική απεικόνιση σκέδασης οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων

Το ποσοστό των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται οπισθοσκεδαζόμενα, εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του ατόμου του δείγματος. Για τα ελαφρά στοιχεία είναι ~6% ενώ για τα βαρύτερα ~50%. Επομένως η αλλαγή του ποσοστού των BSE δίνει διαφοροποίηση στην εικόνα ανάλογα με τον ατομικό αριθμό. Οι βαρύτερες φάσεις φαίνονται λαμπρότερες από τις ελαφρύτερες. Έτσι έχουμε πληροφορίες για τη σύσταση του δείγματος.

#### Ανίχνευση οπισθοσκεδαζόμενων

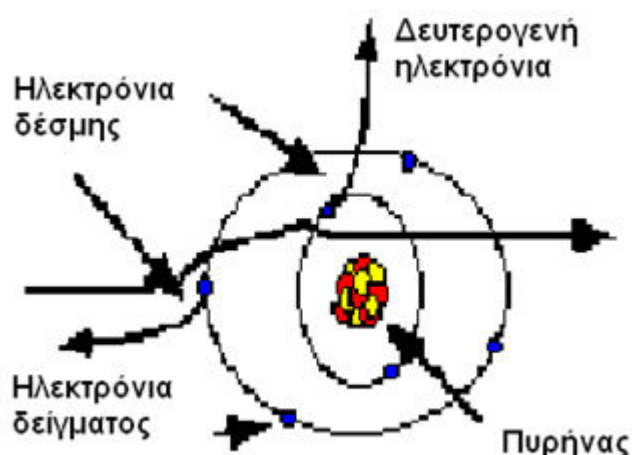
Η ανίχνευση γίνεται χρησιμοποιώντας ως ανιχνευτή τον ημιαγωγό στερεάς κατάστασης (solid state semiconductor) σχήματος “donut”, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στην έξοδο της κολώνας. Μετρώνται οι κτύποι των ηλεκτρονίων στον ανιχνευτή, οι οποίοι μετατρέπονται σε ένταση των ψηφίδων και εμφανίζονται

στο σωλήνα σχηματίζοντας την εικόνα.

### 5.3.2. Μη Ελαστική Σκέδαση

Εδώ περιλαμβάνονται τα μη ελαστικά σκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (inelastically scattered electrons), τα οποία δεν ανιχνεύονται από το σύστημα και τα δευτερογενή ηλεκτρόνια (secondary electrons, SE).

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι τα χαλαρά συγκρατούμενα ηλεκτρόνια του ατόμου που όταν συγκρουστούν με τα ηλεκτρόνια της δέσμης απομακρύνονται από αυτό. Κάθε ηλεκτρόνιο που εγκαταλείπει το άτομο μετά από σύγκρουση με άλλο υψηλής ενέργειας είναι θεωρητικά ένα δευτερογενές ηλεκτρόνιο ενώ κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο μπορεί να παράγει αρκετά δευτερογενή. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χαμηλής ενέργειας (50eV) και εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος αφού αυτά που εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος, απορροφώνται εύκολα από την μάζα του δείγματος. Για το λόγο αυτό τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χρήσιμα για την απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος.



Εικόνα 27: Σχηματική απεικόνιση σκέδασης δευτερογενών ηλεκτρονίων

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια παράγονται με δύο κυρίως μηχανισμούς:

- Καθώς η δέσμη εισέρχεται στην επιφάνεια
- Καθώς η οπισθοσκεδαζόμενη δέσμη εξέρχεται από την επιφάνεια

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι δέκα φορές πιο πιθανός από τον πρώτο. Επομένως είναι αναμενόμενο να υπάρχει μεγαλύτερη εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων εκεί που είναι μεγάλη και η εκπομπή οπισθοσκεδαζόμενων. Γι' αυτό οι εικόνες των δευτερογενών και των οπισθοσκεδαζόμενων δεν διαφέρουν πολύ.

### Ανίχνευση δευτερογενών ηλεκτρονίων

Η συλλογή των δευτερογενών ηλεκτρονίων γίνεται με την βοήθεια ενός συλλέκτη που δεν είναι τίποτε άλλο από ένα πλέγμα με θετικό δυναμικό (+100V) που βρίσκεται μπροστά από τον ανιχνευτή και έλκει τα αρνητικά ηλεκτρόνια τα οποία μετρώνται από τους κύττους που παράγουν στον ανιχνευτή. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της επιφάνειας. Η διακύμανση στην ένταση των ηλεκτρονίων επηρεάζει τη φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα (CRT), ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την δέσμη ηλεκτρονίων. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται η εικόνα της επιφάνειας του δείγματος στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα.

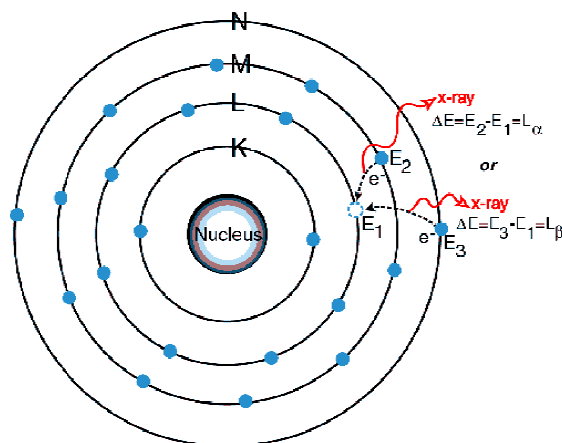
### 5.3.3. Ακτίνες X

#### Συνεχές φάσμα

Όταν ένα ηλεκτρόνιο σκεδάζεται μη ελαστικά, σε αλληλεπίδραση με τον πυρήνα ενός ατόμου, επιβραδύνεται και μέρος (έως και το σύνολο) της ενέργειάς του αποδίδεται ως ακτίνες X που ονομάζονται Bremsstrahlung. Αποτέλεσμα αυτού είναι ένα ευρύ φάσμα ακτίνων X με μέγιστη ενέργεια εκείνη του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου. Το φάσμα αυτό δεν χρησιμεύει στη στοιχειακή ανάλυση διότι δεν είναι χαρακτηριστικό του στοιχείου.

#### Χαρακτηριστικό φάσμα

Οι χαρακτηριστικές ακτίνες X δημιουργούνται με έναν τελείως διαφορετικό μηχανισμό. Όταν κάποιο ηλεκτρόνιο φύγει από εσωτερική στιβάδα, τότε ηλεκτρόνιο υψηλότερης ενεργειακής στιβάδας καλύπτει το κενό, μεταβαίνοντας στη χαμηλότερη στιβάδα και εκπέμποντας την ενεργειακή διαφορά ως ακτίνες X. Η ενέργεια αυτών των ακτίνων είναι χαρακτηριστική της μετάπτωσης και κατά συνέπεια του ατόμου.



Εικόνα 28: Περίπτωση παραγωγής χαρακτηριστικών ακτίνων X

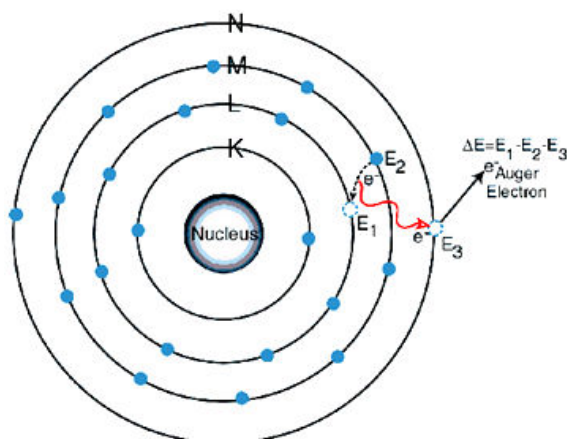
### Ανίχνευση ακτίνων Χ

Ο ανιχνευτής ακτίνων Χ είναι ένα κρύσταλλος πυριτίου (με λίθιο), ο οποίος αλλάζει την αντίστασή του ανάλογα με την απορρόφηση της ενέργειας των ακτίνων Χ. Αυτό καταγράφεται σαν μέτρηση της ακτίνας, χαρακτηριστικής της προέλευσής της, το μέγεθος της οποίας μετράται σε eV από έναν πολυκάναλο αναλυτή (multichannel analyzer). Ο ανιχνευτής χρησιμοποιεί έναν πίνακα (look up table) για να προσδιορίσει την προέλευση.

Ο ανιχνευτής δεν μετρά μόνο την χαρακτηριστική ενέργεια των ακτίνων αλλά παρόμοια με τον ανιχνευτή δευτερογενών ηλεκτρονίων, μπορεί να «φανταστεί» την θέση των ατόμων προέλευσης και να δημιουργήσει ένα χάρτη ακτίνων Χ. Όλοι οι ανιχνευτές παρουσιάζουν θερμική απώλεια ρεύματος και για τον λόγο αυτό πρέπει να ψύχονται με υγρό άζωτο.

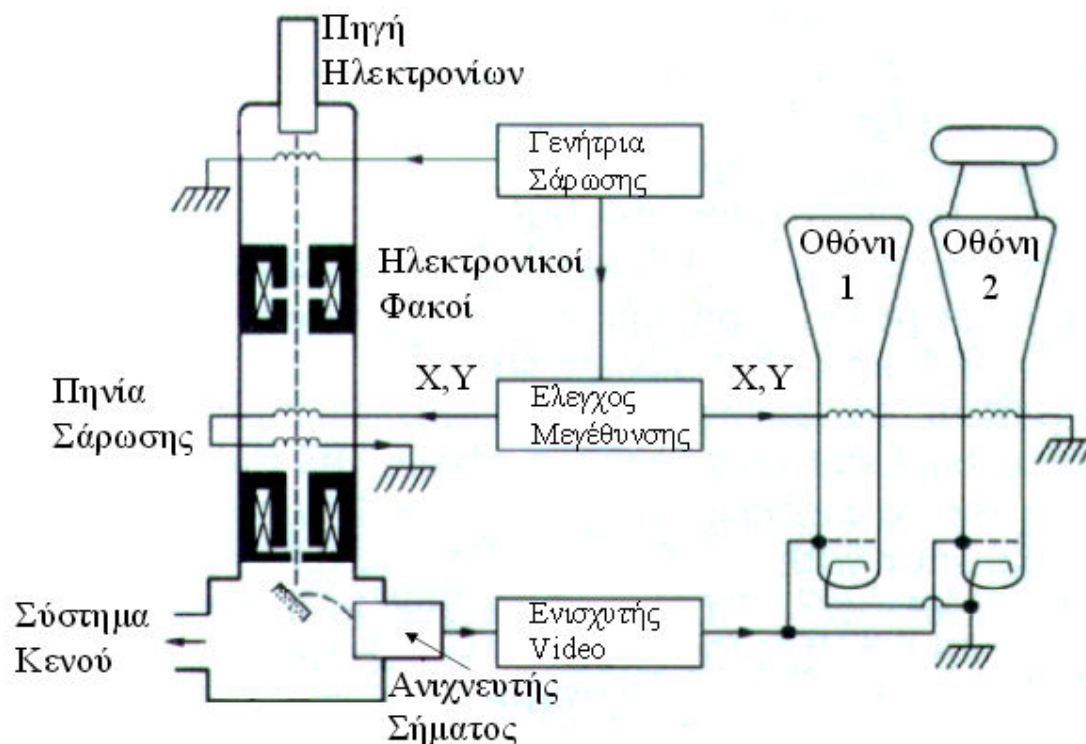
### Ηλεκτρόνια Auger

Τα ηλεκτρόνια Auger παράγονται όταν οι εκπεμπόμενες από το δείγμα ακτίνες Χ εκδιώξουν ηλεκτρόνια από άλλη στιβάδα κατά την έξοδό τους από το δείγμα.



Εικόνα 29: Παράδειγμα παραγωγής ηλεκτρονίων Auger

## 5.4. Περιγραφή Οργάνου



Εικόνα 30: Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης

Οι βασικές διατάξεις που υπάρχουν στο μικροσκόπιο είναι το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το σύστημα πληροφοριών και τέλος το σύστημα κενού.

Κατά την χρήση του SEM, η στήλη πρέπει να βρίσκεται υπό κενό για να μπορεί να παραχθεί και διατηρηθεί σταθερή η ακτίνα των ηλεκτρονίων. Διαφορετικά τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα μόρια του αέρα και απορροφώνται. Το κενό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση δύο αντλιών.

Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι τα εξής:

- Σχηματίζεται μια δέσμη ηλεκτρονίων από την πηγή η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού
- Χρησιμοποιώντας μεταλλικά ανοίγματα, ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και πηνία σάρωσης, επιτυγχάνεται μια λεπτή εστιασμένη μονοχρωματική δέσμη η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος
- Οι αλληλεπιδράσεις δέσμης δείγματος καταγράφονται από τους ανιχνευτές και μετατρέπονται σε εικόνα.

Τα παραπάνω στάδια είναι κοινά για όλους τους τύπους ηλεκτρονικών μικροσκοπίων.

### 5.4.1. Πηγή Ηλεκτρονίων

Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα νήμα συνηθέστερα βολφραμίου, το οποίο λειτουργεί σαν κάθοδος.

Μέσα από το νήμα περνάει ρεύμα (filament current). Καθώς το ρεύμα αυξάνεται, εκπέμπονται ηλεκτρόνια τα οποία κατευθύνονται προς την άνοδο όπου εφαρμόζεται ένα δυναμικό 1-30 KV (accelerating voltage). Η άνοδος που είναι θετική όπως και το κύκλωμα δημιουργεί ισχυρές ελκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η άνοδος κατευθύνει και επιταχύνει τα ηλεκτρόνια, ελέγχει δηλαδή την ενέργειά τους.

Καθώς αυξάνεται το ρεύμα του νήματος, φθάνει σε ένα σημείο που δεν εκπέμπονται πλέον άλλα ηλεκτρόνια. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κορεσμός του νήματος (filament saturation). Αν το ρεύμα του νήματος αυξηθεί επιπλέον, έχουμε υπερθέρμανση και εξάχνωση του βολφραμίου, δηλαδή το νήμα καίγεται. Ακόμα όμως και στο σημείο του κορεσμού, μέρος του βολφραμίου εξαχνώνεται και γι' αυτό με την πάροδο του χρόνου το νήμα λεπταίνει.

Ο αριθμός ηλεκτρονίων στη δέσμη ορίζεται σαν ρεύμα εκπομπής (emission current). Καθορίζεται από την απόσταση ανάμεσα στην άκρη του νήματος (filament tip) και του ανοίγματος που υπάρχει στο καπάκι (wehnelt cap aperture). Όσο πιο κοντά βρίσκονται, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια έλκονται και τόσο μεγαλύτερο γίνεται το ρεύμα εκπομπής.

Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την άνοδο και περνούν μέσα από ένα ηλεκτρομαγνητικό φακό συμπύκνωσης (condenser lens) που τα μετατρέπει σε δέσμη (στάδιο απομεγέθυνσης). Η ισχύς αυτού του φακού καθορίζει τη διάμετρο της δέσμης (spot size). Άλλοι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί ελέγχουν την εστίαση της δέσμης πάνω στην επιφάνεια του δείγματος.

### 5.4.2. Σύστημα Πληροφοριών

Περιλαμβάνει τους διάφορους ανιχνευτές που δέχονται τα σήματα που παράγονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα καθώς και το σύστημα παρουσίασης (μεγέθυνση-παρουσίαση-καταγραφή).

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ανιχνευτές δευτερογενών ηλεκτρονίων όπως ο ανιχνευτής Everhart – Thornley (ETD), ο ανιχνευτής ευρέως πεδίου (Large Field Detector, LFD), ο ανιχνευτής σε ατμοσφαιρική πίεση (Gaseous Electron Detector, GED), ο ανιχνευτής διόδου στερεάς φάσης (Solid State Electron Detector, SSED) για τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BSE), καθώς και ο ανιχνευτής διόδου λιθίου – πυριτίου (SiLi) με τον οποίο ανιχνεύουμε ενεργειακή



διασπορά ακτίνων X (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS).

### **5.5. Εφαρμογές**

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλα τα πεδία που μας ενδιαφέρει η γεωμετρία και η σύσταση της μικροδομής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μεγάλη ποικιλία δειγμάτων όπως βιολογικά υλικά, φιλμ, μεμβράνες, φίλτρα, ίνες, ρητίνες, τέφρες, τσιμέντα, χρώματα, μεταλλικές επιφάνειες.

Η μεγάλη δυνατότητα εστίασης και αλλαγής μεγέθυνσης σε ένα ευρύ πεδίο, η ελάχιστη προετοιμασία του δείγματος και τα τρισδιάστατα διαγράμματα που μας προσφέρει το SEM το έχουν κάνει ένα απαραίτητο όργανο έρευνας. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παίρνουμε ποσοτικές αναλύσεις με γεωμετρικές λεπτομέρειες και έχουμε τη δυνατότητα να ξεχωρίζουμε φάσεις. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη χρησιμοποίησή του για την ποσοτική ανάλυση σε ελατές και εύθραυστες φάσεις, για το βάθος των ρηγμάτων, το μέγεθος της ζώνης στη σχισμή και τον τρόπο δημιουργίας ρωγμών με σκοπό να καθοριστεί ένα ποσοτικό μοντέλο σκληρότητας της δομής [Koui and Lympereorouli, 2004].

Η διάβρωση και επικάλυψη επιφανειών μελετώνται επίσης με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, χρησιμοποιώντας όλα τα πλεονεκτήματά του για τον χαρακτηρισμό των τύπων της διάβρωσης και της επικάλυψης και την κινητική μελέτη των διεργασιών.

# 6

## ΤΟ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ “THERMONASSA I”

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”. Πρόκειται για ένα νέο υλικό που προσφέρεται σε υγρή αποθηκεύσιμη μορφή από την ελληνική εταιρία Ερμώνασσα Α.Ε. Σε πρώτο στάδιο εξετάζεται η σύσταση και η δομή του υλικού. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται μετέπειτα αποσκοπεί αφενός στη διερεύνηση της αντοχής και μελέτη της συμπεριφοράς του σε επίπεδο μικροδομής και αφετέρου στην εκτίμηση της θερμικής του αγωγιμότητας.

### ***6.1. Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες***

Το “Thermonassa I” χαρακτηρίζεται από εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες με πάχος μόλις 1-1.5 mm. Οι ιδιότητες αυτές είναι καλύτερες από τις αντίστοιχες των κλασικών πολυμερών μονωτικών (οργανικά αφρώδη), πάχους 90 mm. Ταυτόχρονα παρουσιάζει σημαντική αντοχή σε θερμική καταπόνηση μικρότερη των 200 °C.

Η εφαρμογή του εν λόγω υλικού γίνεται με πιστόλι, γεγονός που επιτρέπει ταχεία και ομοιόμορφη επικάλυψη επιφανειών. Μάλιστα ο χρόνος εφαρμογής καθώς και το συνολικό κόστος είναι συγκρίσιμα ή και καλύτερα από τα αντίστοιχα των κλασικών μονωτικών υλικών. Επίσης έναντι των τελευταίων υπερτερεί σημαντικά και στον τομέα της μεταφοράς αφού εξαιτίας της μορφής του (υγρό - χαμηλός όγκος) προσφέρει μεγάλη ευελιξία. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού.

**Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”**

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΤΙΜΗ
Χρώμα επίστρωσης	Λευκό (δυνατότητα επιλογής)
Εξωτερική όψη της επικαλυμμένης επιφάνειας	Ομοιογενής
Ελαστικότητα επίστρωσης σε κάμψη	1 mm
Αντοχή πρόσφυσης (εφαρμόζοντας δύναμη αποκόλλησης) σε επιφάνεια: -σκυροδέματος -τούβλων -χάλυβα	1.28 MPa 2.00 MPa 1.20 MPa
Αντοχή της επίστρωσης σε θερμοκρασιακή διαφορά από -40 °C έως + 60 °C	Αμετάβλητη
Αντοχή της επίστρωσης στους +200 °C για 1.5 ώρα	Όχι κιτρινισμοί, ρωγμές, εξογκώματα
Ανθεκτικότητα σκυροδέματος και μεταλλικών επιφανειών στη βόρεια κλιματική ζώνη	Min. 10 έτη
Ιδανικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	0.0012 W/(mK)
Διαπερατότητα από υδρατμούς	0.03 mg/(mhPa)
Απορρόφηση νερού (ημερήσια)	2 % vol
Θερμοκρασία επιφάνειας κατά τη διάρκεια εφαρμογής του υλικού	+7 έως +150 °C
Θερμοκρασιακό εύρος χρήσης	-60 έως +260 °C

## 6.2. Κυριότερες Εφαρμογές

Το “Thermonassa I” εξαιτίας των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, οι σημαντικότερες των οποίων συνοψίζονται ακόλουθα:

- Εφαρμογές αερίου και πετρελαίου
  - Γεώτρηση
  - Διυλιστήρια
  - Ειδικές γραμμές μεταφοράς
  - Ρεύματα νερού
  - Εναλλάκτες θερμότητας
- Σωληνώσεις μεταφοράς ατμών - νερού: ιδανικό υλικό μόνωσης σωληνώσεων για θερμοκρασίες μικρότερες των 200 °C
  - Βιομηχανίες τροφίμων και ποτών
  - Φαρμακευτικές βιομηχανίες

- Παραγωγή ενέργειας
- Νοσοκομειακά και ιατρικά κέντρα
- Ναυτιλία και Ναυπηγεία
- Εφαρμογές κλιματισμού και θέρμανσης
  - Σωληνώσεις χαλκού (1/4", 1/2", 3/4")
  - Σωληνώσεις χάλυβα, χωνευτήρια χάλυβα και χοάνες
  - Μονωτήρες σταθμών
- Εφαρμογές μόνωσης τοίχων
  - Μόνωση σε μεταλλικές δομές ουρανοξυστών
  - Κλασική μόνωση τοίχου (προτιμητέα σε μορφή σάντουιτς)
  - Άλλες οικιστικές εφαρμογές (οροφές, ισόγεια)

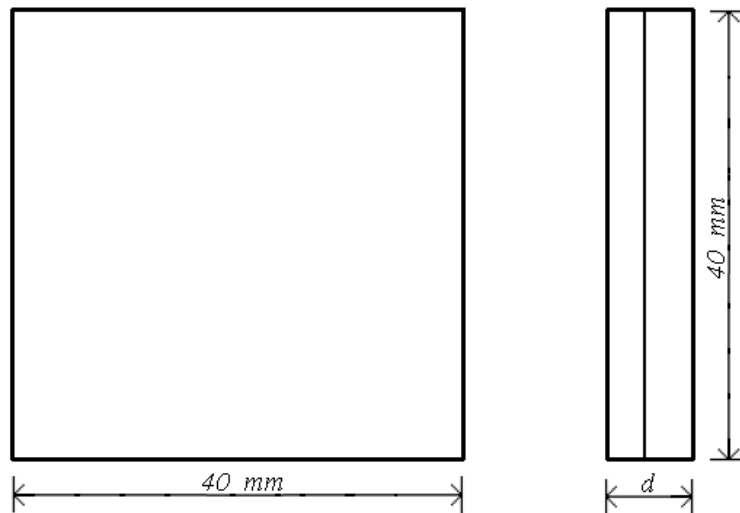


Εικόνα 31: Εφαρμογές μόνωσης σωληνώσεων με “Thermonassa I”

### **6.3. Τα Μελετώμενα Δείγματα**

#### **6.3.1. Γεωμετρία και Διαστάσεις**

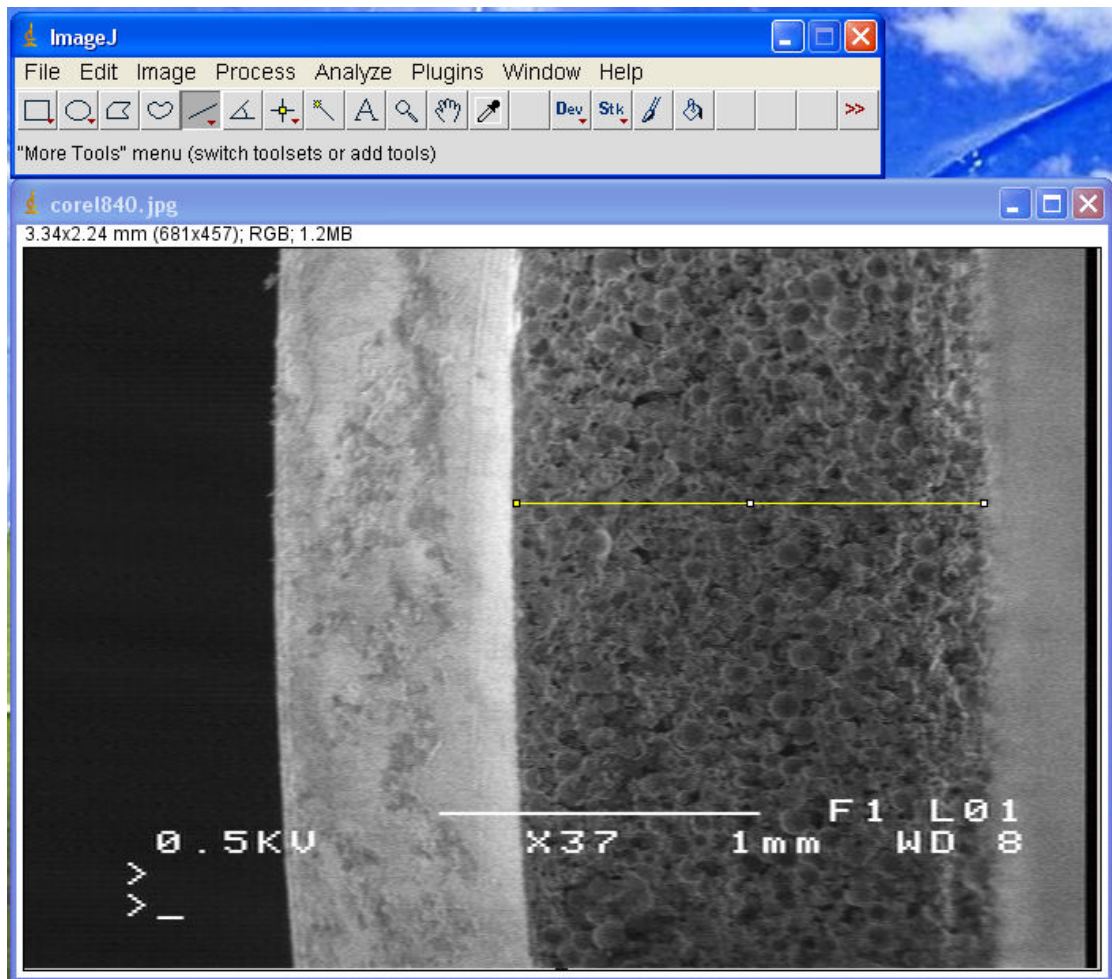
Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, εξετάστηκαν τετράγωνα δοκίμια χαλκού πλευράς 40 mm, η μία επιφάνεια των οποίων ήταν επικαλυμμένη με διαφορετικού πάχους θερμομονωτικό υλικό “Thermonassa I”.



**Εικόνα 32: Σκαρίφημα των υπό εξέταση δοκιμίων**

Σε κάθε δείγμα το πάχος του χαλκού, όπως και αυτό του θερμομονωτικού υλικού, διέφερε και για τον ακριβή υπολογισμό των επιμέρους αλλά και του συνολικού πάχους  $d$  αξιοποιήθηκαν κατάλληλες φωτογραφίες από το SEM (ακολουθούν στο Παράρτημα). Έτσι από αυτές, με χρήση του λογισμικού επεξεργασίας εικόνας ImageJ (Εικ. 33), υπολογίστηκαν τα διάφορα πάχη (Πίν. 5).

Σημειώνουμε πως εξαιτίας του περιορισμένου χώρου στο θάλαμο του SEM και της αδυναμίας στήριξης των δειγμάτων με αγώγιμη πλαστελίνη, κάθε δοκίμιο διαδοχικά στερεώθηκε κάθετα χρήσει ειδικής κατασκευής από plexiglass και τοποθετήθηκε στη συνέχεια εντός του θαλάμου. Κατά την εισαγωγή και εξαγωγή των δοκιμίων στο θάλαμο ήταν αναγκαίο το «σπάσιμο» των συνθηκών κενού. Η όλη διαδικασία για τη λήψη των φωτογραφιών ήταν χρονοβόρα διότι απαιτήθηκε χρόνος κάθε φορά για την επαναφορά των συνθηκών κενού στο εσωτερικό του θαλάμου.



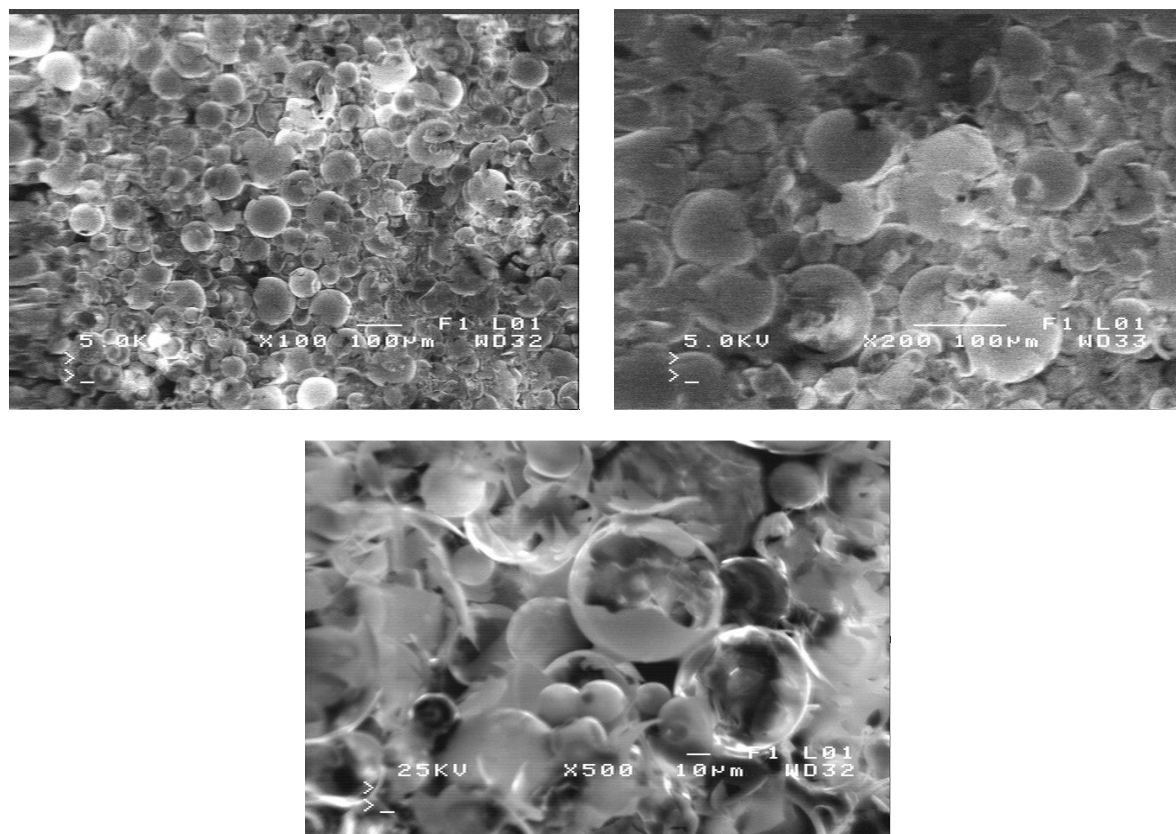
Εικόνα 33: Υπολογισμός πάχους “Thermonassa I” στο 6<sup>ο</sup> δοκίμιο με τη βοήθεια του λογισμικού ImageJ

Πίνακας 5: Αναλυτικό πάχος εξεταζόμενων δοκιμίων

Δοκίμιο	Πάχος (mm)		
	“Thermonassa I”	Χαλκού	Συνολικό <i>d</i>
1	0.897	0.589	1.486
2	0.932	0.204	1.136
3	1.305	0.353	1.658
4	0.878	0.675	1.553
5	1.450	0.575	2.025
6	1.463	0.749	2.212

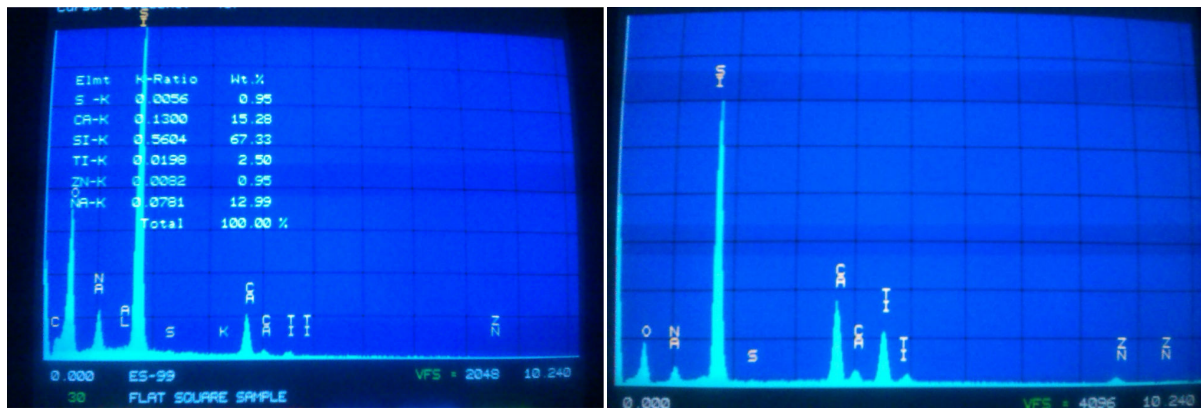
### 6.3.2. Μικροδομή

Από τη μελέτη της μικροδομής του θερμομονωτικού υλικού παρατηρούμε ότι δεν παρουσιάζει ομοιογένεια στη δομή του και αποτελείται από κενές μικρόσφαιρες διαφορετικού μεγέθους.



Εικόνα 34: Λεπτομέρειες της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” χρήσει SEM

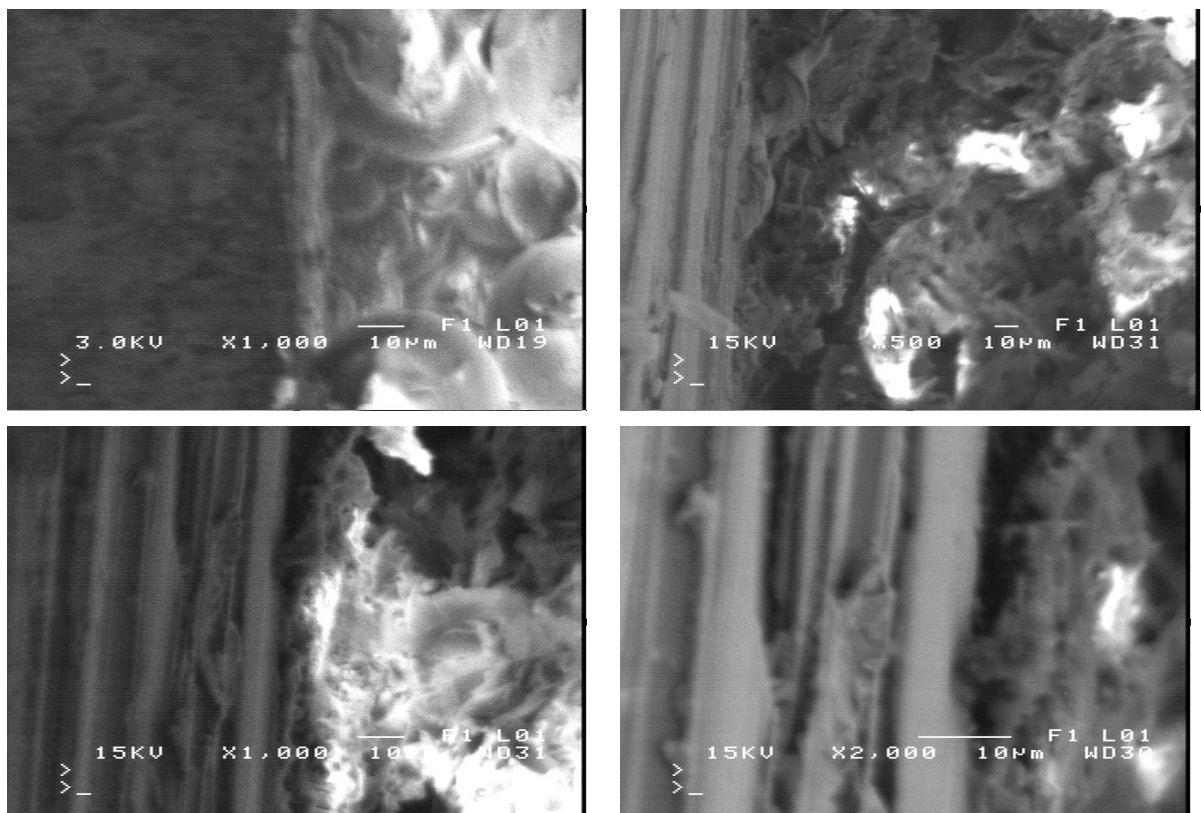
Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X που δημιουργούνται στην επιφάνεια μελέτης από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων, είναι δυνατή η στοιχειομετρική μικροανάλυση του υλικού EDS, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Στο φάσμα των ακτίνων X υψηλότερο ποσοστό καταλαμβάνει το πυρίτιο (Εικ. 35). Οι καλές μονωτικές ιδιότητες του “Thermonassa I” αποδίδονται στην παρουσία μικροσφαιρών  $\text{SiO}_2$ . Οι ενώσεις οξειδίων ενδεχομένως προσδίδουν και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες στο εν λόγω υλικό.



Εικόνα 35: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων X για την ανάλυση της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”

### 6.3.3. Επιφάνεια Διεπαφής

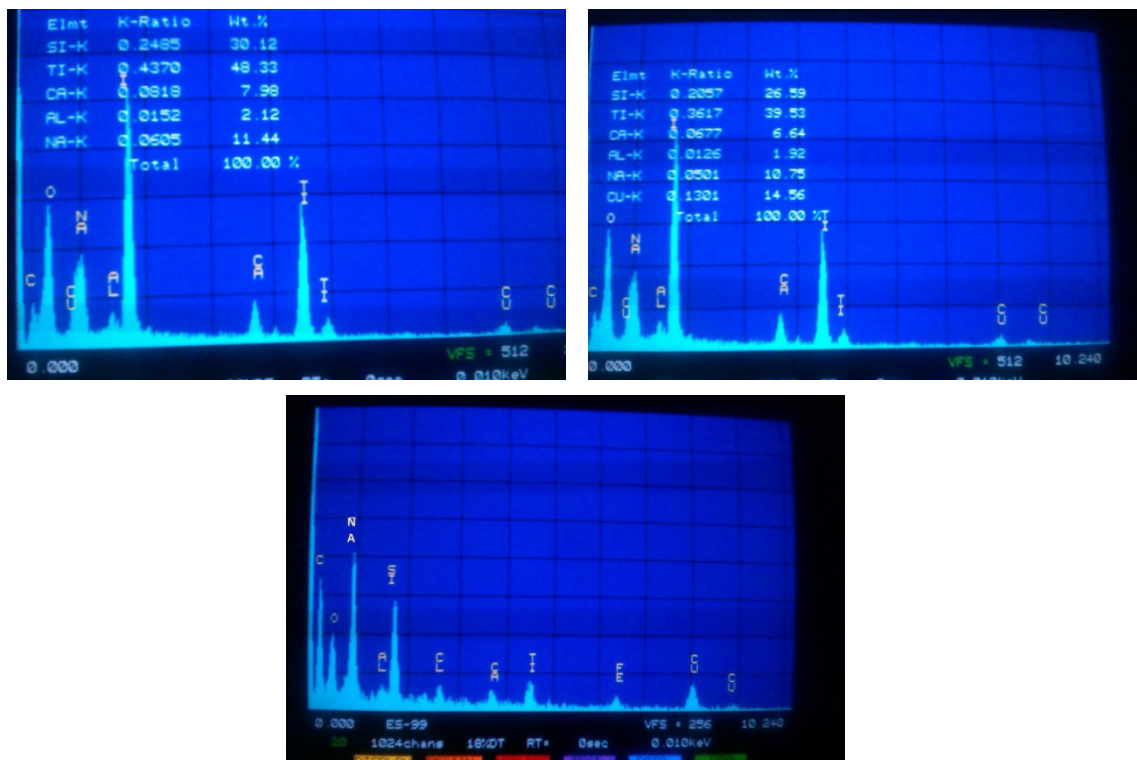
Η επιφάνεια διεπαφής χαλκού – θερμομονωτικού υλικού μελετήθηκε επίσης με SEM/EDS και στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται λεπτομέρειες αυτής υπό διαφορετική μεγέθυνση.



Εικόνα 36: Λεπτομέρειες της επιφάνειας διεπαφής χαλκού – θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” χρήσει SEM

Ακολουθεί στην επόμενη σελίδα η στοιχειακή μικροανάλυση EDS για την επιφάνεια διεπαφής.





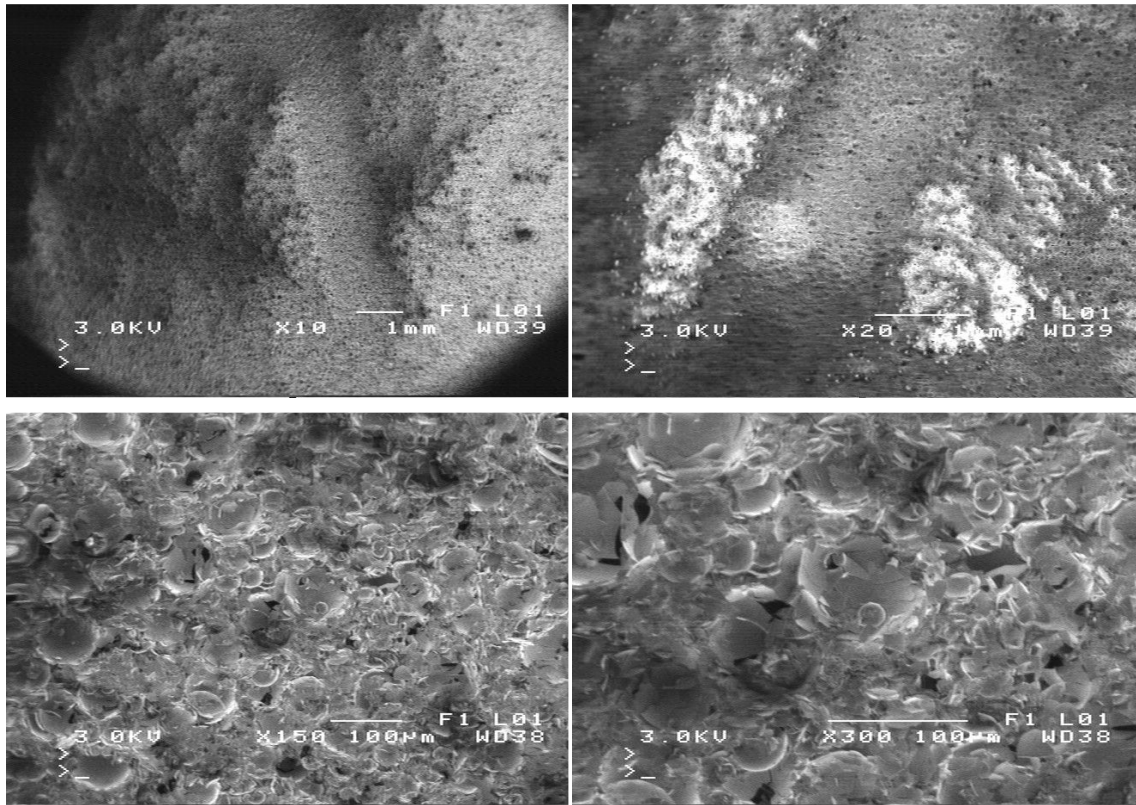
**Εικόνα 37: Χαρακτηριστικό φάσμα ακτίνων X για την ανάλυση της διεπιφάνειας χαλκού – θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”**

Στην αρχή του φάσματος η υψηλή περιεκτικότητα που συναντάται (αριστερά αυτής του άνθρακα) θα πρέπει να αμεληθεί μιας και αποδίδεται στο θόρυβο της αντλίας. Η εμφάνιση του άνθρακα στη στοιχειακή ανάλυση της επιφάνειας διεπαφής φανερώνει την ύπαρξη οργανικής ουσίας, που πιθανόν λειτουργεί ως συνδετική, μεταξύ χαλκού και θερμομονωτικού υλικού. Η παρουσία της τελευταίας θα μπορούσε να χρησιμεύει στην αποτροπή φαινομένων οξειδωσης του χαλκού.

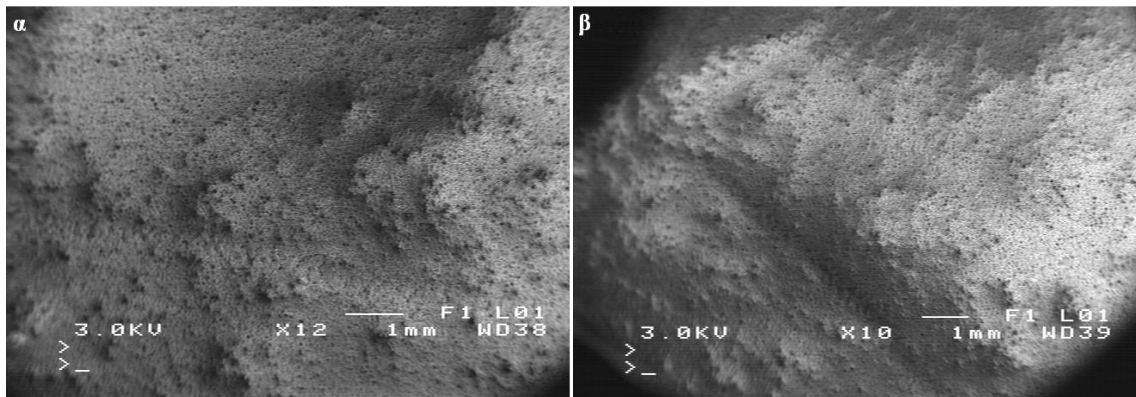
#### **6.4. Δοκιμή Χάραξης της Επιφάνειας του Υλικού**

Η σκληρότητα γενικά ανήκει στις ιδιότητες που περιγράφουν εμπειρικά τη συμπεριφορά των υλικών. Έτσι για οποιοδήποτε υλικό η ποσοτική μέτρηση της σκληρότητάς του εξαρτάται κάθε φορά από τον τύπο της εφαρμοζόμενης δοκιμής.

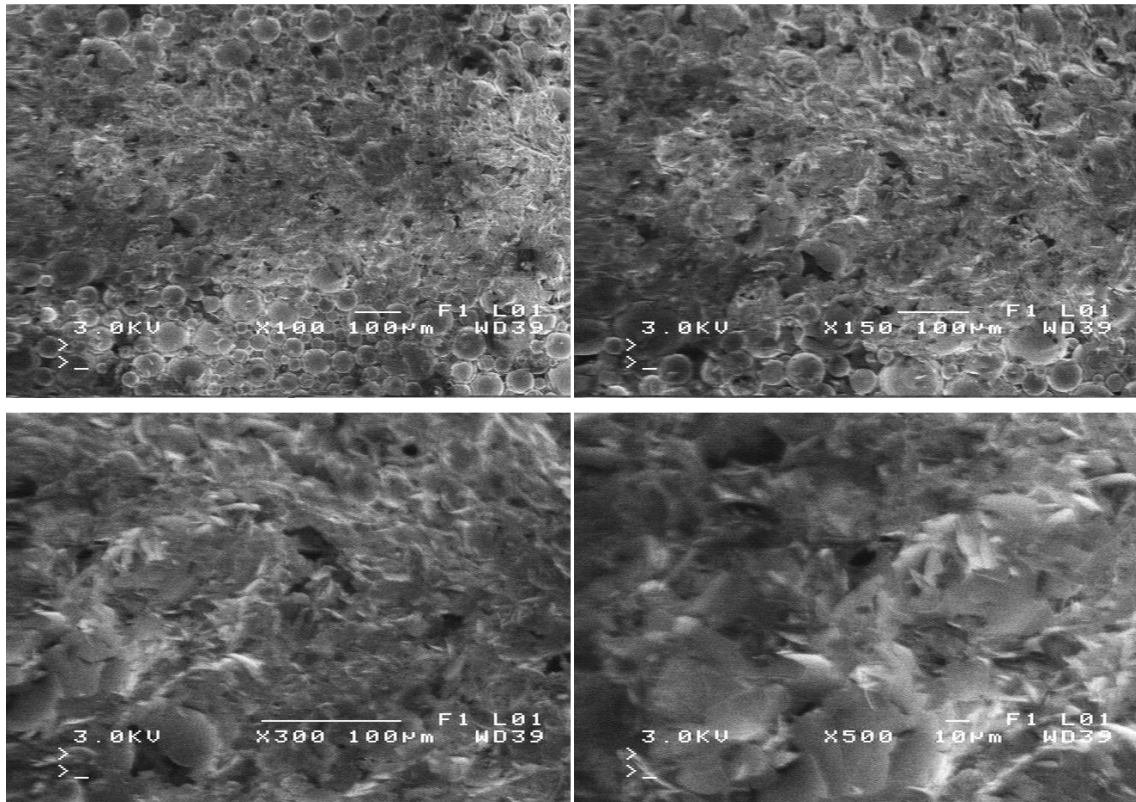
Για τα δείγματα που εξετάστηκαν οι μετρήσεις μικροσκληρότητας τύπου Vickers δεν έδιναν το αποτύπωμα της πυραμίδας πάνω στην επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού και άρα δεν οδηγούσαν σε αξιόπιστες μετρήσεις. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η δοκιμή χάραξης (scratch test) ώστε να προσδιοριστεί εμπειρικά η σκληρότητα του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I”. Σε ένα από τα δοκίμια έγινε εγχάραξη διαδοχικά με το νύχι, με πλαστικό καπάκι στυλό και τέλος με λεπτό κατσαβίδι. Στη συνέχεια το δοκίμιο αυτό τοποθετήθηκε στο SEM και ελήφθησαν οι εξής εικόνες.



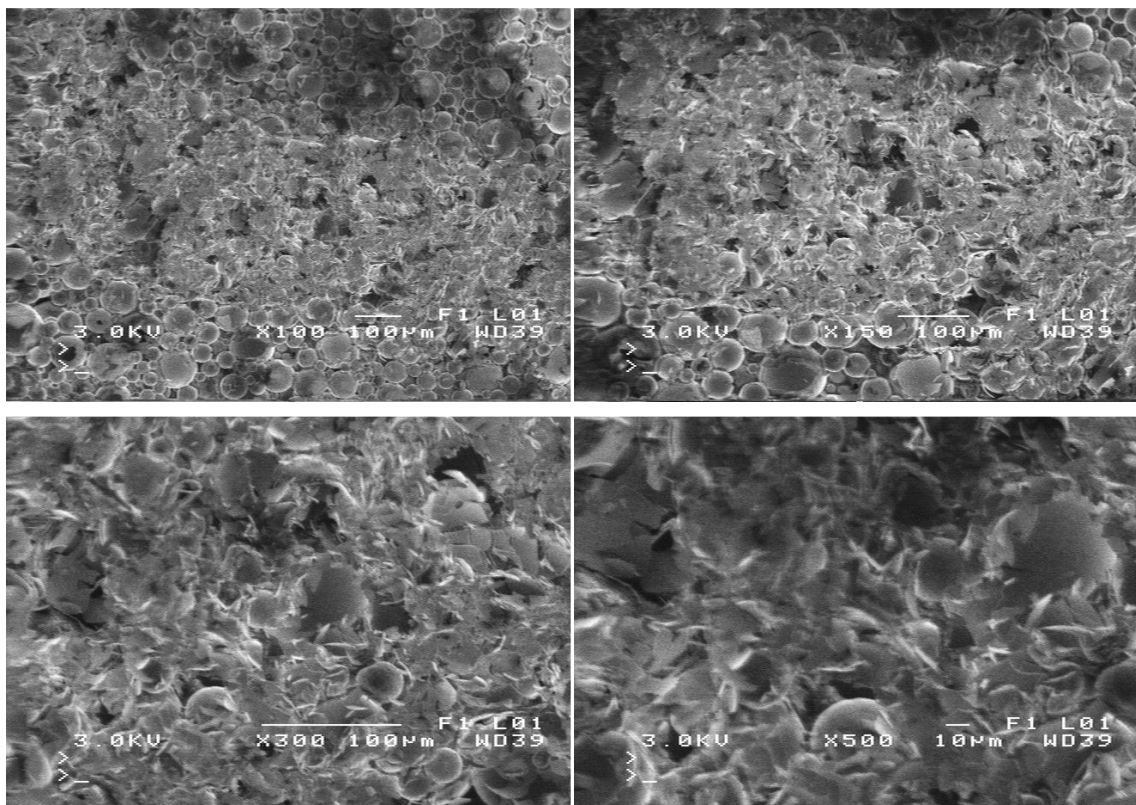
**Εικόνα 38:** Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με νύχι όπως φαίνεται χρήσει SEM



**Εικόνα 39:** Γενική άποψη των δύο εγχάραξεων, (α) με καπάκι του στυλό επάνω και κατσαβίδι κάτω και (β) με κατσαβίδι αριστερά και καπάκι του στυλό δεξιά



**Εικόνα 40: Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με καπάκι του στυλό όπως φαίνεται χρήσει SEM**

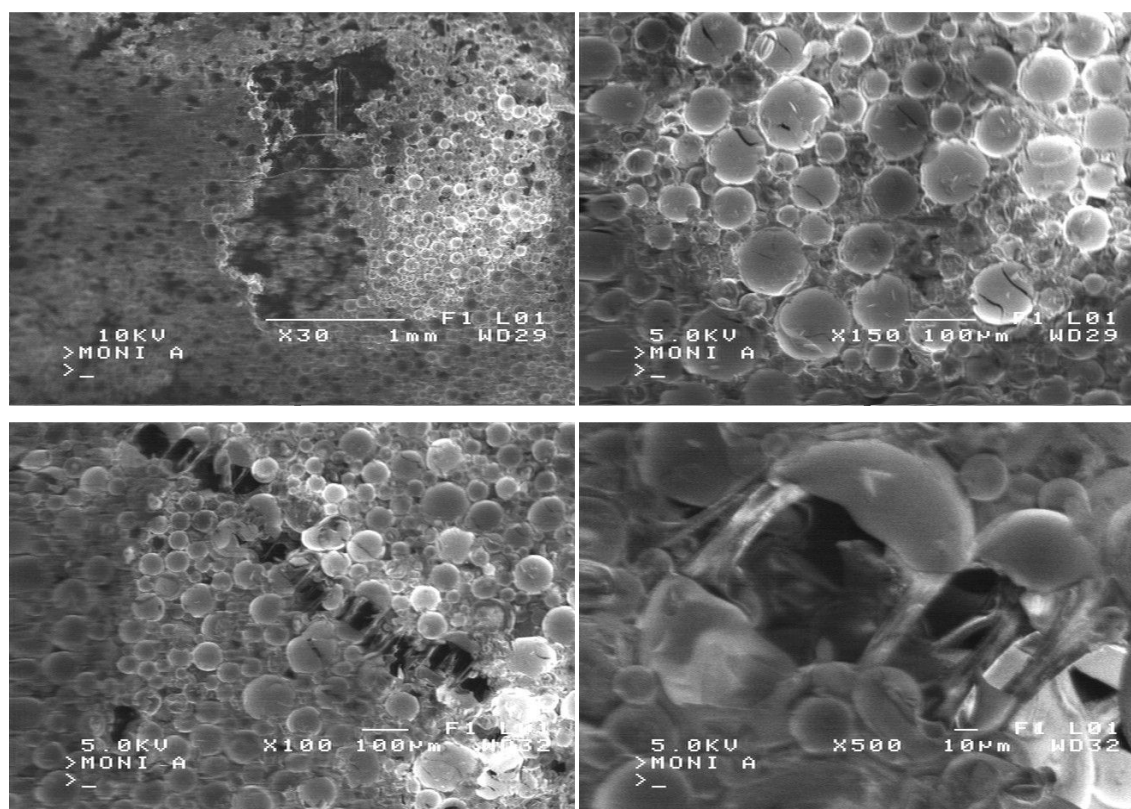


**Εικόνα 41: Η εγχάραξη της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” με λεπτό κατασαβίδι όπως φαίνεται χρήσει SEM**

Από την παρατήρηση των δοκιμών χάραξης στην επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού συμπεραίνουμε πως αυτή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη, γεγονός που αποτελεί εμφανές μειονέκτημα. Ακόμα και το νύχι του χεριού (σκληρότητα 2.5 στην κλίμακα Mohs) προκαλεί αξιοσημείωτη φθορά. Συνεπώς η χρήση του “Thermonassa I” προτείνεται για μονώσεις επίπεδων επιφανειών με την προϋπόθεση ότι δεν θα υποβάλλεται σε παρόμοιες ή άλλου είδους μηχανικές καταπονήσεις.

### 6.5. Δοκιμή σε Κάμψη

Δοκίμιο παρόμοιο με τα προηγούμενα παραμορφώθηκε μόνιμα για να ελεγχθεί η αντοχή και η συνοχή της δομής του εξεταζόμενου υλικού. Από την μελέτη της μικροδομής (περισσότερες εικόνες στο Παράρτημα) παρατηρείται αξιοσημείωτη αντοχή για τις μικρότερες μονωτικές μικρόσφαιρες διαμέτρου κάτω των 10 μm. Επομένως για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού θα ήταν ιδανική η παρουσία μικροσφαιρών SiO<sub>2</sub> διαμέτρου μικρότερης από 10 μm, ιδιαίτερα για χρήση σε εφαρμογές που υπόκεινται σε κάμψη (π.χ. εύκαμπτες σωληνώσεις).

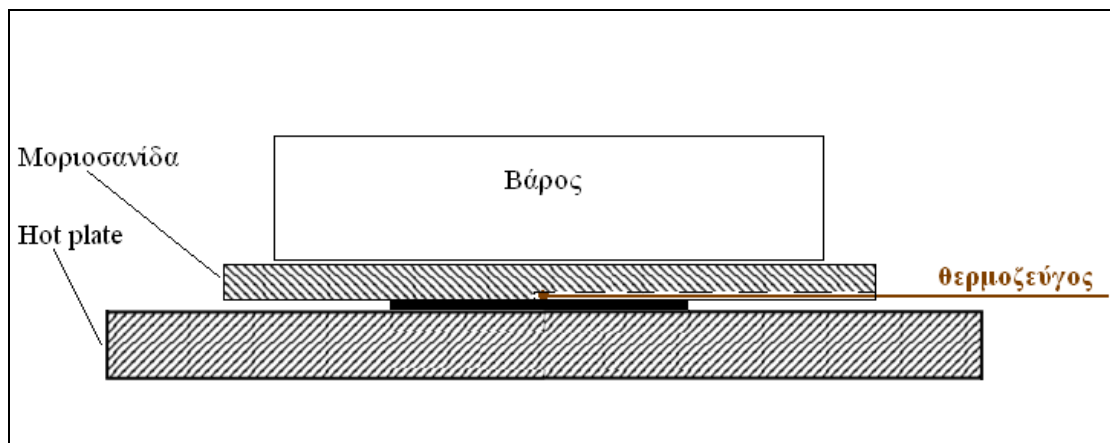


**Εικόνα 42: Λεπτομέρειες από την επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” σε δοκίμιο που είχε υποστεί κάμψη**

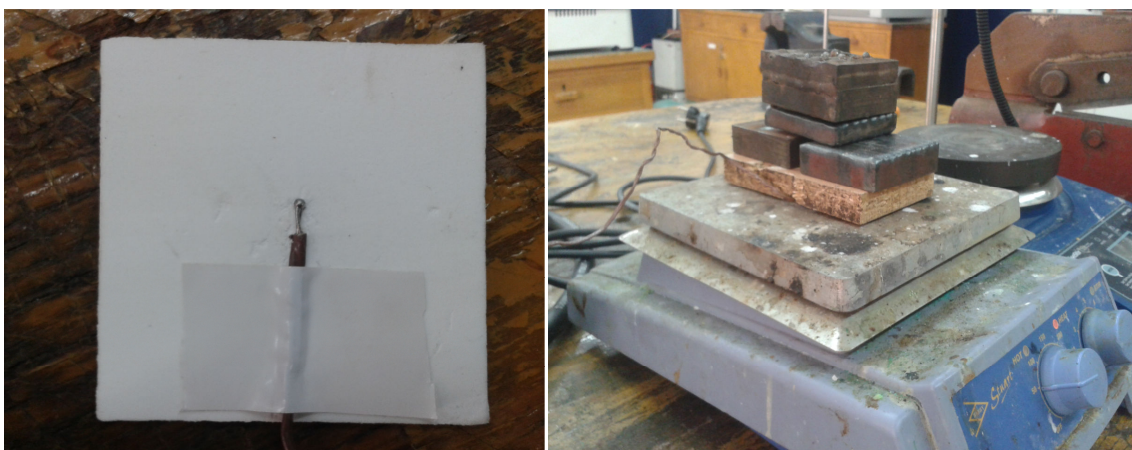
## 6.6. Εκτίμηση Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας

Η διαδικασία που ακολουθείται για το στάδιο αυτό περιγράφεται στη συνέχεια και χρησιμοποιήθηκε λόγω έλλειψης πειραματικής διάταξης που να βασίζεται, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς, σε κάποια πιστοποιημένη μέθοδο μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.

Στο κέντρο της πλευράς του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” στερεώθηκε κάθε φορά με τη βοήθεια μονωτικής ταινίας θερμοζεύγος και στη συνέχεια κάθε δείγμα εναποτέθηκε με την πλευρά του χαλκού, επάνω σε συσκευή θερμαινόμενης επιφάνειας (hot plate). Για τη λήψη ορθότερων μετρήσεων θερμοκρασίας και προς αποφυγή απωλειών, προσαρμόστηκε πάνω στην επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού κατάλληλα διαμορφωμένη μοριοσανίδα και βάρος ώστε να εξασφαλιστεί καλύτερη εφαρμογή.



Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 44: (Αριστερά) δοκίμιο με στερεωμένο θερμοζεύγος στο μέσον της επιφάνειας του θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” και (δεξιά) η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

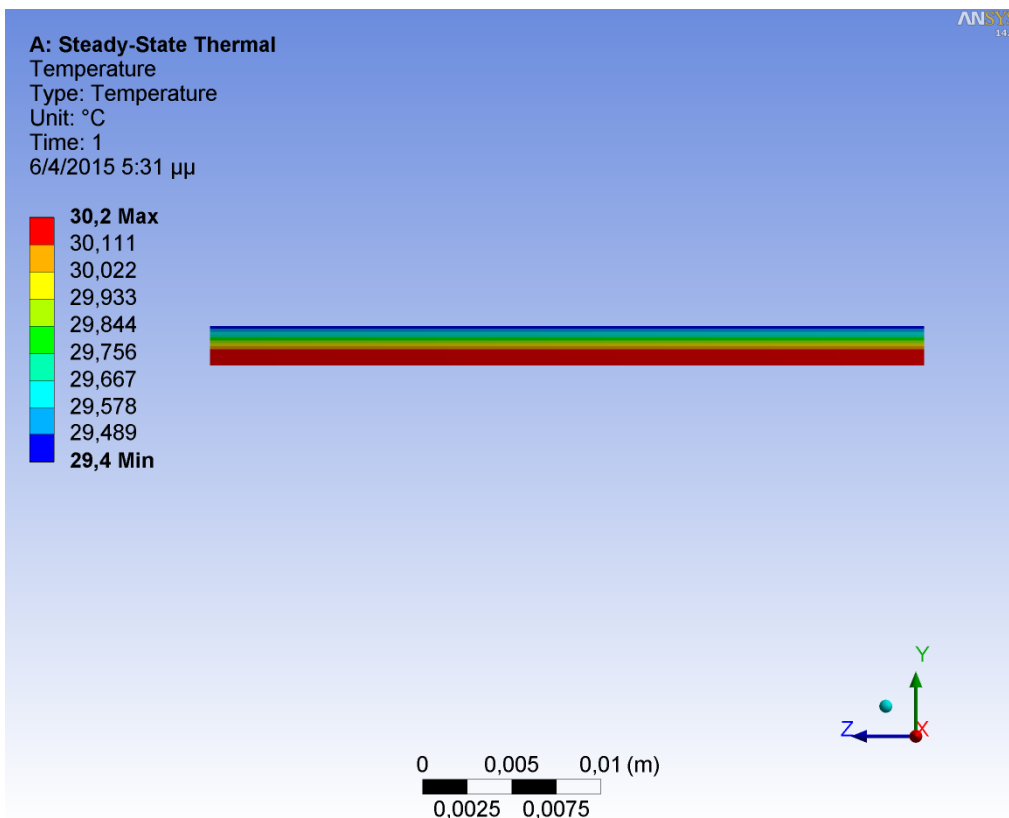
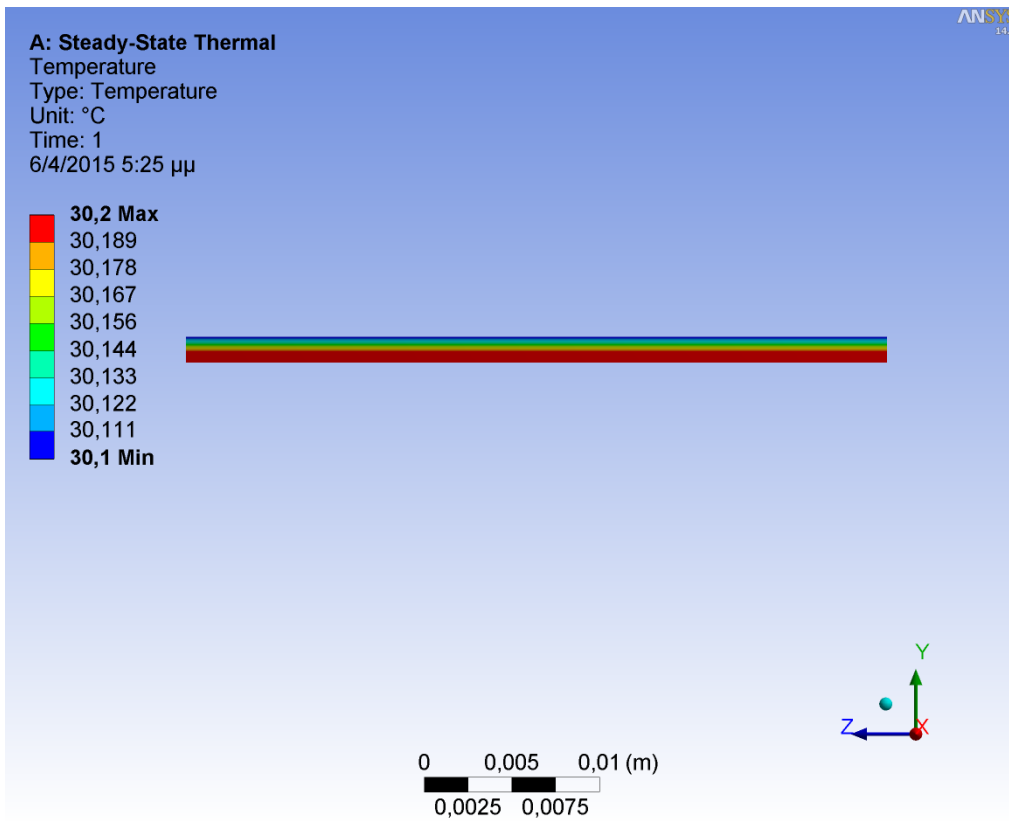
Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε συνολικά για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες της θερμαινόμενης επιφάνειας  $T_{plate}$ , για τις οποίες προέκυψαν οι μετρήσεις με το θερμοζεύγος που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ελεγχόταν από απόσταση με θερμόμετρο υπερύθρων πριν και μετά την τοποθέτηση των δοκιμίων.

**Πίνακας 6: Μετρήσεις με θερμοζεύγος στα δοκίμια χαλκού - θερμομονωτικού υλικού “Thermonassa I” για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες της θερμαινόμενης επιφάνειας**

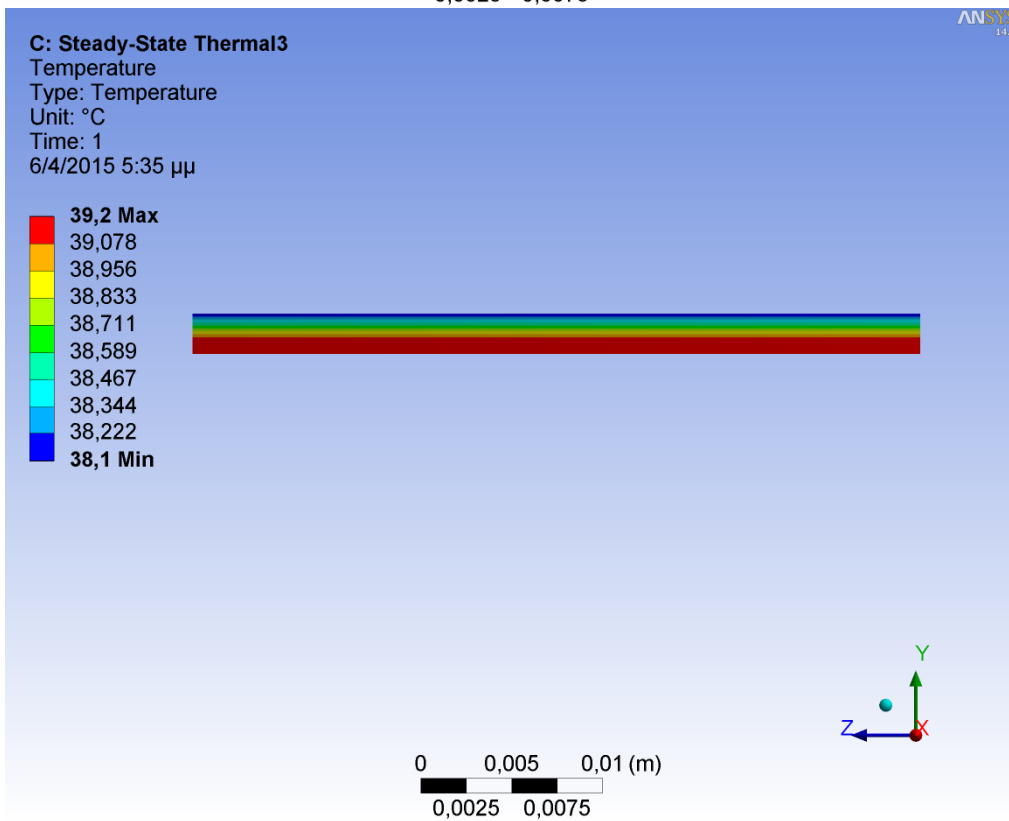
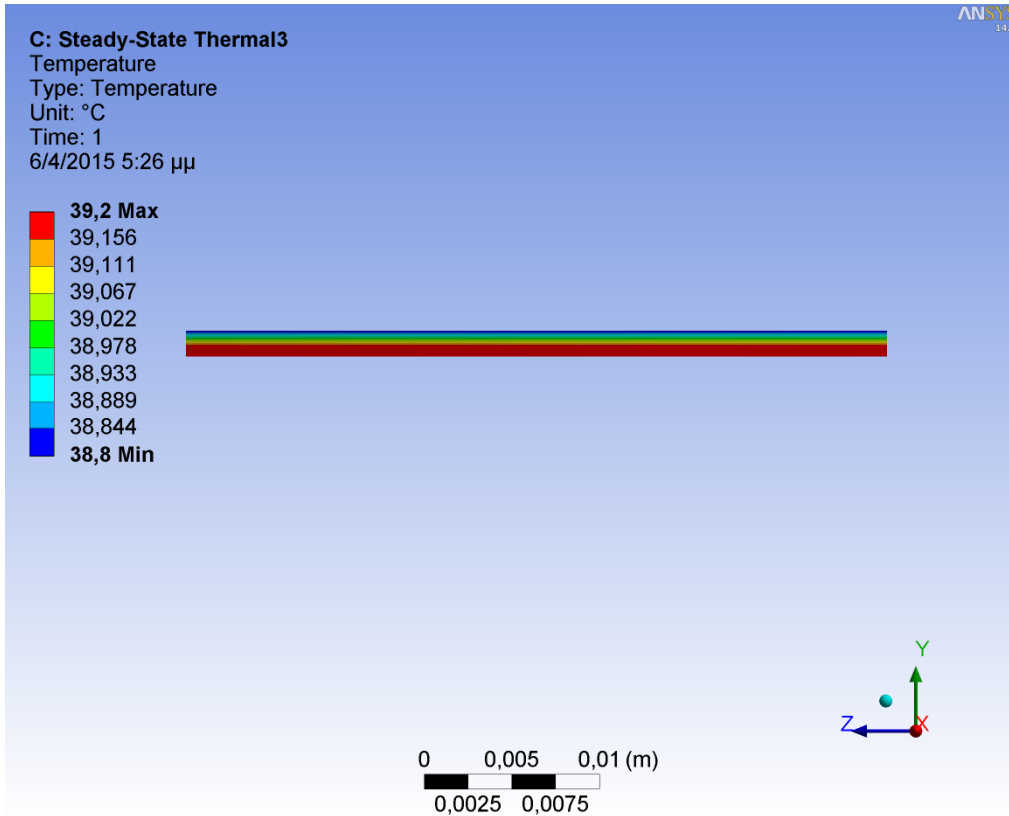
Δοκίμιο	Μέτρηση θερμοζεύγους (°C)		
	$T_{plate}=30.2$ °C	$T_{plate}=39.2$ °C	$T_{plate}=51.4$ °C
1	30.1	38.8	48.8
2	30.1	38.8	49.0
3	30.0	38.3	48.6
4	29.8	38.4	48.8
5	29.8	38.3	48.5
6	29.4	38.1	46.1

Για κάθε μία θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας υλοποιήθηκε ενδεικτικά, προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας εντός των δοκιμίων 1 και 6 με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Για την επίλυση, οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν ήταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας και η μέτρηση του θερμοζεύγους δηλαδή οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του χαλκού και του θερμομονωτικού υλικού αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

Για το εύρος θερμοκρασίας που εξετάστηκε και για τα συγκεκριμένα πάχη δοκιμίων παρατηρήθηκε παρόμοια εικόνα, ανάλογη της καλής θερμομονωτικής ικανότητας του υλικού. Η μέση τιμή που προέκυψε για το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού από τις επιλύσεις, ήταν ίση με  $0.01 \text{ W}/(\text{mK})$ .

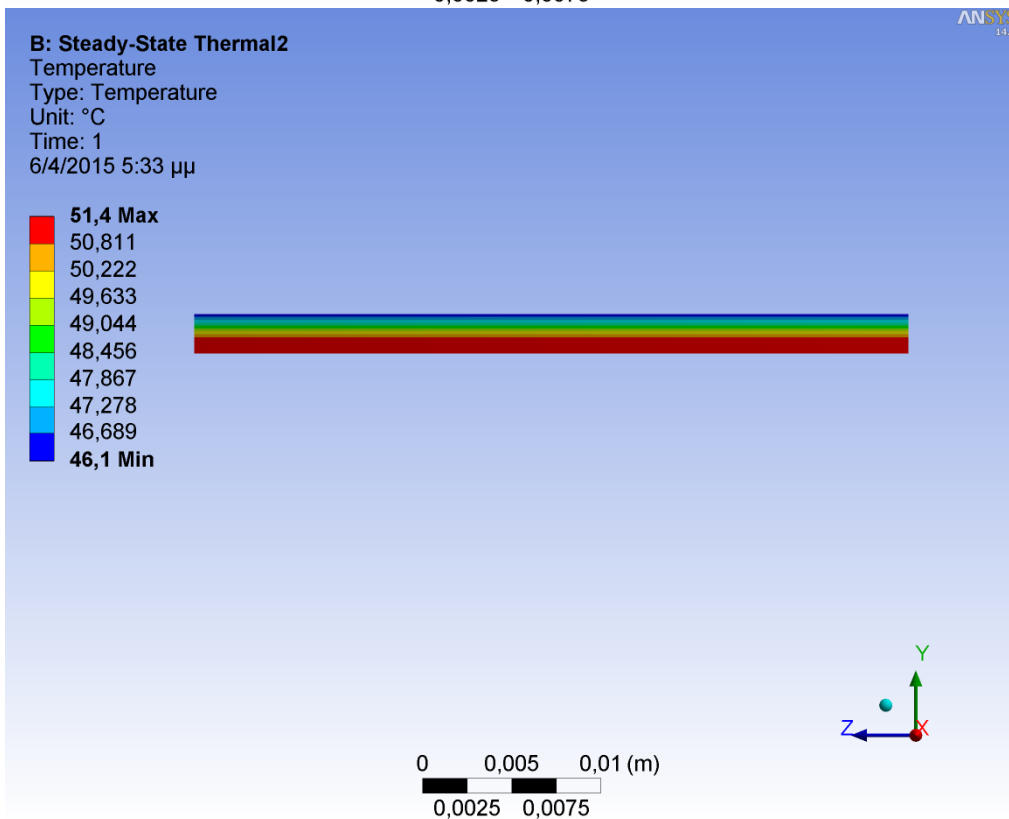
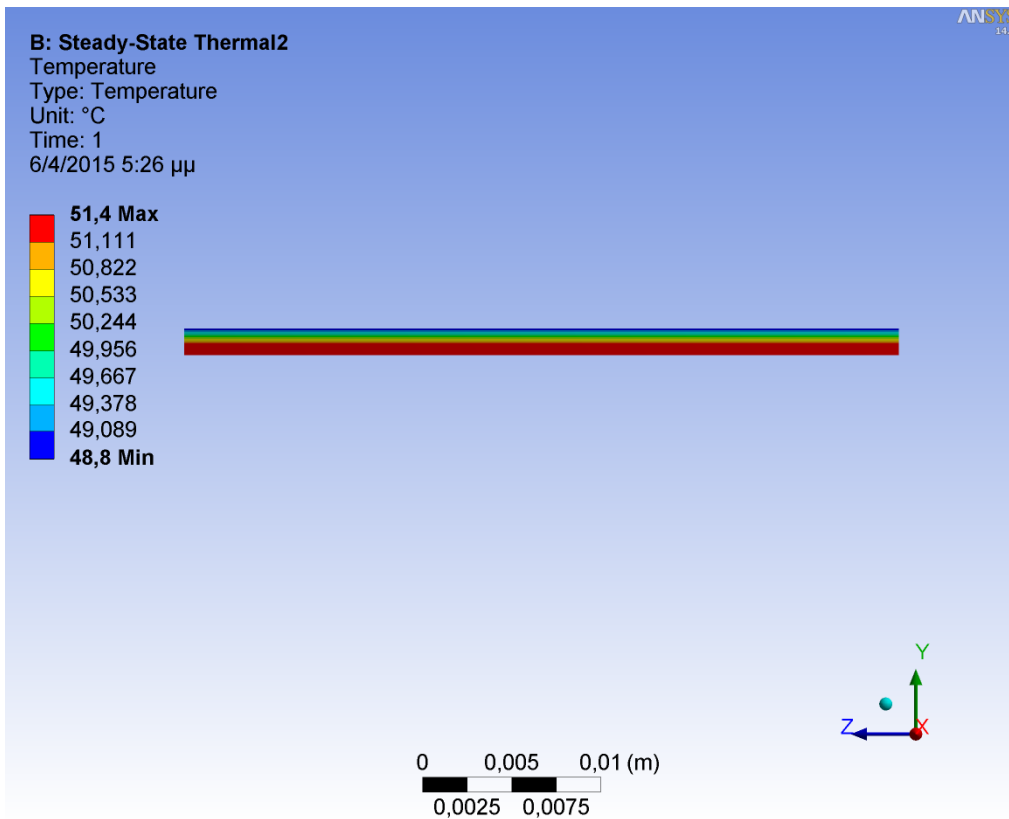


Εικόνα 45: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6<sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν  $T_{plate}=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$



Εικόνα 46: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6<sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν  $T_{plate}=39.2\text{ }^{\circ}\text{C}$





Εικόνα 47: Προσομοίωση των πεδίων θερμοκρασίας χρήσει ANSYS (επάνω) για το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο και (κάτω) για το 6<sup>ο</sup> όταν η θερμοκρασία της θερμαινόμενης επιφάνειας ήταν  $T_{plate}=51.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

# 7

## ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το “Thermonassa I” όπως προέκυψε από τη λεπτομερή εξέταση της μικροδομής του αποτελείται από κενές μικρόσφαιρες οξειδίων, κυριότερα  $\text{SiO}_2$ . Η παρουσία των τελευταίων είναι υπεύθυνη για τις καλές μονωτικές του ιδιότητες. Πρόσθετα εξαιτίας της μορφής του και του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται, υπερτερεί έναντι των συνηθισμένων θερμομονωτικών υλικών σε ευελιξία και χρόνο εφαρμογής. Η χρησιμοποίησή του εξασφαλίζει επιπλέον μεγαλύτερη ομοιομορφία στις επικαλυπτόμενες επιφάνειες.

Οι δοκιμές χάραξης στην επιφάνεια του θερμομονωτικού υλικού κατέδειξαν ένα φτωχό υλικό με αξιοσημείωτη ευαισθησία, γεγονός που αποτελεί εμφανές μειονέκτημα. Η χρήση του “Thermonassa I” προτείνεται για μονώσεις επίπεδων επιφανειών με την προϋπόθεση ωστόσο ότι δεν θα υποβάλλεται σε μηχανικές καταπονήσεις.

Από τη μελέτη της μικροδομής του εν λόγω υλικού έπειτα από δοκιμές κάμψης παρατηρήθηκε σημαντική αντοχή στις μικρότερες μονωτικές μικρόσφαιρες με διάμετρο κάτω των 10  $\mu\text{m}$ . Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού σε εφαρμογές όπως εύκαμπτες σωληνώσεις θα ήταν αναγκαία η παρουσία μικροσφαιρών  $\text{SiO}_2$  τέτοιων διαστάσεων.

Στα δοκίμια που εξετάστηκαν και για τις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του “Thermonassa I”, όπως προσδιορίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS ήταν  $0.01 \text{ W}/(\text{mK})$ . Η τιμή αυτή είναι καλύτερη από τον κοινό θερμομονωτικό συντελεστή ( $\sim 0.035 \text{ W}/(\text{mK})$ ) και καταδεικνύει την εξαιρετική θερμομονωτική ικανότητα του υλικού.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Διεθνής Βιβλιογραφία

Al-Homoud M.S., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Building and Environment*, 40:353-366

Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V., Tenpierik M.J., Grynning S., Uvslokk S. and Gustavsen A., 2010a. Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond, *Energy and Buildings*, 42:147-172

Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. and Grynning S., 2010b. Gas-filled panels for building applications: a state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 42:1969-1975

Baetens R., Jelle B.P. and Gustavsen A., 2011. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review, *Energy and Buildings*, 43:761-769

Cape J. A., Lehman G. W. and Nakata M. M., 1963. Transient Thermal Diffusivity Technique for Refractory Solids. *Journal of Applied Physics*, 34:3550

Fourier J. B., 1822. *Theory analytique de la chaleur*.

Ginnings D. C., 1960. *Standards of heat capacity and thermal conductivity*. In Paul H. Egli, ed. *Thermoelectricity*., pp. 320-341. John Wiley and Sons Inc., New York

Haupin W. E., 1960. Hot Wire Method for Rapid Determination of Thermal Conductivity. *Am. Ceram. Soc. Bull*, 39:139

Holman J.P., 2002. *Heat Transfer*. McGraw-Hill, 9th Edition

Jelle B. P., 2011. Traditional, state - of - the - art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 10

Kellner R., Mermet J.M., Otto M. and Widmer H.M., 1997. *Analytical Chemistry*. Wiley-VCH

Kloppfer W., Hutzinger O., Schmidt A., Ulf Clausen A., Astrup Jensen A. and Kamstrup O., 2003. Comparative Life Cycle Assessment of Three Insulation Materials. Research program deliverable booklet

Koui M. and Lympelopoulou Th., 2004. Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-ray Spectrometer. Additional lab notes, NTUA

Luicov A. V., 1966. *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*. Pergamon Press. Oxford, U.K.

Maglic K. D., 1984. Compendium of Thermophysical Property Measurement Method. Vol. 1

Morrow G. D., 1979. Improved hot wire thermal conductivity technique. Am. Ceram. Soc. Bull., 58(7): 687

Mittenbühler A., 1964. *Berichte Der Deutschen Keramischen Gesellschaft.*, 41:15

Papadopoulos A. M., Karamanos A. and Avgelis A., 2002. Environmental impact of insulating materials at the end of their useful lifetime, Proc. Int. Conf. Protection and restoration of the environment VI, p. 1625 - 1632, 1-5 July, Skiathos, Greece

Schieirmacher A. L., 1888. *Wiedemann Ann. Phys.*, 34

Sheffield G. S. and Schorr J. R., 1991. Comparison of Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity Methods. Ceram. Bul., 70:102

Skoog D.A., Holler F.J. and Nieman T.A., 1998. *Principles of Instrumental Analysis*. 5<sup>th</sup> ed., Harcourt Brace & Co.

Taylor R. E., 1989. Proc. 2nd Asian Thermophysical Properties Conference., 551

Taylor R.E., in: Hasselman D. P. H. and Thomas Jr. J. R. (Eds.), 1989. *Thermal Conductivity 20*. Plenum Press, NY, p. 93.

Van der Held E. F. M. and Van Drunen F. G., 1949. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica*, 15(10):865

Venkanna B.K., 2010. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New Delhi: PHI Learning.

Vozár L., 1996. A computer-controlled apparatus for thermal conductivity measurement by the transient hot wire method. *J. Therm Anal.*, 46:495

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

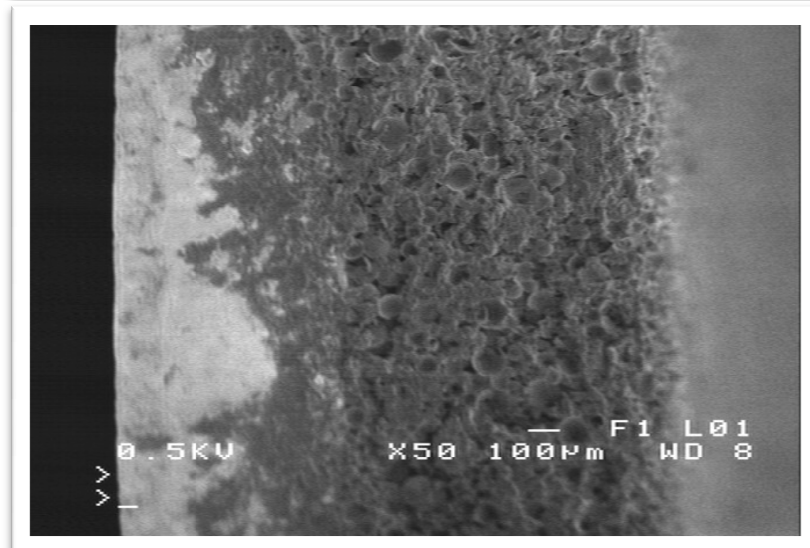
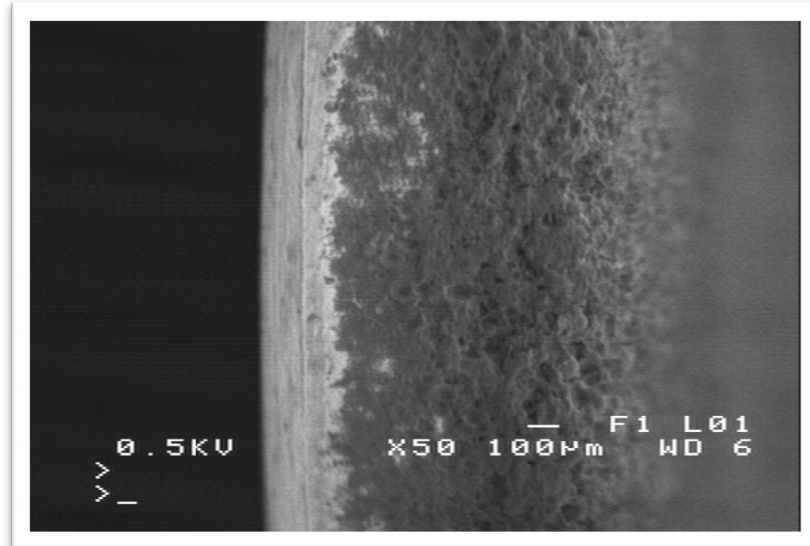
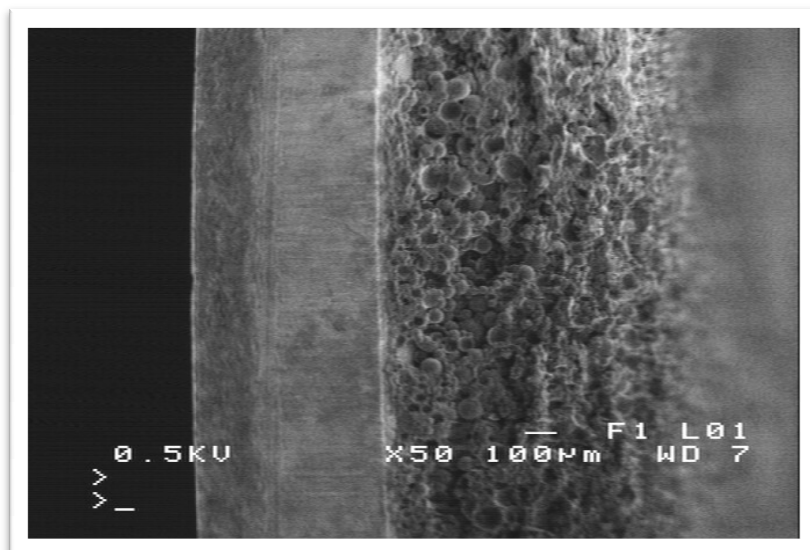
Γιαλού Α., 2004. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

Παπαδόπουλος Α.Μ. και Παπαδόπουλος Μ.Α., 2001. «Σύγχρονα θερμομονωτικά υλικά ενεργειακός σχεδιασμός κτιρίων». Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου: Κτίριο και Περιβάλλον, Αθήνα

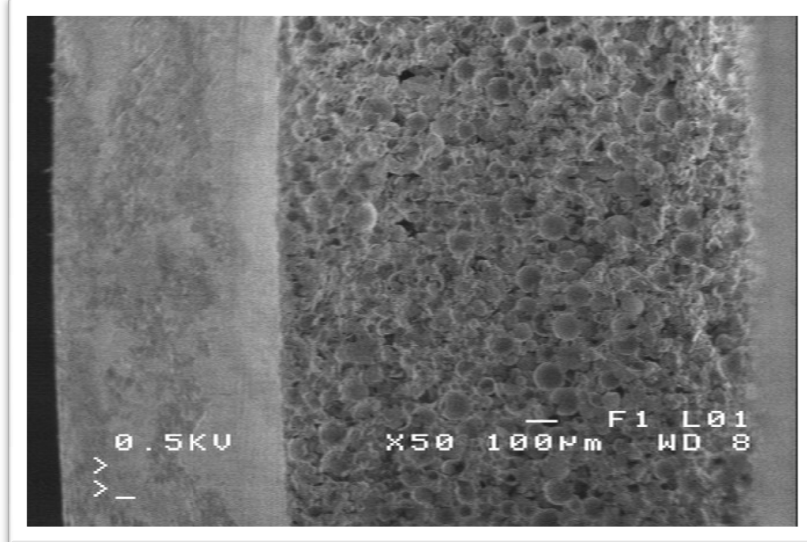
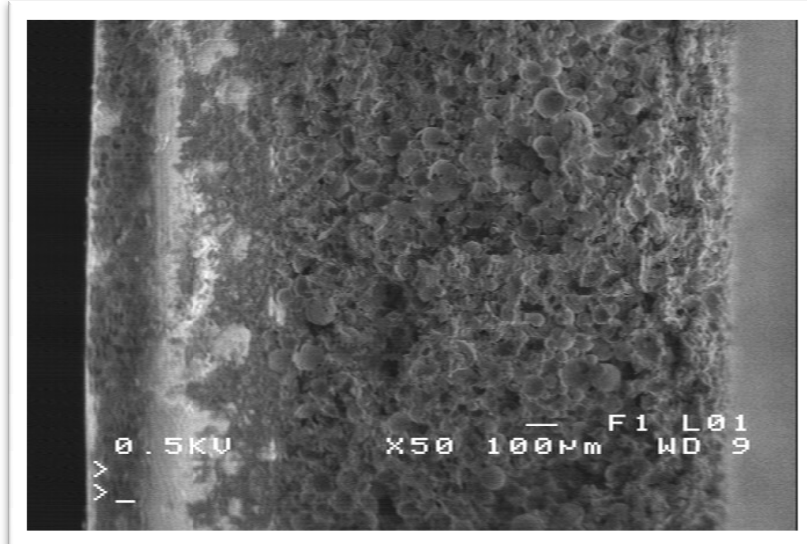
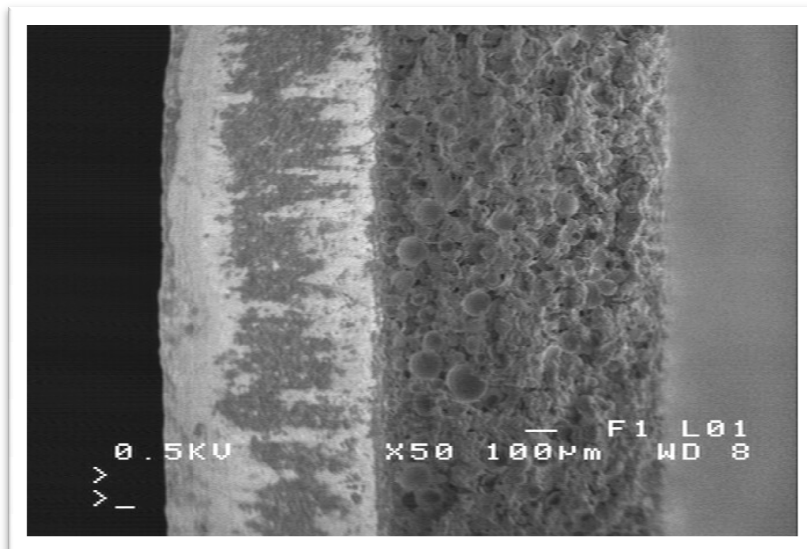
Παπαδόπουλος Α.Μ., 2004. Προδιαγραφές ιδιοτήτων θερμομονωτικών υλικών. Παραδοτέο έργου «Σχεδιασμός & Ανάπτυξη Καινοτόμων Προϊόντων Πετροβάμβακα για την Ενεργειακή Αναβάθμιση Υφισταμένων & Νεόδμητων Κτιρίων», Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης

Χριστοφόρου Ε., 2015. Τεχνική έκθεση των δοκιμών “Thermonassa I”, Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, ΕΜΠ

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



(Από πάνω προς τα κάτω) οι κάθετες όψεις των δοκιμών 1, 2, 3 χρήσει SEM



(Από πάνω προς τα κάτω) οι κάθετες όψεις των δοκιμών 4, 5, 6 χρήσει SEM

Οι λήψεις που ακολουθούν αφορούν το δοκίμιο που υποβλήθηκε σε κάμψη

