



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):  
**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ**  
**ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΥΑΛΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΗΜΗΤΡΑΣ Β. ΚΑΡΒΟΥΝΗ**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012**



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

## **ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΥΑΛΟΥ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΗΜΗΤΡΑΣ Β. ΚΑΡΒΟΥΝΗ**

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΑ</b>	<b>Σελ.</b>
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
1. Εισαγωγή.....	8
2. Βασικές θεωρητικές αρχές – προηγούμενες συναφείς μελέτες.....	9
2.1 Βασικές θεωρητικές αρχές .....	9
2.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	9
2.1.2 Εμφάνιση και εξέλιξη του αρχιτεκτονικού υαλοπίνακα.....	11
2.1.3 Γυαλί.....	16
2.1.4 Παρασκευή γυαλιού.....	16
2.1.5 Φυσικές ιδιότητες του γυαλιού.....	17
2.1.6 Βασικοί τύποι γυαλιού.....	17
2.1.7 Ειδικό τύποι γυαλιού.....	20
2.1.8 Κοινό γυαλί.....	21
2.1.9 Το ιξώδες.....	21
2.1.10 Ανοπτημένο γυαλί.....	21
2.1.11 Γυαλί με επαναφορά.....	22
2.1.12 Σκληρομένο γυαλί.....	23
2.1.13 Θερμικά ενισχυμένο γυαλί.....	23
2.1.14 Σύνθετο γυαλί.....	24
2.1.15 Διαστασιολόγηση δομικού γυαλιού.....	25
2.1.16 Σύνθεση.....	30
2.1.17 Διαδικασία παραγωγής.....	31
2.1.18 Φυσικές ιδιότητες γυαλιού.....	34
2.1.19 Κίνδυνος θραύσης από θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό.....	34

2.1.20	Θερμική αγωγιμότητα & Θερμική τάση.....	35
2.1.21	Θερμοδιαπερατότητα.....	36
2.1.22	Δείκτης διάθλασης.....	36
2.1.23	Φωτοπερατότητα.....	36
2.1.24	Ο υαλοπίνακας στις σύγχρονες κατασκευές.....	36
2.1.25	Φως και ηλιακή ενέργεια .....	37
2.2	Προηγούμενες συναφείς μελέτες.....	41
3.	Σκοπός της παρούσης μελέτης.....	44
4.	Πειραματική διαδικασία.....	45
5.	Πειραματικά αποτελέσματα και συζήτηση.....	63
6.	Συμπεράσματα.....	102
7.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	104
8.	Βιβλιογραφία.....	105
	Βιογραφικό Σημείωμα.....	107

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίησή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΕΜΠ της Σχολής Μεταλλουργών Μηχανικών, κ. Δρ. Χρήστο Παναγόπουλο, που μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας και μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω ένα χρήσιμο και ενδιαφέρον θέμα, καθώς επίσης και για την άριστη καθοδήγηση και την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της μελέτης.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους Διδάκτορες Ηρώ Τσοπάνη, Έλενα Κυριακοπούλου και Πάνο Ορφανό για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας για τη δική τους συμβολή, καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την πολύτιμη ηθική υποστήριξη που μου παρείχε.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά υάλου νατρίου σε θερμοκρασιακούς αιφνιδιασμούς, σε θερμοκρασία 150°C, 250°C, 350°C και 450°C στους 10, 20, 30 και 40 κύκλους.

Η διάρκεια κάθε κύκλου ήταν δέκα λεπτά. Πέντε λεπτά ήταν η διάρκεια παραμονής εκάστου δοκιμίου μέσα στον κλίβανο και πέντε λεπτά έξω απ' αυτόν.

Στην ίδια θερμοκρασία και στους ίδιους κύκλους, στο τέλος κάθε πειράματος, ένα δοκίμιο παρέμεινε στον αέρα και ένα άλλο εμβαπτίσθηκε στο νερό, σε θερμοκρασία δωματίου.

Μελετήθηκαν όλα τα δοκίμια στο οπτικό μικροσκόπιο και συγκρίθηκαν με το μη κατεργασμένο δοκίμιο, το οποίο δεν είχε υποστεί τη διαδικασία του πειράματος, δηλαδή του θερμομηχανικού αιφνιδιασμού.

Τα δοκίμια που παρέμειναν στον αέρα παρατηρήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ώστε να ληφθούν πληροφορίες που αφορούσαν κυρίως τη μορφολογία και τη σύσταση της επιφάνειάς τους. Ακολούθησε η σύγκριση με το μη κατεργασμένο δοκίμιο.

Τα ίδια δοκίμια εξετάσθηκαν στην Περίθλαση ακτίνων - Χ για χαρακτηρισμό της δομής τους και τον προσδιορισμό των επί μέρους φάσεών τους.

## ABSTRACT

In this thesis we studied the behavior of soda - lime glass to thermal shock, with temperature of 150°C, 250°C, 350°C, 450°C and for 10, 20, 30 and 40 cycles.

The duration of each cycle was ten minutes. Each specimen was left for five minutes inside the furnace and for five minutes outside of the furnace.

At the same temperature and for the same cycles at the end of each experiment, one sample remained in the air and another was quenched into water at room temperature.

All specimens were studied under optical microscope and compared with the untreated specimen, which had not undergone the process of the experiment.

The specimens that remained in the air were observed in the scanning electron microscope (SEM) to obtain information related mainly to the morphology and the composition of the surface layers. Then the specimens were compared with the untreated specimens.

The same specimens were examined in the X-Rays Diffraction for the characterization of the structure and the identification of individual phases.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ στην <<Επιστήμη και Τεχνολογία υλικών>>.

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που καλείται να επιλύσει ο τομέας της τεχνολογίας των υλικών είναι ο θερμοκρασιακός αιφνιδιασμός. Είναι ο αυστηρότερος τύπος δοκιμής όλων των σχετικών με τη θερμοκρασία δοκιμών, δεδομένου ότι περιλαμβάνει ένα υψηλό ποσοστό της αλλαγής της θερμοκρασίας. Αυτός εκτελείται για να μελετηθεί η δυνατότητα ενός υλικού για το αν μπορεί να αντισταθεί στις ξαφνικές αλλαγές στη θερμοκρασία.

Η μεγάλη σημασία που αποδίδεται στο φαινόμενο του θερμοκρασιακού αιφνιδιασμού έγκειται στο γεγονός ότι, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων των υλικών. Ως εκ τούτου, η μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών στις παραπάνω συνθήκες παρουσιάζει σημαντικό επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον.

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η μελέτη και παρατήρηση της συμπεριφοράς υάλου με την επιβολή θερμομηχανικής καταπόνησης σε διάφορες θερμοκρασίες και κύκλους, με παραμονή του δοκιμίου στον αέρα αλλά και με εμβάπτισή του στο νερό. Γίνεται χρήση οπτικού μικροσκοπίου, ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) και περίθλασης ακτίνωνΧ (XRD).

Η μεταπτυχιακή μελέτη εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του ΕΜΠ.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

### 2.1 Βασικές θεωρητικές αρχές

#### 2.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Το γυαλί σαν υλικό υπήρχε ανέκαθεν στη φύση, σχηματισμένο από το λιώσιμο συγκεκριμένων πετρωμάτων, σε συνθήκες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (κυρίως μετά από ηφαιστειακές εκρήξεις). Πρόκειται για τον οψιδιανό (obsidian), ένα σκούρο αδιαφανές πέτρωμα, που χρησιμοποιήθηκε πριν από χιλιάδες χρόνια για την κατασκευή κοσμημάτων, αγγείων, εργαλείων και όπλων. Μέχρι σήμερα δεν έχει προσδιοριστεί πότε και πού ξεκίνησε η παραγωγή γυαλιού από τον άνθρωπο.

Αρχαιολογικά ευρήματα στην Αίγυπτο δείχνουν ότι εκεί ήδη έλιωναν γυαλί πριν από 7.000 χρόνια, πιθανολογείται όμως ότι οι πρώτοι που κατασκεύασαν γυαλί πρέπει να ήταν οι Βαβυλώνιοι. Κατά τον αρχαίο Ρωμαίο ιστορικό Πλίνιο τον πρεσβύτερο, ο άνθρωπος έγινε μάρτυρας της παραγωγής γυαλιού από ένα τυχαίο περιστατικό.



Γύρω στα 5.000 π.Χ. στις ακτές της ανατολικής Μεσογείου, Φοίνικες, έστησαν ένα τζάκι από πέτρες «νάτρου» δηλαδή ορυκτής σόδας. Η δυνατή φωτιά φαίνεται πως σιγά-σιγά έλιωσε το νάτριο των πετρωμάτων και καθώς το τήγμα ανακατεύτηκε με την άμμο, σχηματίστηκε ένα παχύρευστο ημιδιαφανές υγρό, που το πρώι ήταν σκληρό γυαλί. Είναι η πρώτη ιστορική αναφορά παραγωγής γυαλιού από ανθρώπινη δραστηριότητα.

Στην ευρύτερη περιοχή της ανατολικής Μεσογείου (Αίγυπτο, Μεσοποταμία) έχουν βρεθεί γυάλινα αντικείμενα (πιθανόν γυάλινες χάντρες), τα οποία πιστεύεται ότι χρονολογούνται από το 3.500 π.Χ. περίπου. Στην ίδια περιοχή ανήκουν και θραύσματα γυάλινων βάζων χρονολογούμενα από τον 16ο π..Χ. αιώνα, ενώ την ίδια περίοδο έχουν κατασκευαστεί τα τρία σωζόμενα βάζα που φέρουν το όνομα του Φαραώ Θούτμοσις του τρίτου (1504-1450 π.Χ.).

Στην Ελλάδα το γυαλί πρωτοεμφανίζεται κατά τον 14ο π.Χ. αιώνα, στα νησιά του Αιγαίου και τις Μυκήνες. Το γυαλί αναφέρεται σαφώς για πρώτη φορά από τον Πλάτωνα (Τιμαίος 61c). Πάντως στον ελλαδικό χώρο δεν είναι γνωστό κανένα αξιόλογο κέντρο παρασκευής γυαλιού, πιθανόν επειδή δεν υπήρχε η πρώτη ύλη (πυριτική άμμος).

Κατά την πρώτη π.Χ. χιλιετία, η υαλουργία έγινε ευρύτερα γνωστή στον κόσμο και συντελέστηκαν αρκετές βελτιώσεις. Οι υαλουργοί έμαθαν να παράγουν διάφανο ή χρωματιστό γυαλί και να βελτιώνουν την αντοχή του γυαλιού προσθέτοντας διάφορα υλικά. Παρ' όλα αυτά, η παραγωγή του γυαλιού συνέχισε να είναι μια δύσκολη διαδικασία και τα προϊόντα από γυαλί χρησιμοποιούνταν κυρίως από τις βασιλικές οικογένειες ή σε θρησκευτικές τελετές.

Το πρώτο εγχειρίδιο παραγωγής γυαλιού, χρονολογείται από το 650 π.Χ. περίπου. Οδηγίες, σε σφηνοειδή γραφή, για το πώς μπορεί να παραχθεί γυαλί, περιλαμβάνονται σε πήλινες πλάκες της βιβλιοθήκης του βασιλιά των Ασσυρίων Ασουρμπανιπάλ (669-626 π.Χ.) «Ανακατέψτε 60 μέρη άμμο, 180 μέρη στάχτες από θαλασσινά φυτά και 5 μέρη κιμωλία, βάλτε τα στο καμίνι και θα πάρετε γυαλί».

Σταθμό στην παραγωγή γυάλινων αντικειμένων αποτέλεσε η ανακάλυψη του φυσήματος, κάπου ανάμεσα στο 27 π.Χ. και στο 14 μ.Χ. το οποίο αποδίδεται σε Σύριο υαλουργό από την περιοχή της Σιδώνας. Ο μακρύς λεπτός μεταλλικός σωλήνας που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία του φυσήματος, ελάχιστα έχει αλλάξει από τότε. Το γυαλί, μόνο τότε μπορεί να είναι διαφανές, όταν δεν έρχεται σε επαφή με άλλα πιο ψυχρά σώματα κατά τη φάση της στερεοποίησής του.

Η τεχνική του φυσητού γυαλιού επέτρεψε ακριβώς την αποφυγή αυτής της επαφής με αποτέλεσμα τα προϊόντα γυαλιού αυτής της περιόδου να είναι διαφανή. Στα τέλη του τελευταίου π.Χ. αιώνα οι αρχαίοι Ρωμαίοι άρχισαν να φυσούν γυαλί

μέσα σε καλούπια, αυξάνοντας σημαντικά την ποικιλία των σχημάτων που μπορούσαν να παραχθούν σε κοίλο γυαλί.



### 2.1.2 Εμφάνιση και εξέλιξη του αρχιτεκτονικού υαλοπίνακα

Το χυτό, επίπεδο γυαλί πρωτοεμφανίζεται τον πρώτο π.Χ. αιώνα στη Ρώμη. Το λιωμένο γυαλί χύνεται σε ξύλινα επίπεδα καλούπια που έχουν προηγουμένως βραχεί. Τα πρώτα αυτά επίπεδα γυαλιά έχουν διαστάσεις 40Χ40 εκ. και πάχος 4 έως 5 χιλιοστών. Έχουμε πλέον με τον τρόπο αυτό γυαλιά για την πλήρωση παραθύρων. Οι πρώτοι υαλοπίνακες της ιστορίας τοποθετούνται την πρώτη μ.Χ. δεκαετία, στη Ρώμη, αν και οι Ρωμαίοι δεν είχαν ακόμη ανακαλύψει κατάλληλες μεθόδους λείανσης, ώστε να παίρνουν διαφανές γυαλί.

Χυτά γυάλινα παράθυρα, έστω και χαμηλής οπτικής ποιότητας, άρχισαν έτσι να εμφανίζονται στα σημαντικότερα κτίρια στη Ρώμη καθώς και στις πολυτελείς βίλλες της Πομπηίας, παρέχοντας προστασία των κατοίκων τους από καιρικά φαινόμενα (άνεμο, βροχή, κρύο κλπ) ενώ επέτρεπαν στο φως να μπαίνει μέσα. Αυτός παραμένει και σήμερα ο βασικός προορισμός των υαλοπινάκων.

Λίγο αργότερα οι Ρωμαίοι παράγουν τους πρώτους καθρέπτες, επιστρώνοντας τη μια πλευρά των υαλοπινάκων με μόλυβδο. Η πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας έχει σα συνέπεια όχι μόνο την ανάσχεση της προόδου στην τεχνολογία παρασκευής γυαλιού, αλλά και την οπισθοδρόμηση, καθώς η δραστηριότητα μειώνεται δραστικά μεταφερόμενη σταδιακά στη Βυζαντινή Αυτοκρατορία κυρίως στα μοναστήρια και σε περιοχές της κεντρικής Ευρώπης. Χαρακτηριστική συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι τα πρώτα παράθυρα που ντύνονται με γυαλί, ήταν αυτά των εκκλησιών.

Οι υαλώσεις στις εκκλησίες απέκτησαν σύντομα διακοσμητικό ρόλο με την ανάπτυξη της τεχνοτροπίας του ζωγραφιστού γυαλιού που στην ουσία δεν είναι ζωγραφική πάνω στο γυαλί αλλά συναρμολόγηση έγχρωμων τεμαχίων γυαλιού και η δημιουργία παραστάσεων (βιτρό). Τα γυάλινα τμήματα συγκολλούνται με μόλυβδο. Αν και στη Δυτική Ευρώπη το γυαλί έχει καταστεί και πάλι ένα δυσεύρετο προϊόν, η Βυζαντινή υαλοουργία εισέρχεται βαθμηδόν σε πορεία ανάπτυξης και εξέλιξης.

Μια νέα μέθοδος παραγωγής επίπεδου γυαλιού κάνει την εμφάνισή της περί το 650 μ.Χ. αποδιδόμενη σε Σύριους υαλοουργούς. Φυσώντας έφτιαχναν μια κοίλη γυάλινη σφαίρα την οποία άνοιγαν από την αντίθετη του σωλήνα μεριά. Το γυαλί έπαιρνε ένα κωνικό σχήμα ( σαν καμπάνα) με την κορυφή του στο σωλήνα. Στη συνέχεια περιστρέφανε γρήγορα το σωλήνα ανάμεσα στις δυο τους παλάμες, κάνοντας το ζεστό ακόμα γυαλί να ανοίξει τελείως σε σχήμα επίπεδου δίσκου και να απλώσει (μέχρι μια περιορισμένη φυσικά διάμετρο). Πρόκειται για μια μέθοδο παραγωγής φτηνού επίπεδου γυαλιού η οποία χρησιμοποιήθηκε για πολλούς αιώνες έκτοτε.



Γύρω στα 1.000 μ.Χ. έχουμε σημαντικές αλλαγές στην τεχνολογία του γυαλιού όταν αναπτύσσεται από Γερμανούς υαλοουργούς, μια νέα μέθοδος παραγωγής επίπεδου γυαλιού, η οποία εξελίχθηκε δύο αιώνες μετά από Βενετούς τεχνίτες. Φυσώντας έφτιαχναν μια κοίλη γυάλινη σφαίρα την οποία ταλάντευαν κάθετα, κρατώντας την από τον σωλήνα. Η βαρύτητα έδινε ένα μακρόστενο σχήμα στο ζεστό γυαλί μετατρέποντάς το σ' ένα κυλινδρικό «καβούκι» μέχρι και 3 μέτρων μήκους και πλάτους 45 περίπου εκατοστών. Όσο ήταν ακόμη ζεστό το γυαλί, το έβαζαν σ' ένα επίπεδο τραπέζι, έκοβαν τα άκρα του «καβουκιού» και έσκιζαν κατά μήκος τον κύλινδρο ώστε να ανοίξει σ' ένα επίπεδο φύλλο.

Στα τέλη του 13ου αιώνα οι Βενετοί, οι οποίοι μέχρι τότε εισήγαγαν γυάλινα αντικείμενα από το Βυζάντιο, χρησιμοποιώντας Βυζαντινούς τεχνίτες, άρχισαν να αναπτύσσουν την δική τους υαλουργία. Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα η Βενετία είναι το αδιαμφισβήτητο κέντρο της υαλουργίας. Οι τεχνίτες του γυαλιού ξεπερνούν τις 10.000. Τόσο για την προστασία της πόλης από τις συχνές πυρκαγιές από τις καμίνους των υαλουργείων, όσο και για να προστατέψουν τα «επαγγελματικά μυστικά» τους, όλοι οι υαλουργοί μεταφέρθηκαν στο νησί Murano, όπου η Ιταλική Αναγεννησιακή υαλουργία συνεχίστηκε για τους επόμενους αιώνες. Πέρα από την τελειοποίηση υφιστάμενων τεχνικών, οι Βενετοί ανέπτυξαν και νέες μεθόδους όπως η τεχνική της επιμετάλλωσης με υδράργυρο παρήγαγε τους ονομαστούς σε όλη την Ευρώπη καθρέπτες.

Η πώληση των καθρεπτών αυτών απέφερε τεράστια κέρδη, πράγμα που έκανε τους άρχοντες της πόλης να ορίσουν την ποινή του θανάτου για όποιον θα αποκάλυπτε το μυστικό της παραγωγής τους. Παρ' όλες όμως τις προσπάθειες των Ιταλών, οι τεχνικές της υαλουργίας διαδόθηκαν σε όλη την Ευρώπη. Όσον αφορά τη Βρετανία, παρατηρούμε κι' εκεί εξέλιξη στην τεχνολογία του γυαλιού, τουλάχιστον κατά τους τελευταίους αιώνες.

Με την ίδρυση της Βρετανικής Εταιρίας Υαλοπινάκων το 1773, η Αγγλία κατέστη το κέντρο του κόσμου όσον αφορά τους ποιοτικούς υαλοπίνακες παραθύρων. Είναι η πρώτη φορά στην ιστορία, που το λείο, κατάλληλο για παράθυρα γυαλί, ήταν διαθέσιμο και προσιτό για τους περισσότερους ιδιοκτήτες σπιτιών. Τη δεκαετία του 1870, ο υαλουργός George Ravenscroft, χρησιμοποιώντας οξείδιο του μολύβδου αντί για ποτάσα, παράγει διαυγές γυαλί μεγάλης αντοχής το οποίο μπορεί πλέον να χαραχθεί.

Στη Γαλλία οι υαλουργοί πέρα από τη βελτίωση των Ιταλικών μεθόδων και τη χρήση μεγαλύτερων πάγκων που τους έδιναν τη δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερων υαλοπινάκων, ανέπτυξαν και διαδικασία ανόπτησης, αφήνοντας τις πλάκες γυαλιού να ψύχονται επί ημέρες μέσα σε ειδικά κατασκευασμένους φούρνους. Στα 1688, αναπτύχθηκε μια καινούργια διαδικασία για την παραγωγή επίπεδου γυαλιού κυρίως για την παραγωγή καθρεπτών, των οποίων η οπτική ποιότητα μέχρι τότε, απέιχε πολύ από το να είναι η επιθυμητή.

Το λιωμένο γυαλί χύνεται επάνω σ' ένα ειδικό τραπέζι και κυλινδρώνεται ώστε να γίνει επίπεδο. Λόγω της επαφής του με την τράπεζα και τον κύλινδρο το γυαλί είναι αρχικά θολό. Αφού κρυώσει, η πλάκα του γυαλιού τοποθετείται επάνω σ' ένα στρογγυλό τραπέζι όπου τροχίζεται (λειαίνεται) με περιστρεφόμενους μαντεμένιους δίσκους στην αρχή, με λειαντική άμμο μετά και τέλος γυαλίζεται με τσόχινους δίσκους. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν επίπεδα γυαλιά με καλή ποιότητα οπτικής περατότητας. Όταν επιστρώνονταν στη μια τους πλευρά με ένα ανακλαστικό, εύηκτο μέταλλο, μπορούσαν να παραχθούν υψηλής ποιότητας καθρέπτες.

Η Ευρωπαϊκή τεχνογνωσία στον τομέα της υαλουργίας, εισήχθη στην Αμερική, μετά την Αμερικανική Επανάσταση, αφού μέχρι τότε η Αγγλία φοβούμενη τον ανταγωνισμό απαγόρευε την υαλουργία στην Αμερική. Έτσι άρχισε σταδιακά η άνθηση της υαλουργίας και στην Αμερική.

Γύρω στις αρχές του 20ου αιώνα, οι υαλουργοί ανακάλυψαν ότι οι υαλοπίνακες μπορούσαν ξαναθερμαινόμενοι να καμπυλωθούν, ενώ αν ψύχονταν αμέσως αποκτούσαν αυξημένες μηχανικές αντοχές σε κάμψη ή σε θέρμανση κατά 400%. Αυτό ήταν και το ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για την εφαρμογή του γυαλιού στην αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία βρισκόταν στο ξεκίνημά της.

Η βιομηχανική επανάσταση επέδρασε καταλυτικά και στον τομέα της παραγωγής αρχιτεκτονικού γυαλιού τόσο με την ανάπτυξη της μηχανικής τεχνολογίας όσο και με την επιστημονική έρευνα ως προς τη χημική σύνθεση του γυαλιού και τα φυσικά του χαρακτηριστικά. Πρόσωπο κλειδί και ένας από τους προγόνους της σύγχρονης έρευνας του γυαλιού υπήρξε ο Γερμανός Otto Schott (1851-1935), ο οποίος χρησιμοποίησε επιστημονικές μεθόδους για να μελετήσει τις επιδράσεις πλήθους χημικών στοιχείων επάνω στα οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά του γυαλιού. Το 1871 ο William Pilkington, εφηύρε μια μηχανή που αυτοματοποίησε την παραγωγή των υαλοπινάκων που φτιάχνονταν με την μέθοδο των κυλίνδρων, την οποία μηχανή βελτίωσε αργότερα (1903) ο J.H.Lubber στην Αμερική. Ο Αμερικανός μηχανικός Michael Owens ανακαλύπτει μια αυτόματη φιάλη παραγωγής φουσητού γυαλιού. Με την ταυτόχρονη βελτίωση του συστήματος τροφοδοσίας, κατέστη δυνατή η βιομηχανική παραγωγή φιαλών σταθερού μεγέθους σε ταχείς ρυθμούς.

Η πρόοδος υπήρξε ραγδαία. Και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού ανεπτύχθησαν και μπήκαν σε εμπορική εφαρμογή καινοτόμες μέθοδοι παραγωγής αρχιτεκτονικού γυαλιού. Κυριότερες εξ αυτών η μέθοδος του τραβηγτού (etire) γυάλινου «σεντονιού» (sheetglass) του Βέλγου Emille Fourcault (1905), η οποία αναπτύχθηκε σχεδόν ταυτόχρονα με αυτήν του Αμερικανού Irving Colburn σε συνεργασία με την εταιρία Libbey-Owens. Με τη νέα, αυτοματοποιημένη αυτή μέθοδο, το παχύρευστο γυαλί τραβιόταν από τον κλίβανο, σχημάτιζε ένα συνεχές γυάλινο σεντόνι το οποίο ισοπεδωνόταν και κρύωνε περνώντας ανάμεσα από κυλίνδρους αμιάντου. Αν και το γυαλί που παραγόταν δεν ήταν τελείως απαλλαγμένο από ελαττώματα, η νέα αυτή τεχνική κυριάρχησε, με αποτέλεσμα στις δεκαετίες 1920-1930 οι τιμές του επίπεδου γυαλιού να έχουν υποχωρήσει ακόμα και κατά 60%. Η τεχνική της έλξης (etire) έδωσε και τη δυνατότητα παραγωγής διακοσμημένου γυαλιού (figuredglass), αφού στην περίπτωση αυτή το γυαλί περνούσε ανάμεσα από κυλίνδρους με αποτυπωμένα στην επιφάνειά τους ανάγλυφα σχέδια τα οποία διαμόρφωναν αντίστοιχα την επιφάνεια του γυαλιού.



Έως το 1929 το 70% της παραγωγής επίπεδου γυαλιού στην Αμερική διοχετευόταν στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής ήταν γυαλιά ασφαλείας (safety glass) που αποτελούνταν από δύο γυαλιά κολλημένα μεταξύ τους με ένα στρώμα ακετυλοκυτταρίνης. Τη μέθοδο είχε αναπτύξει από το 1910 ο Γάλλος επιστήμονας Edouard Benedictus.

Με καμιά από τις παραπάνω μεθόδους δεν κατέστη δυνατόν να παραχθεί επίπεδο γυαλί με τα επιθυμητά οπτικά χαρακτηριστικά, ώσπου μετά το δεύτερο

παγκόσμιο πόλεμο, η Βρετανική εταιρία “Pilkington Brothers Ltd” παρουσίασε τη νέα μέθοδο παραγωγής επίπεδου γυαλιού την οποία εφεύρε ο Alastair Pilkington, με την επωνυμία “float” και η οποία τέθηκε σε εμπορική εφαρμογή το 1959, συνδυάζοντας για πρώτη φορά το λαμπερό φινίρισμα του γυάλινου «σεντονιού» με την οπτική ποιότητα της πλάκας γυαλιού. Το λιωμένο γυαλί, περνάει (χύνεται) από το φούρνο τήξης σ’ ένα ρηχό μπάνιο με λιωμένο κασσίτερο, στην ιδανικά επίπεδη επιφάνεια του οποίου επιπλέει (floats) ως ελαφρύτερο, απλώνει, αυτοεπιπεδώνεται διαμορφώνοντας μια λεία και απόλυτα επίπεδη μάζα γυαλιού και στη συνέχεια τραβιέται οριζοντίως μέσα στο θάλαμο ανόπτησης σχηματίζοντας μια συνεχή γυάλινη ταινία μέχρι την γραμμή κοπής. Με αυτήν τη μέθοδο παράγεται σήμερα το σύνολο σχεδόν του επίπεδου γυαλιού παγκοσμίως.

### 2.1.3 Γυαλί

Το γυαλί είναι υλικό άμορφο, δηλαδή δεν παρουσιάζει κρυσταλλική δομή. Είναι ημιδιάφανο ή διάφανο, εύθραυστο, άκαμπτο και σκληρό. Η διαφάνειά του αφορά στο ορατό φως, γιατί το κοινό γυαλί είναι αδιάφανο για την υπεριώδη ακτινοβολία. Ως υλικό είναι πλήρως ανακυκλώσιμο και κατά συνέπεια, ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση σε κατασκευή συσκευασιών τροφίμων και ποτών.

### 2.1.4 Παρασκευή γυαλιού

---

Το γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου, η οποία αποτελεί το βασικό συστατικό του (διαμορφωτή), ενός ή περισσότερων συλλιπασμάτων και ενός (ή περισσότερων σταθεροποιητών. Αν δε χρησιμοποιηθεί σταθεροποιητής, τότε το γυαλί γίνεται εύθρυπτο και αποσαθρώνεται από το νερό. Το κοινό γυαλί παρασκευάζεται με σύντηξη χαλαζιακής άμμου ( $\text{SiO}_2$ ) (73,7%), ανθρακικού νατρίου (κοιν. Σόδα,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (16%), οξειδίου του καλίου ( $\text{K}_2\text{O}$ ) (0,5%) (συλλιπάσματα) και ανθρακικού ασβεστίου (κοιν. ασβεστόλιθου ( $\text{CaCO}_3$ )) (5,2%) ανθρακικού μαγνησίου ( $\text{MgCO}_3$ ) (3,6%) και οξειδίου του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (1%) (σταθεροποιητές). Ανάλογα με τον τύπο και το ποσοστό των συλλιπασμάτων και των σταθεροποιητών λαμβάνονται και οι διάφοροι τύποι γυαλιού.



Το γυαλί, αφού παρασκευαστεί ως πρώτη ύλη, μπορεί να πάρει το επιθυμητό σχήμα με τρεις τρόπους: Είτε με εμφύσηση (φουσητό γυαλί) είτε με τη βοήθεια καλουπιών είτε με συσκευές που δημιουργούν φύλλα («ελάσματα») γυαλιού.

### 2.1.5 Φυσικές ιδιότητες του γυαλιού

---

- Στερεό υψηλής σκληρότητας (6 στην κλίμακα Mohs).
- Μη κρυσταλλικής δομής, άμορφο υλικό.
- Εύθραυστο.
- Διαφανές για το φάσμα του ορατού φωτός.
- Δυσθερμαγωγό και μονωτικό υλικό.

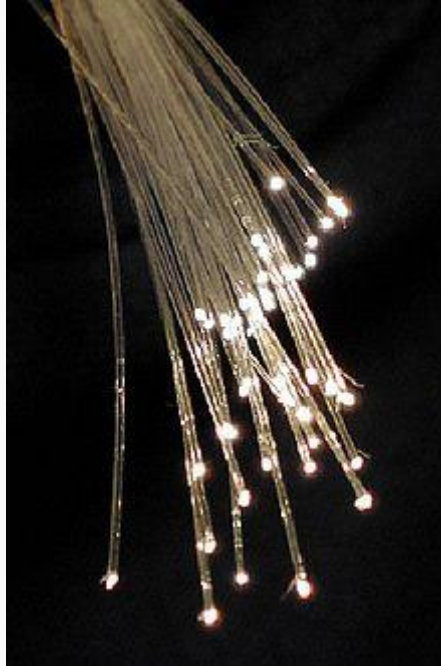
### 2.1.6 Βασικοί τύποι γυαλιού

---

- **Κοινό γυαλί:** Παρασκευάζεται με συλλίπασμα οξειδίου του νατρίου (12-18%) και σταθεροποιητή οξειδίου του ασβεστίου (5-12%). Ορισμένα άλλα οξείδια μπορεί να συμμετέχουν για λόγους απόδοσης χρωματισμών. Το κοινό γυαλί είναι φθηνό στην κατασκευή του και παρουσιάζει οπτικές και φυσικές ιδιότητες κατάλληλες για την κατασκευή κοινών αντικειμένων, όπως υαλοπίνακες και οικιακά σκεύη (ποτήρια, φιάλες, δοχεία τροφίμων). Επειδή δεν είναι πορώδες, δε συγκρατεί κανένα συστατικό και καθαρίζεται εύκολα. Δεν αντιδρά με υδατικά διαλύματα ή έλαια και λίπη, κι έτσι δεν αλλοιώνει τη σύσταση των τροφίμων και τη γεύση ή την οσμή τους. Είναι βιολογικά αδρανές και δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη βακτηρίων ή μυκήτων. Το κοινό γυαλί είναι αδιαφανές στη φωτεινή ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 400 nm. Αυτό το κάνει κατάλληλο για χρήση σε υαλοπίνακες παραθύρων. Έχει όμως το μειονέκτημα να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και να σπάει όταν αυτό συμβεί.
- **Γυαλί μολύβδου:** Παρασκευάζεται με αντικατάσταση του οξειδίου του νατρίου από οξείδιο του καλίου και του οξειδίου του ασβεστίου από οξείδιο του μολύβδου (PbO). Η περιεκτικότητα του PbO μπορεί να φθάνει και το 30%, αλλά το γυαλί με περιεκτικότητα μέχρι 24% σε PbO χαρακτηρίζεται ως *κρύσταλλο*. Έχει υψηλή ανθεκτικότητα, τα αντικείμενα που δίνει είναι

εξαιρετικά σιλπνά και παρουσιάζει υψηλό δείκτη διάθλασης. Οι δύο τελευταίες ιδιότητες το κάνουν υλικό ιδιαίτερα κατάλληλο για την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων αλλά και (ακριβών) ειδών οικιακής χρήσεως, όπως ποτήρια, ανθοδοχεία κτλ. Ο μόλυβδος είναι δηλητηριώδες υλικό, αλλά επειδή τα άτομά του είναι ολοσχερώς εγκλωβισμένα στη μοριακή δομή του γυαλιού, δεν επιφέρει καμία απολύτως βλάβη στην ανθρώπινη υγεία. Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι ευαίσθητο στις μεταβολές θερμοκρασίας και να θραύεται εύκολα από αυτές. Λόγω της υψηλής του διαθλαστικότητας χρησιμοποιείται στην κατασκευή οπτικών οργάνων (π.χ. φακών). Μια ειδική μορφή αυτού του τύπου γυαλιού, με περιεκτικότητα σε PbO περίπου στο 65% χρησιμοποιείται για την κατασκευή ειδικών προστατευτικών υαλοπινάκων, επειδή ο μόλυβδος απορροφά τις επικίνδυνες ακτινοβολίες που περιέχονται στο ηλιακό φως.

- **Γυαλί βορίου:** Είναι γνωστότερο με την εμπορική ονομασία «Pyrex». Η σύστασή του είναι οξείδιο του πυριτίου (70-80%), οξείδιο του βορίου  $B_2O_3$  (7-13%) μικρά ποσοστά οξειδίων των αλκαλίων (4-8%  $Na_2O$  και  $K_2O$ , και 2-7% οξείδιο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ )). Η παρουσία βορίου και το μικρό ποσοστό αλκαλίων κάνουν το γυαλί αυτό ανθεκτικό στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και περισσότερο δύστηκτο. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαστηριακών οργάνων και συσκευών, συσκευασίες φαρμακευτικών προϊόντων, σε λαμπτήρες υψηλών αποδόσεων (π.χ. προβολέων) αλλά και για οικιακές εφαρμογές (σκεύη Pyrex, τα οποία δεν θραύονται κατά το μαγείρεμα). Παρουσιάζει, επίσης, χαμηλό συντελεστή διαστολής, πράγμα που δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων στα πειράματα.



#### Οπτικές ίνες

- **Υαλόνημα:** Κατασκευάζεται από ποικίλους τύπους γυαλιού σε μορφή νήματος με πολλαπλές χρήσεις. Το κοινό γυαλί παρέχει νήματα κατάλληλα για κατασκευή μονώσεων (υαλόμαλλο), ενώ το γυαλί βορίου δίνει υαλόνημα από το οποίο κατασκευάζονται υφαντικές δομές που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών από πλαστικό, όπως κράνη, μικρά σκάφη, σασί αυτοκινήτων, σωληνώσεις κτλ. και είναι γνωστό με το εμπορικό όνομα Fiberglass®. Μια πιο πρόσφατη εφαρμογή του υαλονήματος είναι η κατασκευή οπτικών ινών, που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση φωτεινών σημάτων, παρακάμπτοντας το ευθύγραμμο της διάδοσης του φωτός. Χρησιμοποιούνται για ενδοσκοπήσεις οργάνων σε ζωντανούς οργανισμούς, στη διαχείριση σημάτων οδικής και σιδηροδρομικής κυκλοφορίας και στην κατασκευή ειδικών οργάνων, όπως Σόναρ, υδροφώνων κτλ. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης, στην τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών. Χάρη στη χρήση τους αναπτύχθηκαν πολύ η τηλεφωνία, τα δίκτυα υπολογιστών και το Διαδίκτυο (ευρυζωνικές συνδέσεις).

### 2.1.7 Ειδικοί τύποι γυαλιού

- **Γυαλί αργιλίου:** Περιέχει περίπου 20% οξειδίου του αργιλίου, μικρά ποσοστά οξειδίων του βορίου και του μαγνησίου, αλλά πολύ μικρό ποσοστό οξειδίων των αλκαλίων. Το γυαλί αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα θερμοανθεκτικό και χρησιμοποιείται σε θαλάμους καύσεων, σε γυαλιά οργάνων μέτρησης υψηλών θερμοκρασιών και σε λαμπτήρες αλογόνου, στους οποίους η θερμοκρασία αυτού του γυαλιού μπορεί να φθάσει και τους 750°C.
- **Γυαλί αλκαλίων - βαρίου:** Χωρίς αυτόν τον τύπο γυαλιού, η χρήση οθονών για υπολογιστές και τηλεοράσεις θα ήταν πολύ επικίνδυνη: Η οθόνη καθοδικών ακτίνων, από τον τρόπο λειτουργίας της, παράγει ιδιαίτερα επικίνδυνες ακτινοβολίες (Ακτίνες X), οι οποίες απορροφώνται από αυτόν τον τύπο γυαλιού, που περιέχει εκτός από οξείδιο του μολύβδου σε χαμηλό ποσοστό, και οξείδιο του βαρίου (BaO) και τουστροντίου (SrO).
- **Κεραμικό γυαλί:** Είναι γυαλί με οξείδια του αργιλίου και του λιθίου να συμμετέχουν στη σύστασή του και λόγω θερμοανθεκτικότητας, έχει βρει εφαρμογή ως πυρίμαχο διάφανο υλικό σε θύρες κλιβάνων, κατόπτρων τηλεσκοπίων, υαλοποίησης πλακιδίων διαστημοπλοίων, αλλά και σε οικιακές συσκευές (υαλοκεραμικές εστίες μαγειρέματος κτλ.).
- **Οπτικά γυαλιά:** Δεν έχουν σταθερή σύσταση, αλλά αυτή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο που απαιτείται κάθε φορά. Τα συναντούμε στην κατασκευή γυαλιών οράσεως και ηλίου, σε συσκευές όπως φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες και μικροσκόπια (κατασκευή φακών) και σε συσκευές ακριβείας (οπτικά όργανα πλοήγησης, κάτοπτρα, τηλεσκόπια κτλ.).

### 2.1.8 Κοινό γυαλί

Το κοινό γυαλί χωρίζεται στο επίπεδο γυαλί (float ή flatglass) και σε αυτό της συσκευασίας (μπουκάλια κτλ). Οι δύο τύποι αυτοί διαφέρουν:

#### α) Στη μέθοδο παρασκευής:

Το επίπεδο γυαλί παράγεται με έγχυσή του πάνω σε λιωμένο κασσίτερο, από όπου και η αγγλική ονομασία float, έτσι ώστε να του δίδεται ομοιόμορφο πάχος και επίπεδη επιφάνεια.

#### β) Στη χημική τους σύνθεση.

Το επίπεδο γυαλί έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξειδία του μαγνησίου (MgO) και σε ανθρακικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ενώ μικρότερη περιεκτικότητα σε χαλαζιακή άμμο ( $\text{SiO}_2$ ), οξειδίο του ασβεστίου (CaO) και οξειδίο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

### 2.1.9 Το ιξώδες

Το ιξώδες του κοινού γυαλιού (soda lime glass) μειώνεται πολύ γρήγορα με τη θερμοκρασία. Η μετάβαση γυαλιού από ένα στερεό ελαστικό σώμα σε ρευστό γίνεται πολύ γρήγορα. Στη θερμοκρασία αυτή,  $555^\circ\text{C}$ , έχει δοθεί ο όρος μεταβατική θερμοκρασία (transition temperature) ή σημείο ανόπτησης (annealing point).

### 2.1.10 Ανοπτημένο γυαλί (annealed glass)

Η ανόπτηση αναφέρεται σε μία διαδικασία δραστικής μείωσης των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται μέσα στη δομή του γυαλιού. Κατ' αυτήν το γυαλί θερμαίνεται στο σημείο ανόπτησης (annealing point) και ακολούθως ψύχεται ελεγχόμενα. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική για την αντοχή του και προηγείται της κοπής και της λοιπής επεξεργασίας του.

Το ανοπτημένο γυαλί παράγεται σε τυποποιημένα πάχη 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 19, και 25 χιλιοστών σε φύλλα μέγιστης διάστασης 3,0x6,0m είναι όμως δυνατή η παραγωγή και σε διαστάσεις ως 3,2x8,0m.

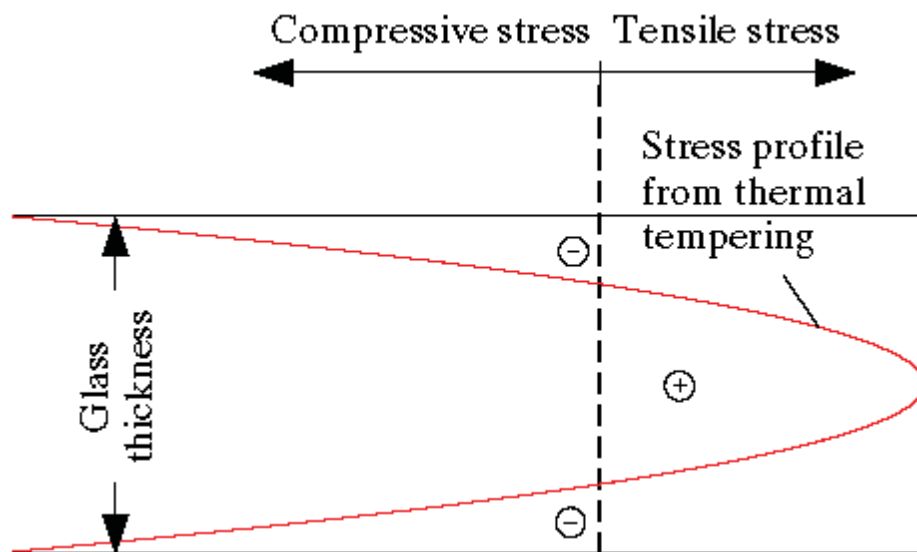
Η αντοχή του σε μόνιμη τάση υποβαθμίζεται με το χρόνο λόγω της χημικής διάβρωσης στις μικρορωγμές που δημιουργούνται στην επιφάνειά του, από τη δράση του νερού η οποία διευρύνει τις ρωγμές αυτές. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα όριο φόρτισης (περί τα 7MPa) κάτω από το οποίο η δράση αυτή δεν είναι σημαντική.

Ένα ακόμη φαινόμενο στο οποίο το ανοπτημένο γυαλί είναι ευαίσθητο είναι ο θερμοκρασιακός αιφνιδιασμός.

Ο θερμοκρασιακός αιφνιδιασμός προκαλείται από διαφορές θερμοκρασίας που υπάρχουν σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του ιδίου φύλλου γυαλιού (π.χ. ένα τμήμα του βρίσκεται σε σκιά ενώ άλλο σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία) οι οποίες αναπτύσσουν εσωτερικές τάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών. Ως κρίσιμη θερμοκρασία έχει βρεθεί να είναι οι 33 °C. Όπου το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό τότε το γυαλί πρέπει να προδιαγραφεται με διαδικασία επαναφοράς (Tempered).

#### **2.1.11 Γυαλί με επαναφορά (tempered glass)**

Αφού έχει ολοκληρωθεί η προβλεπόμενη επεξεργασία (κοπή, γυάλισμα, διάνοιξη οπών κτλ), στο ανοπτημένο γυαλί, γίνεται επαναφορά με επαναθέρμανσή του στους 650°C και ταχεία ψύξη της επιφάνειας του με προσεκτικά ελεγχόμενο τρόπο. Αυτή η διαδικασία προεντείνει (σχήμα 2.1) την εξωτερική επιφάνεια αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την αντοχή του γυαλιού σε εφελκυσμό. Το επίπεδο της παραμένουσας τάσης εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό της ψύξης και υπάρχουν βασικά δύο ποιότητες:



**Σχήμα 2.1:** Παραμένουσες τάσεις από την επαναφορά [6].

### 2.1.12 Σκληρυμένο γυαλί (Toughened glass)

Προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση κατ' ελάχιστο 100MPa. Όλα τα πάχη του ανοπτημένου γυαλιού παράγονται με εξαίρεση τα 25mm στα οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί παραμένουσα τάση στο όριο των 100MPa. Οι μέγιστες διαστάσεις φύλλων εξαρτώνται από τον εξοπλισμό των εργοστασίων και είναι συνήθως 2,14x4,5m<sup>2</sup> αν και μπορεί να βρεθούν έως 3,0x6,0m<sup>2</sup>.

### 2.1.13 Θερμικά ενισχυμένο γυαλί (Heat strengthened glass)

Προδιαγράφεται συνήθως με παραμένουσα επιφανειακή τάση ανάμεσα στα 40-50MPa. Στα γυαλιά με επαναφορά υπάρχει ο κίνδυνος του τυχαίου θρυμματισμού τους λόγω της περιεκτικότητας τους σε θειούχο νικέλιο. Η θραύση αυτή προκαλείται από τη διαδικασία της σκλήρυνσης, λόγω της ταχείας ψύξης που υποβάλλεται η επιφάνεια του γυαλιού, κατά την οποία αλλάζει η κρυσταλλική δομή των κρυστάλλων του θειούχου νικελίου. Το φαινόμενο αυτό πάντως δεν αφορά το θερμικά ενισχυμένο γυαλί λόγω της ηπιότερης ψύξης του. Για την ελαχιστοποίηση του ανωτέρω κινδύνου το γυαλί υποβάλλεται σε θερμικό διαποτισμό (heat soaking) μετά τη σκλήρυνση σε

θερμοκρασία περί τους 280 °C. Το γυαλί (εικόνα 2.1) με επαναφορά έχει την ιδιότητα να θραύεται σε μικρά κυβικά τμήματα αντί μεγάλα και με οξείες γωνίες κομμάτια γεγονός που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο για τραυματισμούς ή θάνατο. Τέλος ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που υπάρχει στα άκρα τους μπορεί να προκληθεί η θραύση τους από κτυπήματα στις άκρες.



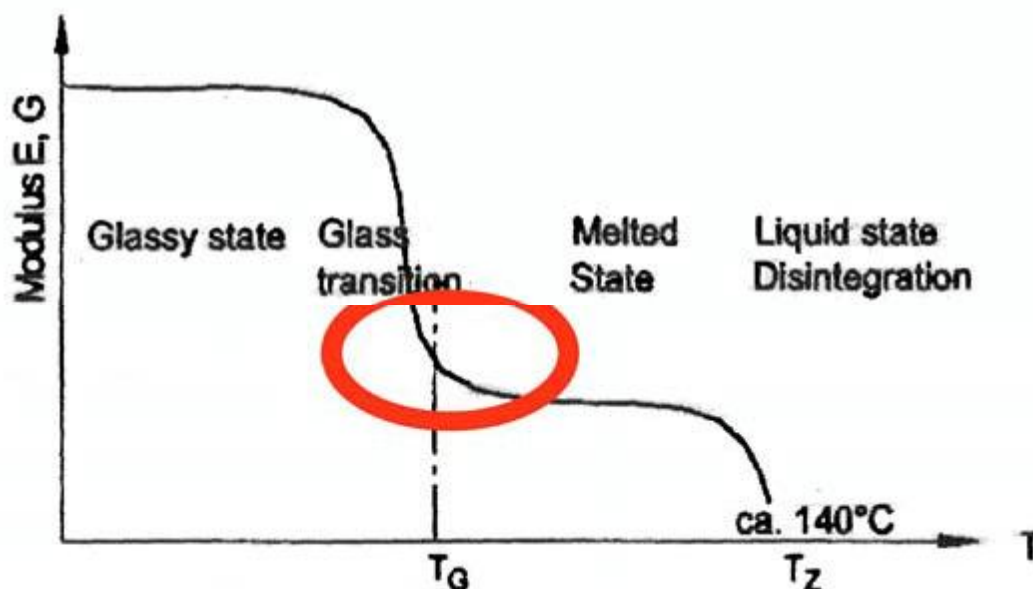
**Εικόνα 2.1:** Μορφή θραύσης γυαλιού. Από αριστερά ανοπτημένο , θερμικά ενισχυμένο, σκληρυμένο [6].

#### 2.1.14 Σύνθετο γυαλί (Laminated glass).

Αποτελείται από φύλλα ολόσωμου γυαλιού συνδεδεμένα με συγκολλητικό υλικό, που σκοπό έχει τη συγκράτηση τους αλλά και τη δημιουργία διατμητικής συνεργασίας. Σαν τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται το πολυβινιλοβουτιλένιο (PVB), η πολουρεθάνη ή ρευστές κατά την έγχυση ρητίνες. Το πάχος σχεδιασμού του σύνθετου γυαλιού εξαρτάται από το είδος της φόρτισης (μόνιμη ή κινητή) και τη θερμοκρασία. Κύριο πρόβλημα είναι η μεταβλητότητα του μέτρου διάτμησης του συνδετικού υλικού με τη θερμοκρασία και το χρόνο επιβολής της φόρτισης. Έτσι ενώ το μέτρο διάτμησης σε χαμηλές θερμοκρασίες και για στιγμιαίες φορτίσεις μπορεί να είναι σε τιμές ανάλογες με αυτές που έχει το γυαλί (περί τα 100MPa), σε υψηλές θερμοκρασίες και για μόνιμες φορτίσεις μπορεί ακόμη και να υποχλιαπλασιαστεί. Η καμπύλη του Σχήματος 2.2 αναφέρεται στη μεταβολή των E και G με τη θερμοκρασία



για το PVB και το σημείο κατά το οποίο η καμπύλη εμφανίζει απότομη κλίση είναι μεταξύ 15 °C και 20 °C [1].



**Σχήμα 2.2:** Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και διατμήσεως με τη θερμοκρασία στο PVB [1].

### 2.1.15 Διαστασιολόγηση δομικού γυαλιού

Η θεωρητική αντοχή του γυαλιού υπαγορεύεται από τη μοριακή συνοχή των δεσμών πυριτίου και οξυγόνου. Για το κοινό γυαλί (soda lime glass) η θεωρητική δύναμη συνοχής είναι  $\sigma_{coh}=20000$  MPa η οποία όμως είναι μερικές εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την πραγματική αντοχή. Έχει αποδειχθεί πως όλα τα χαρακτηριστικά αντοχής του γυαλιού έχουν εξήγηση στις ατέλειες που υπάρχουν στην επιφάνεια του και στις άκρες του. Έτσι και η εφελκυστική αντοχή εξαρτάται από τις ατέλειες αυτές και οι οποίες έχουν προέλθει είτε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του είτε κατά την τοποθέτησή του. Κατά την παραγωγή του επίπεδου γυαλιού τέτοιες ατέλειες εμφανίζονται σε όλη την επιφάνεια με μήκος  $a < 10\mu\text{m}$ . Χτυπήματα κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης, γρατσουνιές ή μικρές κρούσεις με άλλα αντικείμενα επιφέρουν ατέλειες της τάξης των  $100\mu\text{m}$ . Η εφελκυστική δύναμη που επιβάλλεται στο γυαλί συγκεντρώνεται στις άκρες αυτών των ατελειών. Αν η δύναμη συνοχής

σσοη στην περιοχή υπερκαλυφθεί τότε τα άτομα χωρίζουν και η ρωγμή μεγαλώνει. Αυτού του τύπου μηχανισμός οδηγεί σε μια ψαθυρή μορφή αστοχίας.

Εκτός από την παρουσία και τη διανομή των ατελειών στην επιφάνεια, η αντοχή του γυαλιού εξαρτάται και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πρόκειται για χαρακτηριστικό που απαιτεί προσοχή κατά το σχεδιασμό γιατί αντίθετα με άλλα υλικά, η απόκλιση της αντοχής είναι μεγάλη και μπορεί να αυξηθεί επιπλέον κατά τη διάρκεια της ζωής του υλικού. Η θεμελιώδης θεωρία για το κριτήριο αστοχίας διατυπώθηκε από τον Griffith το 1920 και βασίζεται σε μια ενεργειακή ισορροπία σύμφωνα με την οποία η ρωγμή θα μεγαλώσει σε ένα υπό ένταση στοιχείο εάν η αύξησή της απελευθερώνει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που απαιτείται για τη δημιουργία νέας ρωγμής.

### **Ορισμός συντελεστή συγκέντρωσης τάσης.**

Αυτός δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K_I = Y \cdot \sigma_f \cdot \sqrt{a}$$

όπου  $\sigma_f$  η εφελκυστική τάση από κεντρικό εφελκυσμό, που προσδιορίζεται χωρίς την παρουσία της ρωγμής,  $a$  το μήκος της ρωγμής και  $Y$  συντελεστής αναλογίας εξαρτώμενος από το σχήμα της ρωγμής, το λόγο του μήκους της προς το πάχος του στοιχείου και τη θέση της ρωγμής στην περιοχή εφελκυσμού. Ο συντελεστής  $Y$  έχει βρεθεί πειραματικά ίσος με 1,77 για ρωγμή στο κέντρο του πλάτους της εφελκυσόμενης περιοχής και 1,99 όταν βρίσκεται στο άκρο. Ο προσδιορισμός του κρίσιμου συντελεστή συγκέντρωσης τάσης  $K_{IC}$  γίνεται εάν στην προηγούμενη σχέση θέσουμε  $K_I = K_{IC}$  και ο συσχετισμός γίνει με την τάση αστοχίας  $\sigma_f$ . Τότε

$$\sigma_f = K_{IC} / Y \cdot \sqrt{a}$$

Ο συντελεστής  $K$  έχει βρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,72 και 0,82 MPa m<sup>-1/2</sup> ενώ μια συνηθισμένη τιμή είναι 0,75 MPa m<sup>-1/2</sup>. Στην προηγούμενη εξίσωση έχει υποτεθεί ότι η ακμή της ρωγμής είναι οξεία δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητάς της είναι μηδενική. Αν θεωρηθεί όμως ότι η ακτίνα δεν είναι μηδενική τότε προκύπτει:

$$\sigma_f = \sigma_{coh} \sqrt{\rho/2} \sqrt{a}$$

Είναι προφανές ότι με την αύξηση της ακτίνας αυξάνει και η αντοχή. Σύμφωνα με τον Lawn και άλλους, η ελάχιστη ακτίνα βρίσκεται από τον τύπο

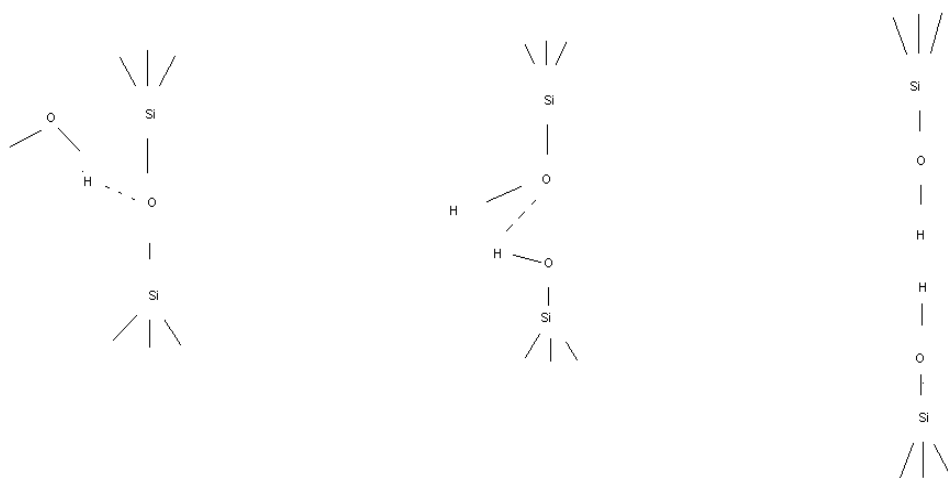
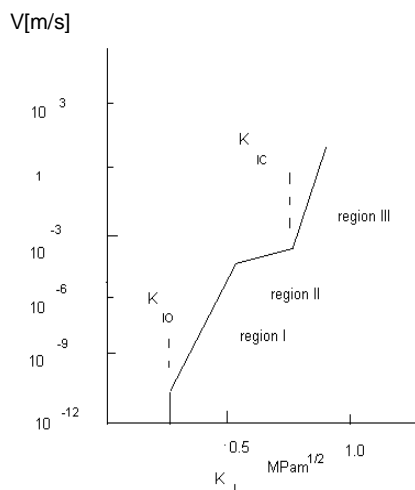
$$P_{\min} = (2K_{IC} / Y\sigma_{coh})^2$$

Με εφαρμογή των τιμών  $K_{IC}=0,75 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $\sigma_{coh}= 20000 \text{ MPa}$  και  $Y=1,99$  η ελάχιστη ακτίνα προκύπτει  $r_{\min}=1,4 \text{ nm}$ . Η τιμή αυτή είναι τέσσερις φορές το μήκος δεσμού Si-O-Si το οποίο είναι  $0,32\text{nm}$ .

**Η διαδικασία της θραύσης του γυαλιού χωρίζεται στα ακόλουθα μέρη:**

- Η ρωγμή προκαλείται στην επιφάνεια του γυαλιού κατά τη διάρκεια της παραγωγής ή και της τοποθέτησης.
- Εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται κανονικά στις ρωγμές. Εάν ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης  $K_I > K_{IO}$  ( $K_{IO} = (20-30)\% K_{IC}$ , περιοχή I στο σχήμα 2.3, η ρωγμή αρχίζει να μεγαλώνει εξαιτίας της στατικής κόπωσης, η οποία προκαλείται από τη χημική αντίδραση  $Si_2O + H_2O \rightarrow 2SiOH$ , με αποτέλεσμα να καταλύεται ο δεσμός, σχήμα 2.4.

**Σχήμα 2.3:** Μεταβολή της ταχύτητας αστοχίας σε συνάρτηση με τον συντελεστή  $K_I$  [3].



**Σχήμα 2.4:** Σχηματική διαδικασία της κατάλυσης του δεσμού της χαλαζιακής άμμου από τη δράση του νερού (από αριστερά προς τα δεξιά) [3].

- Μόλις ξεπεραστεί το όριο διάχυσης, περιοχή II στο σχήμα 2.3, η ρωγμή αυξάνεται με μεγάλους ρυθμούς ενώ και ο συντελεστής  $K_I$  αυξάνει. Σε αυτό το σημείο η ταχύτητα αστοχίας είναι ήδη μεγάλη και ο  $K_I$  αυξάνει πολύ γρήγορα έως ότου φτάσει την κρίσιμη τιμή  $K_{Ic}$ .
- Όταν ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισωθεί με τον κρίσιμο  $K_I=K_{Ic}$  η ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής αυξάνεται δραματικά οδηγώντας άμεσα σε θραύση. Στην περίπτωση που η ρωγμή έχει χώρο να αναπτυχθεί μπορεί η ταχύτητα να φτάσει την τιμή  $v_{max}=1500$  m/s. Όταν επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα, η ρωγμή χωρίζεται σε μικρότερες που αναπτύσσονται με μικρότερες ταχύτητες.
- Στην περίπτωση που το επίπεδο της τάσης είναι εξ αρχής υψηλό ή οι ατέλειες μεγάλες σε μέγεθος, ο συντελεστής συγκέντρωσης εξισώνεται άμεσα με τον κρίσιμο  $K_I=K_{Ic}$  αμέσως με την επιβολή της φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση η αντοχή του γυαλιού σε βραχυχρόνιες φορτίσεις ξεπερνιέται και το γυαλί θρυμματίζεται ακαριαία χωρίς καμία προειδοποίηση.

Ήδη φαίνεται από την παραπάνω διαδικασία και το σχήμα 2.3 ότι είναι δυνατό να προβλεφθεί κάποιο επίπεδο φόρτισης το οποίο να οδηγεί σε μια χαμηλή ταχύτητα διάδοσης ρωγμών που για τη χρονική διάρκεια επιβολής της φόρτισης, να οδηγεί σε προβλέψιμη, σε χρόνο, χρησιμότητα του υλικού. Είναι ακόμη φανερό ότι οι φορτίσεις με μεγάλη διάρκεια (π.χ. μόνιμα φορτία) πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό επίπεδο φόρτισης από ότι φορτία με μικρότερο χρόνο επιβολής (π.χ. χιόνι) είτε με σχεδόν στιγμιαίο χρόνο επιβολής όπως η ανεμοπίεση.

**Αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό:** είναι μια δυνατότητα του υλικού να αντέχει σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Η θερμική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$R_s = (\lambda * \sigma_F) / (\alpha * E)$$

Όπου:

$R_s$  : αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό

$\lambda$  : θερμική αγωγιμότητα

$\sigma_F$  : αντοχή στην κάμψη

$\alpha$  : συντελεστής θερμικής διαστολής

$E$  : μέτρο ελαστικότητας

### 2.1.16 Σύνθεση



Το γυαλί είναι ένα άμορφο υλικό. Το κοινό γυαλί το οποίο χρησιμοποιείται στα κτίρια, είναι προϊόν τήξης πυριτικής άμμου ( $\text{SiO}_2$ ) 65%, (συνθετικής) σόδας ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 15% και ασβεστόλιθου ( $\text{CaCO}_3$ )/δολομίτη ( $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ ) 18%. Στο μίγμα προστίθενται κατά περίπτωση και άλλα υλικά (όπως μεταλλικά οξείδια  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), σε μικρές ποσότητες, είτε για να βελτιώσουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του γυαλιού, είτε για να διευκολύνουν τη διαδικασία παραγωγής, είτε για να χρωματίσουν τη μάζα του. Άλλοι τύποι γυαλιών (κρύσταλλα, βοριοπυριτικά γυαλιά κλπ), προκύπτουν από συνδυασμούς των βασικών πρώτων υλών με άλλα δευτερεύοντα υλικά, στις κατάλληλες αναλογίες.

### 2.1.17 Διαδικασία παραγωγής



Η παραγωγή του επίπεδου γυαλιού γίνεται πλέον όπως προαναφέρεται με τη μέθοδο “float” σε 300 περίπου εργοστάσια παγκοσμίως. Σε πρώτη φάση ζυγίζονται και αναμιγνύονται οι πρώτες ύλες με ακρίβεια και ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα. Στη συνέχεια το μίγμα αδειάζεται μέσα στο φούρνο τήξης (50 X 9 μέτρων περίπου), όπου λιώνουν τα υλικά σε θερμοκρασία 1.500°C – 1.600°C (η καύσιμη ύλη είναι συνήθως φυσικό αέριο). Το λιωμένο γυαλί, ρέει (χύνεται) στο μπάνιο (45 X 5 μέτρων περίπου) με το λιωμένο κασσίτερο (1.000°C), επί του οποίου επιπλέει (floats) ως ελαφρύτερο και πιο παχύρευστο, απλώνει σε όλη την επιφάνεια του μπάνιου και αυτοεπιπεδώνεται (με τη βαρύτητα) σχηματίζοντας ένα στρώμα πάχους 6 – 7 mm το οποίο όσο πηγαίνει προς την έξοδο του μπάνιου κρυσταλλώνει, γίνεται στερεό, αποκτά στιλπνότητα και το επιθυμητό πάχος.

Στην έξοδο του μπάνιου η σχηματισμένη ταινία γυαλιού με θερμοκρασία 600°C πλέον, οδηγείται με σύστημα αντίθετα κινούμενων γραναζιών, στο θάλαμο ψύξης, κυλιόμενη επάνω σε οριζόντιους κυλίνδρους (ράουλα). Η ταχύτητα κύλισης κυμαίνεται από 7 έως 20 μέτρα το λεπτό ανάλογα με το πάχος του γυαλιού. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα «τραβήγματος» του γυαλιού, τόσο λιγότερη ποσότητα συσσωρεύεται μέσα στο μπάνιο, άρα τόσο μικρότερο είναι το πάχος του φύλλου. Αυξομειώνοντας κατά συνέπεια την ταχύτητα εξόδου, ρυθμίζεται το πάχος του παραγόμενου γυαλιού.

Η συνεχόμενη γυάλινη ταινία οδηγείται μέσα στο θάλαμο ψύξης (ανόπτησης) όπου γίνεται η ελεγχόμενη και ομοιόμορφη ψύξη με ηλεκτρικούς ανεμιστήρες οι οποίοι φυσούν αέρα διαφορετικής θερμοκρασίας (θερμότερο στα πρώτα μέτρα) ώστε μέχρι να διανύσει το γυαλί το θάλαμο (μήκους 100 μέτρων περίπου) να έχει πέσει η θερμοκρασία του από τους 600°C στους 280°C. Η ψύξη του γυαλιού γίνεται βαθμιαία και κατά τρόπο απόλυτα ελεγχόμενο προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία εσωτερικών τάσεων μέσα στην μάζα του γυαλιού. Η ταινία γυαλιού συνεχίζει την κίνησή της προς το ψυχρό μέρος της γραμμής παραγωγής.

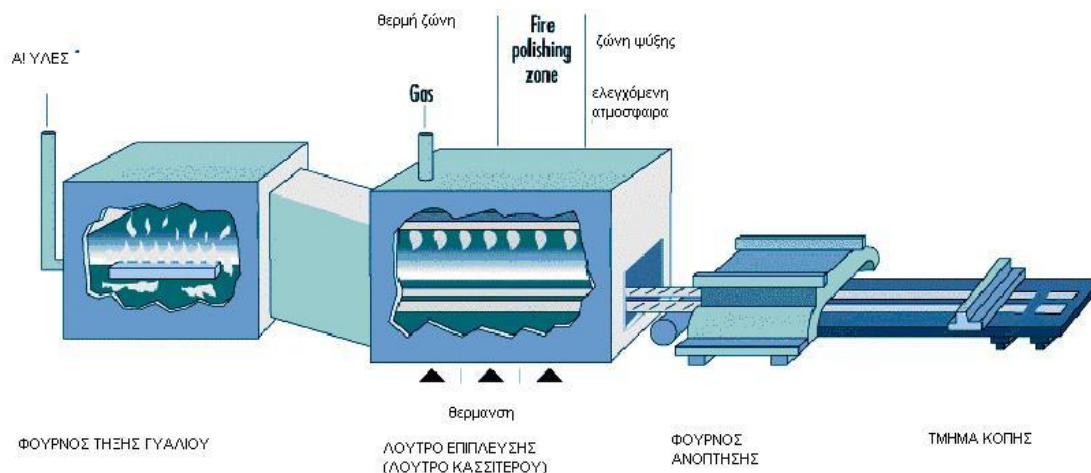
Εδώ υπάρχουν οι θάλαμοι ελέγχου, ακριβώς πάνω από την κινούμενη ταινία, μέσω των οποίων διενεργείται αυστηρή επιθεώρηση του γυαλιού για ενδεχόμενα ελαττώματα (φουσαλίδες, υαλώματα, παραμορφώσεις, κλπ). Μια λάμπα «ξένον» κατευθύνεται επάνω στην επιφάνεια του γυαλιού και τα τυχόν ελαττώματα εμφανίζονται σαν σκιές πάνω στο λευκό χαρτί που υπάρχει από κάτω. Τα τμήματα γυαλιού με ενδεχόμενα ψεγάδια, κόβονται και απορρίπτονται κατά την επόμενη φάση της κοπής.

Οι κόφτες, ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι, χαράζουν την κινούμενη γυάλινη ταινία οριζοντίως και καθέτως. Οι δύο πρώτοι κόφτες χαράζουν το γυαλί οριζοντίως προκειμένου να απορριφθούν οι πλαϊνές ζώνες της ταινίας με τα σημάδια από τα γρανάζια έλξης και να μείνει το καθαρό πλάτος του γυαλιού (συνήθως 321 ή 330 εκατοστά). Οι επόμενοι τέσσερις κόφτες κινούμενοι, χαράζουν το γυαλί καθέτως προκειμένου να κόψουν την συνεχόμενη ταινία στα επιθυμητά ύψη (200, 220, 225, 240, 255, 510 και 600 εκατοστά).

Ακολουθεί ο ψεκασμός της επιφάνειας του γυαλιού με σιλικονούχα πούδρα για να προφυλαχθεί από τυχόν γρατζουνίσματα κατά τη φάση του πακεταρίσματος.

Αμέσως μετά η ταινία διαχωρίζεται στα σημεία που έχει χαραχθεί και προκύπτουν τα διάφορα μεγέθη γυαλιών. Στο τέλος της γραμμής, ρομπότ με βεντούζες, παραλαμβάνουν τα φύλλα και τα εναποθέτουν επάνω σε μεταλλικά στηρίγματα. Κατά παρόμοιο τρόπο τα γυαλιά παραλαμβάνονται από τα στηρίγματα και συσκευάζονται σε ξύλινα πλαίσια.





## Πρώτες ύλες για την παραγωγή γυαλιού float

Πρώτη ύλη	Συστατικά	Παραγωγή	Λειτουργία
Άμμος	$\text{SiO}_2$	Φυσικές εναποθέσεις	Παραγωγή γυαλιού
Σόδα	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	Συνθετική παραγωγή	Λιώσιμο
Δολομίτης	$\text{MgCO}_3, \text{Na}_2\text{CO}_3$	Φυσικές εναποθέσεις	Σταθερότητα, αντοχή, χημική αντίσταση
Ανθρακικό Ασβέστιο	$\text{CaCO}_3$	Φυσικές εναποθέσεις	Σταθερότητα, αντοχή, χημική αντίσταση
Αργιλικά ή Πυριτικά Οξειδία	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$	Φυσικές εναποθέσεις	Χημική αντίσταση
Άλατα	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Συνθετική παραγωγή	Λιώσιμο, απόκτηση ιδιοτήτων
Άνθρακας	C	Συνθετική παραγωγή	Διαβρωτικές ιδιότητες μείγματος
Κονίαμα	$\text{CaSO}_4$	Φιλτράρισμα αερίων αποβλήτων	Καθαρότητα
Καυστική σόδα	NaOH	Συνθετική παραγωγή	Βελτίωση μείγματος
Μαγιά γυαλιού	Float glass	Ίδια παραγωγή, ανακύκλωση	Εξοικονόμηση ενέργειας

### 2.1.18 Φυσικές ιδιότητες του κοινού γυαλιού

- **Πυκνότητα (density):** Η πυκνότητα του γυαλιού στους 18°C είναι 2.500Kg/m<sup>3</sup> το οποίο μεταφράζεται σε 2,5 κιλά βάρος ανά τετραγωνικό μέτρο και χιλιοστό πάχους.

- **Ελαστικότητα:** Το γυαλί είναι ένα τελείως ελαστικό υλικό. Δεν παρουσιάζει μόνιμη παραμόρφωση, μέχρι να σπάσει. Όμως είναι εύθραυστο και σπάει χωρίς προειδοποίηση εάν εκτεθεί σε υπέρμετρη τάση. Έχει βαθμό ελαστικότητας (Young's modulus): 70.000 N/mm<sup>2</sup> και βαθμό δυσκαμψίας (modulus of rigidity): 29.166N/mm<sup>2</sup>.

- **Αντοχή στον εφελκυσμό:** Όταν κάμπτεται ένας υαλοπίνακας, έχει τη μία του πλευρά υπό θλίψη (την εσωτερική) και την άλλη (την εξωτερική) υπό εφελκυσμό. Αν και η αντίσταση του γυαλιού στη θλίψη είναι πολύ υψηλή, η αντίστασή του στις τάσεις εφελκυσμού, είναι σημαντικά χαμηλότερη. Η αντίσταση σε θραύση λόγω κάμψης έχει τις εξής τιμές: 40 Newton/mm<sup>2</sup> (= 40MPa) για το κοινό γυαλί, 120 – 200 Newton/mm<sup>2</sup> (= 120MPa) για το γυαλί με επαναφορά (tempered glass) , ανάλογα με το πάχος του, το τρύχισμα, τις τρύπες, εγκοπές κλπ.

- **Αντοχή στη θλίψη:** Η αντοχή στη θλίψη του γυαλιού είναι εξαιρετικά υψηλή: 1.000 Newton/mm<sup>2</sup> ή 1.000 MPa. Αυτό σημαίνει ότι για να θρυμματίσουμε ένα κύβο γυαλιού ενός εκατοστού (1cm), χρειαζόμαστε ένα βάρος 10 τόνων περίπου.

- **Αντοχή στη χάραξη:** Το γυαλί βρίσκεται στη μέση σχεδόν της κλίμακας του Moh ως προς την αντοχή του στην χάραξη (Moh's hardness : 6), που σημαίνει ότι είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί να χαραχθεί από το χαλαζία (Moh's hardness : 7) και τα σκληρότερα από αυτόν υλικά.

- **Γραμμική διαστολή:** Εκφράζεται από ένα συντελεστή ο οποίος μετράει την επιμήκυνση για μια διαφορά θερμοκρασίας 1°C. Ο συντελεστής αυτός ισχύει για θερμοκρασίες από 20 έως 300°C.

### 2.1.19 Κίνδυνος θραύσης από θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό

Η θερμοκρασία ενός υαλοστασίου μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Καθώς η θερμοκρασία ενός υαλοπίνακα ανεβαίνει, αυτός διαστέλλεται. Αυτό γίνεται χωρίς πρόβλημα εφ' όσον η θερμοκρασία του υαλοπίνακα

είναι ομοιόμορφη σ' όλη του την έκταση. Αντιθέτως, εάν ένα τμήμα μόνο του υαλοπίνακα θερμαίνεται (π.χ. γιατί το βρίσκει ο ήλιος), ενώ το υπόλοιπο παραμένει κρύο (π.χ. γιατί είναι στη σκιά ή μέσα στο πλαίσιο), εμποδίζεται η ομοιόμορφη διαστολή του, με αποτέλεσμα στα όρια των διαφορετικών θερμοκρασιών να αναπτύσσονται τάσεις εφελκυσμού οι οποίες σε περιπτώσεις μεγάλης διαφοράς της θερμοκρασίας από το ένα σημείο στο άλλο, μπορεί να ξεπεράσουν το επιτρεπόμενο επίπεδο τάσεων του υαλοπίνακα, με αποτέλεσμα τη θραύση του υαλοπίνακα, λόγω θερμοκρασιακού αιφνιδιασμού. Περισσότερο επιρρεπείς στη θραύση από θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό είναι βέβαια οι απορροφητικοί υαλοπίνακες (έγχρωμοι) επειδή απορροφούν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας. Τον κίνδυνο μειώνει η τοποθέτηση τροχισμένων υαλοπινάκων και τον ελαχιστοποιεί η τοποθέτηση θερμικά σκληρυμένων (securit) υαλοπινάκων



Σημείο θερμοκρασιακής μετάπτωσης υάλου από στερεή σε ημιυγρή κατάσταση.

(Το γυαλί γίνεται εύκαμπτο και μπορεί να διαμορφωθεί): 600°C

Σημείο τήξεως (το γυαλί γίνεται ρευστό και μπορεί να χυτευθεί): 1.500°C

#### **2.1.20 Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) & Θερμική τάση:**

Πρόκειται για την ικανότητά του γυαλιού να επιτρέπει τη διάδοση της θερμότητας (με αγωγή/επαφή). Η θερμική αγωγιμότητα ( $\lambda$ ) του γυαλιού είναι μικρή ( $\lambda=1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  περίπου). Αυτό με άλλα λόγια σημαίνει ότι δυσχεραίνεται η μετάδοση της θερμότητας από ένα τμήμα του με υψηλότερη θερμοκρασία, στο υπόλοιπο γυαλί και η ομοιόμορφη κατανομή της στην μάζα του, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται

εσωτερικές τάσεις στα όρια των περιοχών με τις διαφορετικές θερμοκρασίες, οι οποίες συχνά οδηγούν στην θραύση του υαλοπίνακα (θερμοκρασιακός αιφνιδιασμός). Το φαινόμενο εμφανίζεται κατά κανόνα σε έγχρωμους υαλοπίνακες με μεγάλη θερμοχωρητικότητα (solar control).

#### **2.1.21 Θερμοδιαπερατότητα (thermal transmittance):**

Εκφράζεται με τον συντελεστή U value και μετρά την θερμότητα η οποία μεταδίδεται συνολικά με επαφή, ανάμειξη και ακτινοβολία, μέσω ενός κοινού υαλοπίνακα από τη θερμότερη στην ψυχρότερη πλευρά. Ο συντελεστής θερμικής περατότητας ενός μονού υαλοπίνακα 4mm είναι:  $U = 5,8W/(m^2.K)$

#### **2.1.22 Δείκτης διάθλασης:**

Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού σε σχέση με τον αέρα είναι 1,5

#### **2.1.23 Φωτοπερατότητα:**

Ο συντελεστής φωτοπερατότητας ενός μονού κοινού υαλοπίνακα 4mm πάχους είναι 0,90 που σημαίνει ότι επιτρέπει στο 90% του ηλιακού φωτός να εισέλθει.

#### **2.1.24 Ο υαλοπίνακας στις σύγχρονες κατασκευές**

Το κοινό γυαλί έχει πλέον εξελιχθεί σ' ένα πολυδιάστατο υλικό του κατασκευαστικού τομέα και είναι «το αγαπημένο» υλικό αρχιτεκτόνων, διακοσμητών και κατασκευαστών, όχι μόνο για την αισθητική του έλξη, αλλά και γιατί έρχεται να ικανοποιήσει σειρά απαιτήσεων που έχουν να κάνουν με τη θερμοκρασιακή άνεση (χειμώνα – καλοκαίρι), την ηχομείωση, την ασφάλεια, την προστασία, την αισθητική κλπ.:

- Ρυθμίζοντας το εισερχόμενο φυσικό φως και την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια, χάρη στις αντίστοιχες (solar control) ιδιότητές του.
- Μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας και συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος, χάρη στα θερμομονωτικά του χαρακτηριστικά.

- Παρέχοντας προστασία έναντι των ενοχλητικών θορύβων, κυρίως με τους υψηλής ακουστικής απόδοσης υαλοπίνακες.
- Παρέχοντας ασφάλεια και προστασία έναντι κινδύνων τραυματισμού, κακόβουλων ενεργειών, πυροβόλων όπλων, πυρκαγιάς κλπ, με τη βοήθεια των ειδικών γυαλιών.
- Βελτιώνοντας την εσωτερική διακόσμηση χάρη στα καινοτόμα προϊόντα και τις τεχνολογικές εφαρμογές.

### **2.1.25 Φως και ηλιακή ενέργεια.**

Το ηλιακό φως είναι το τμήμα της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία φθάνει στην Γη φιλτραρισμένη από την ατμόσφαιρα και γίνεται αντιληπτή σαν φως ημέρας (daylight), ενώ ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα. Όταν δε μπλοκάρεται από σύννεφα, την αντιλαμβανόμαστε σα λιακάδα, σαν ένα συνδυασμό δηλαδή δυνατού φωτός και θερμότητας.

Το γυαλί ως δομικό υλικό έχει ορισμένες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη στατική μελέτη, όπως είναι:

- Διαφάνεια
- Λεία επιφάνεια
- Οπτικές ιδιότητες
- Διατήρηση μηχανικών και οπτικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες
- Σκληρότητα
- Διηλεκτρικές ιδιότητες καλές
- Αναλλοίωτη σύσταση στο πέρασμα του χρόνου
- Δεν έχει πόρους
- Ευκολία μορφοποίησης
- Έχει στιλπνές επιφάνειες

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού μπορούν να τροποποιηθούν κατά την κατασκευή διαφόρων ειδών γυαλιού, ώστε να αντέχει σε μεγάλες καταπονήσεις (μεγάλα φορτία ανεμοπίεσης, χιονιού, θερμικά φορτία κ.λ.π) με ελαχιστοποίηση του απαραίτητου πάχους του.

Στον (πίνακα 1) αναφέρονται ιδιότητες που δεν αποτελούν φυσικές σταθερές του γυαλιού ως υλικό, αλλά εξαρτώνται άμεσα από τις εφαρμογές (έκταση ζώνης ελκυσμού, διάρκεια και είδος φόρτισης, κατάσταση της επιφάνειας του γυαλιού κ.λ.π.)

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες και Κανονισμοί μονολιθικών υαλοπινάκων

Ιδιότητες	Σύμβολο	κοινό γυαλί Floatglass DIN 1249	Ενισχυμένο γυαλί Securit DIN 18516, DIN 1249 T12	Έλεγχοι ως προς
Πυκνότητα	$\rho$		$2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	DIN 1249 DIN EN 572
Σκληρότητα χάραξης κατά Mohs	-		5 έως 6	DIN EN 101 DIN 52333, DIN ISO 9385
Σκληρότητα κατά Knoop	HK 0,1/20		470 HK 0,1/20	
Πυκνότητα σε οπλισμένο γυαλί	$\rho$	$2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	-	-
Μέτρο ελαστικότητας	$E_{\text{stat}}$	$7,3 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$	$7,0 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$	DIN 52303 T1
Νούμερο Poisson	$\mu$		0,23	-
Αντοχή σε ελκυσμό	$\sigma_{\text{ε}}$		30 – 80 MPa	
Αντοχή σε θλίψη	$\sigma_{\theta}$		700 έως 900 MPa	DIN 51067 T1

Αναφέρονται επίσης τα παρακάτω χαρακτηριστικά του γυαλιού:

- Έχει μεγάλη οπτική διαφάνεια.
- Δεν είναι στερεό διότι σε αυξανόμενη θερμοκρασία δεν παρουσιάζει σημείο τήξης, αλλά ελαττώνεται συνεχώς το ιξώδες του, ενώ στερεοποιείται μέρος του με τη πάροδο του χρόνου.
- Έχει ειδικό βάρος =  $2,23 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$  (D50 της Jena) έως  $3,02 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$  (μολυβδίαλος 8095 της Jena) και  $3,45 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$  (τύπος 1190).
- Προσβάλλεται από το υδροφθόριο, ενώ έχει κάποια ευπάθεια σε βάσεις, οξέα και νερό ανάλογα με την θερμοκρασία και τη σύνθεσή του.

- Παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Επειδή όμως είναι τήγμα ηλεκτρολυτών με την αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνεται το ιξώδες και αυξάνει η αγωγιμότητα.
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του είναι μικρός, αλλά ως δυσθερμαγωγό και εύθραυστο, κάθε απότομη ψύξη ή θέρμανση προκαλεί τάσεις που τείνουν να το καταστρέψουν. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής ελαττώνεται με αύξηση περιεκτικότητας σε  $\text{SiO}_2$ .
- Είναι μονωτικό υλικό και δεν κονιοποιείται ούτε προσβάλλεται από μικροοργανισμούς.
- Εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη. Γενικά η αντοχή σε θλίψη κυμαίνεται από 4  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  έως 5000  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  και σε εφελκυσμό από 500  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  έως 1000  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ .
- Η τάση εφελκυσμού είναι 70  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  για κοινό γυαλί και 150  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  έως 300  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$  για γυαλί με θερμική κατεργασία.
- Παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα λόγω ύπαρξης πυριτικών αλάτων. Το πυρίτιο και αργίλιο αυξάνουν τη σκληρότητα ενώ το ασβέστιο και νάτριο την ελαττώνουν..
- Τα γυάλινα παράθυρα και πόρτες έχουν ελάχιστη πυραντίσταση.

Επίδραση μερικών χημικών στοιχείων σε φυσικές ιδιότητες της υάλου

Στοιχείο	Επίδραση	Εφαρμογή
Αντιμόνιο (Sb)	Εξουδετερώνει το πράσινο χρώμα που οφείλεται στον ακάθαρτο σίδηρο	Σε πολλούς τύπους υάλου. Επιτρέπει τη διέλευση του υπέρυθρου φωτός.
Αργυρος (Ag)	Κίτρινο χρώμα	Χρωματιστή υάλος
Βανάδιο (V)	Πράσινο χρώμα. Απορροφά μέρος του φάσματος	Χρωματιστή υάλος
Βιρύλλιο (Be)	Αυξάνει το δείκτη διάθλασης και την αντίσταση στις καιρικές συνθήκες	Σε πολλούς τύπους υάλου
Κασσίτερος (Sn)	Βοηθά στην οξείδωση του σιδήρου και τη μείωσή του.	Σε όλους τους τύπους υάλου
Μόλυβδος (Pb)	Αυξάνει την πυκνότητα, τη φωτεινότητα και το δείκτη διάθλασης	Κρύσταλλα
Σελήνιο (Se)	Ροζ χρώμα	Χρωματιστή υάλος
Σίδηρος (Fe)	Χρώμα της θάλασσας	Χρωματιστή υάλος
Τιτάνιο (Ti)	Ιώδες χρώμα και μαζί με σίδηρο κίτρινο	Χρωματιστή υάλος
Φθόριο (F)	Μειώνει το δείκτη διάθλασης και το ιζώδες της πλαστικής κατάστασης	Φωτεινή υάλος
Χαλκός (Cu)	Κόκκινη υάλος με $\text{Cu}_2\text{O}$ και μπλε με $\text{CuO}$	Χρωματιστή υάλος
Ψευδάργυρος (Zn)	Μειώνει το συντελεστή διαστολής και αυξάνει την αντίσταση στις καιρικές συνθήκες	Σε πολλούς τύπους υάλου



## 2.2 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Ο R.D.RAWLINGS και οι συνεργάτες του [16] μελέτησαν σύνθετα γυαλιά κεραμικής μήτρας.

Κεραμικά γυαλιά παράγονται από κρυστάλωση γυαλιού που δημιουργούν ένα πολικρυσταλικό υλικό. Αυτά έχουν σημαντικές δυνατότητες όσον αφορά τις μήτρες των σύνθετων υλικών, που η επεξεργασία τους γίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες σε αντίθεση με εκείνες που απαιτούνται στα κεραμικά υλικά. Με προσθήκη ινών παρουσιάζουν καλύτερη μηχανική αντοχή και σκληρότητα. Για θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό καλύπτονται ανάλογα με την περίπτωση. Γυαλί με ίνες άνθρακα (σύνθετο υλικό), ενισχυμένο.

Ο J.Jeong και οι συνεργάτες του [17] μελέτησαν νέο μοντέλο για θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό με βάση τη δυναμική ρωγμή στα εύθραυστα υλικά.

Η μηχανική αντοχή των εύθραυστων υλικών υπό δυναμική φόρτιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλεφθεί η αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό. Η αύξηση της μηχανικής αντοχής έχει ερευνηθεί για κρύσταλο μολύβδου. Η ρωγμή κάτω από φορτία έχει παρατηρηθεί στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM σε κρύσταλο μολύβδου. Όταν έχουμε υψηλές θερμοκρασίες σε μικρή χρονική διάρκεια παρουσιάζονται ρωγμές και νυφάδες στο υλικό. Στην ταχεία ψύξη παίζει ρόλο ο χρόνος επίδρασης της θερμότητας στο υλικό. Στη μέγιστη δυναμική αντίσταση παίζει ρόλο για το θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό ο χρόνος που διαρκεί η θερμομηχανική καταπόνηση.

Οι K.A. Cerqua, S.D. JACOBS και A. Lindquist [18] μελέτησαν την ιοντοανταλλακτική μέθοδο για να ενισχύσουν φωσφορικό laser γυαλί.

Φωσφορικό γυαλί λέιζερ έχει ενισχυθεί χημικά χρησιμοποιώντας μια διαδικασία ανταλλαγής ιόντων. Η διαδικασία βελτιώνει την αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό του γυαλιού και την κάνουν βιώσιμη και υποψήφια για χρήση σε υψηλής και μέσης ισχύος συστήματα λέιζερ.

Οι Y. Pontikes ,L. Esposito , A. Tucci , G.N. Angelopoulos [19] μελέτησαν τη θερμική συμπεριφορά πηλών για τα παραδοσιακά κεραμικά, με πυριτικό κοινό γυαλί και πρόσμιξη απορριμάτων γυαλιού.

Όταν υπάρχουν προσμίξεις ασβεστίτη με γυαλί η όπτιση γίνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 700°C. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται σε παγίδευση των αερίων που απελευθερώνονται, κυρίως CO<sub>2</sub>. Η πυροσυσσωμάτωση ξεκινά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για τα δείγματα με το γυαλί, ενώ μία δεύτερη ζώνη παρατηρήθηκε για θερμοκρασίες που προσεγγίζουν τους 1000°C. Ο ασβεστίτης είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν την ορυκτολογία του συμπικνωμένου σώματος. Αύξηση της θερμοκρασίας ψησίματος ή μείωση στην κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του γυαλιού προωθεί την πύκνωση του σώματος.

Οι ερευνητές O. Peitkai E.D. Zanotto [20] προσδιόρισαν πειραματικά τη συμπεριφορά σε θερμική οξειδωση ομάδων βοροπυριτιούχων υάλων, που είχαν υποστεί αύξηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας μέσω χημικής επίδρασης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με ιοντοεναλλαγή σε διάλυμα KNO<sub>3</sub>. Με την εφαρμογή του φαινομένου της ιοντοεναλλαγής παρατηρήθηκε διαφοροποίηση ως προς την κρίσιμη θερμοκρασία που απαιτείται ενεργειακά για την έναρξη της θραύσης μέσω θερμικού αιφνιδισμού.

Ο D.P.HHasselman [21] μελέτησε την ενεργειακή συσχέτιση σε ότι αφορά την έναρξη της θραύσης και τη διάδοση των ρηγματώσεων σε ψαθυρά κεραμικά υλικά σε καταπόνηση θερμικού αιφνιδισμού. Πειραματικά προσδιόρισε το κινηματικό μοντέλο διάδοσης ρωγματώσεων μικρού μήκους, επισημαίνοντας ότι για τη διάδωσή τους απαιτείται σχετική αύξηση της θερμοκρασίας. Για τη διάδοση ρωγματώσεων μεγάλου μήκους βασίστηκε σε ημιστατικό και όχι κινηματικό μηχανισμό. Τέλος προσδιόρισε ως ιδιαίτερα σημαντική την επίδραση της παραμέτρου σταθερότητας της ρωγμής εντός πεδίου θερμικών τάσεων (thermal stress crack stability  $R_{st}=[G/a^2E]^{1/2}$ ).

Ο ερευνητής W.D.KINGERY [22] απέδωσε μέσω θερμοδυναμικής και μηχανισμών μεταφοράς μάζας και θερμότητας των προφίλ της κατανομής και διαβάθμισης της θερμοκρασίας, αλλά και τον υπολογισμό της αντίστασης σε θερμικές τάσεις κεραμικών υλικών. Κατάληξε ότι οι κυρίαρχοι παράγοντες που επιδρούν στην αντίσταση ανάπτυξης θερμικών τάσεων είναι το μέγεθος και σχήμα του δοκιμίου, ο ρεολογικός χαρακτηρισμός διάδοσης της θερμοκρασίας, ο θερμικός συντελεστής διαστολής, το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του κεραμικού υλικού.

### 3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σκοπός της παρούσης μελέτης είναι η συμπεριφορά υάλου νατρίου σε θερμοκρασιακούς αιφνιδιασμούς, σε θερμοκρασία 150°C, 250°C, 350°C και 450°C στους 10, 20, 30 και 40 κύκλους.

Η διάρκεια κάθε κύκλου είναι δέκα λεπτά. Πέντε λεπτά η διάρκεια παραμονής του δοκιμίου μέσα στο φούρνο και πέντε λεπτά έξω απ' αυτόν.

Στην ίδια θερμοκρασία και στους ίδιους κύκλους, στο τέλος κάθε πειράματος, ένα δοκίμιο παραμένει στον αέρα και ένα άλλο εμβαπτίζεται στο νερό, σε θερμοκρασία δωματίου.

Ζυγίζονται τα δοκίμια που παραμένουν στον αέρα, πριν και μετά το πείραμα, για έλεγχο πιθανής μεταβολής του αρχικού τους βάρους.

Μελετούνται όλα τα δοκίμια στο οπτικό μικροσκόπιο και συγκρίνονται με το μη κατεργασμένο δοκίμιο, το οποίο δεν έχει υποστεί τη διαδικασία του πειράματος.

Τα δοκίμια που παραμένουν στον αέρα παρατηρούνται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), ώστε να ληφθούν πληροφορίες που αφορούν κυρίως τη μορφολογία και τη σύσταση της επιφάνειάς τους. Ακολουθεί σύγκριση με το μη κατεργασμένο δοκίμιο.

Τα ίδια δοκίμια εξετάζονται στην Περίθλαση ακτίνων - X για χαρακτηρισμό της δομής τους και προσδιορισμό των επί μέρους φάσεών τους.

#### **4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

##### **Γενικά**

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

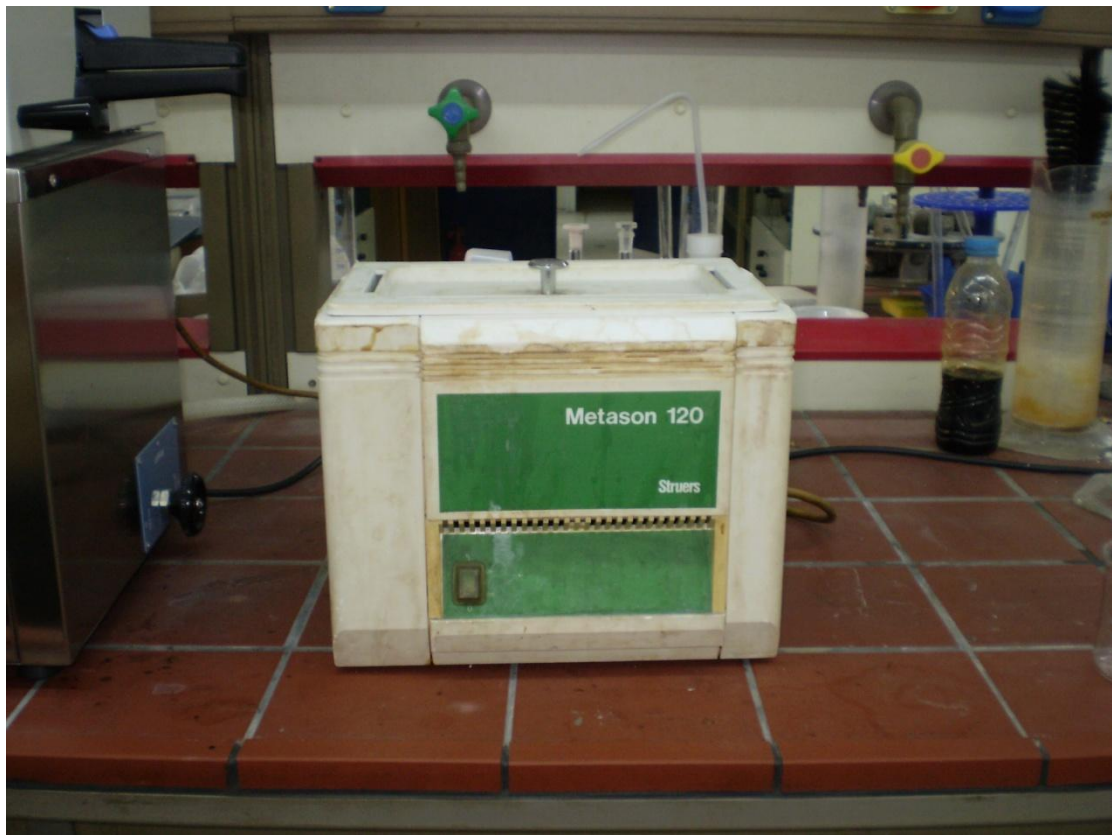
Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται όλες οι πειραματικές διαδικασίες, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας. Γίνεται αναφορά στην προετοιμασία των δοκιμίων, καθώς και στις εργαστηριακές συσκευές, που χρησιμοποιήθηκαν.

##### **Δοκίμια**

Για την πραγματοποίηση του πειράματός μας, χρησιμοποιήθηκαν 33 δοκίμια κοινού γυαλιού (soda lime glass), εκ των οποίων το ένα είναι μη κατεργασμένο, σχήματος ορθογωνίου, διαστάσεων 25,4mmx76,2mm και πάχους 1,1mm -1,2mm.

### **Προετοιμασία δοκιμίων.**

Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των δοκιμίων, διάρκειας πέντε λεπτών, με εμβάπτισή τους σε αιθανόλη και χρήση υπερήχων, σε ειδική συσκευή, εικόνα 4.1. Ακολούθησε ζύγισμα των δοκιμίων για εξακρίβωση μεταβολής του βάρους τους, πριν και μετά το πείραμα.



**Εικόνα 4.1:** Συσκευή καθαρισμού δοκιμίων με υπέρηχους

## Κλίβανος

Τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στον κλίβανο, εικόνα 4.2, σε θερμοκρασίες 150°C, 250°C, 350°C, και 450°C στους 10,20,30 και 40 κύκλους. Η διάρκεια κάθε κύκλου ήταν 10 λεπτά. Πέντε λεπτά μέσα στον κλίβανο και πέντε έξω απ' αυτόν. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε σχάρα, ώστε να θερμαίνονται ομοιόμορφα απ' όλες τις πλευρές, όταν βρίσκονται μέσα στον κλίβανο και να ψύχονται ομοιόμορφα απ' όλες τις πλευρές, όταν βρίσκονται έξω απ' αυτόν. Σε κάθε θερμοκρασία και στους αντίστοιχους κύκλους τοποθετήθηκαν δύο δοκίμια. Με το τέλος κάθε πειράματος το ένα δοκίμιο παράμεινε στον αέρα και το άλλο εμβαπτίστηκε σε δοχείο με νερό, σε θερμοκρασία δωματίου.



**Εικόνα 4.2:** Κλίβανος με σχάρα

**Παραμονή δοκιμίων στον αέρα, μετά το τέλος του πειράματος, στις παρακάτω θερμοκρασίες και κύκλους**

450°C	350°C	250°C	150°C
10 κύκλους	10 κύκλους	10 κύκλους	10 κύκλους
20 κύκλους	20 κύκλους	20 κύκλους	20 κύκλους
30 κύκλους	30 κύκλους	30 κύκλους	30 κύκλους
40 κύκλους	40 κύκλους	40 κύκλους	40 κύκλους

**Συνολικός χρόνος πειράματος, ανάλογα με τον αριθμό των κύκλων, για καθεμιά από τις παραπάνω θερμοκρασίες και για κάθε δοκίμιο.**

10 κύκλοι: 10 κύκλοι x 10 min = 100min

20 κύκλοι: 20κύκλοι x 10 min = 200min

30 κύκλοι: 30κύκλοι x 10 min = 300min

40 κύκλοι: 40κύκλοι x 10 min = 400min

**Ζύγισμα δοκιμίων**

Μετά το τέλος του πειράματος, τα δοκίμια που παράμειναν στον αέρα ζυγίστηκαν για να διαπιστωθεί εάν επηρεάστηκε το βάρος τους.



**Εμβάπτιση δοκιμίων στο νερό, μετά το τέλος του πειράματος, στις παρακάτω θερμοκρασίες και κύκλους.**

450°C	350°C	250°C	150°C
10 κύκλους	10 κύκλους	10 κύκλους	10 κύκλους
20 κύκλους	20 κύκλους	20 κύκλους	20 κύκλους
30 κύκλους	30 κύκλους	30 κύκλους	30 κύκλους
40 κύκλους	40 κύκλους	40 κύκλους	40 κύκλους

**Συνολικός χρόνος πειράματος, ανάλογα με τον αριθμό των κύκλων, για καθεμιά από τις παραπάνω θερμοκρασίες και για κάθε δοκίμιο.**

10 κύκλοι:	10 κύκλοι x 10 min = 100min
20 κύκλοι:	20 κύκλοι x 10 min = 200min
30 κύκλοι:	30 κύκλοι x 10 min = 300min
40 κύκλοι:	40 κύκλοι x 10 min = 400min

Μετά την εμβάπτιση των δοκιμίων στο νερό, παρατηρήθηκαν ρωγμές στα δοκίμια στις θερμοκρασίες των 350°C και 450°C, λόγω ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων, από την απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας.

### **Οπτικό μικροσκόπιο**

Στην οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιείται το μικροσκόπιο προσπίπτουσας δέσμης φωτός, εικόνα 4.3. Τα βασικά του στοιχεία περιλαμβάνουν τα διάφορα οπτικά μέρη και τα συστήματα φωτισμού. Σε υλικά που είναι αδιαφανή στο ορατό φως (όλα τα μέταλλα και πολλά κεραμικά και πολυμερή) μόνο η επιφάνεια μπορεί να είναι αντικείμενο παρατήρησης και το μικροσκόπιο προσπίπτουσας δέσμης φωτός πρέπει να χρησιμοποιείται στη θέση ανάκλασης (reflecting mode). Οι αντιθέσεις στην παραγόμενη εικόνα προκύπτουν από διαφορές στην ανακλαστικότητα διάφορων περιοχών της μικροδομής.

### **Παρατήρηση δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο**

Μετά την ολοκλήρωση των θερμοκρασιακών αιφνιδιασμών, όπου υποβλήθηκαν τα δοκίμια, σε θερμοκρασίες 150°C, 250°C, 350°C και 450°C και σε 10, 20, 30 και 40 κύκλους, όλα τα δοκίμια και εκείνα που παράμειναν στον αέρα και εκείνα που εμβαπτίστηκαν στο νερό, καθώς και το μη κατεργασμένο, μελετήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο.



**Εικόνα 4.3:** Οπτικό μικροσκόπιο

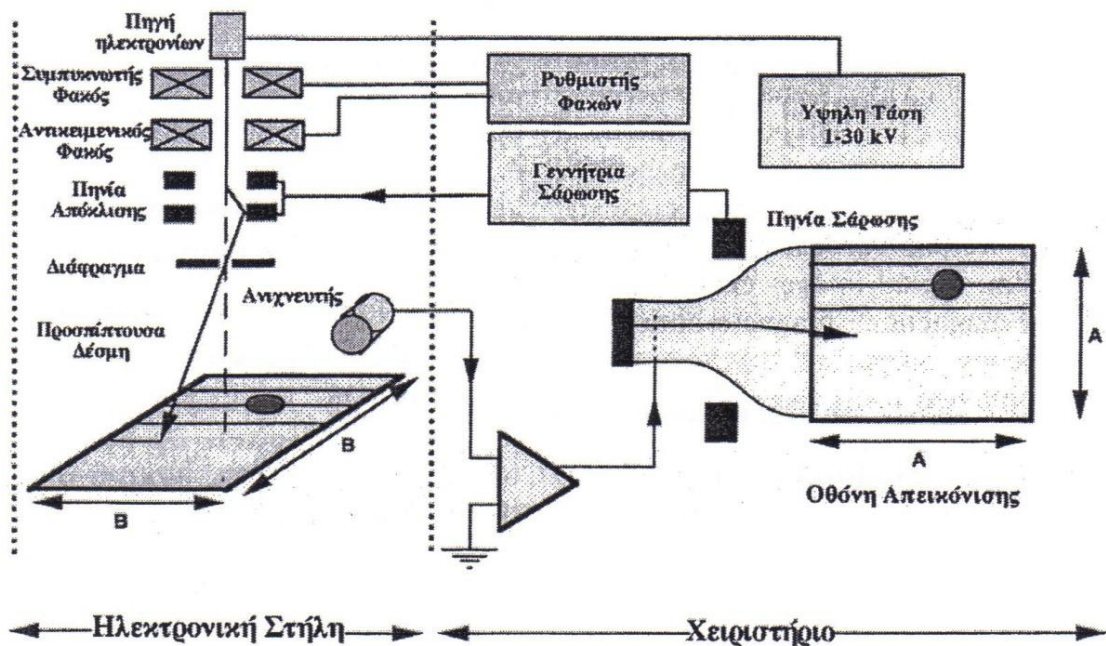
## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ - SEM

### Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους με πολλαπλές χρήσεις αφού προσφέρει τη δυνατότητα για την τοπογραφική και μορφολογική μελέτη καθώς και τον προσδιορισμό της σύστασης της ύλης. Η αρχή λειτουργίας της μικροσκοπίας σάρωσης βασίζεται στη χρήση ενός διερευνητή – αισθητήρα (probe), ο οποίος καλείται με κάποια φυσική διεργασία να διεγείρει την κατάλληλη πληροφορία από κάθε στοιχείο της επιφάνειας και ακολούθως ο αρμόδιος ανιχνευτής – καταγραφέας να τη συλλέξει. Στην περίπτωση της Σαρωτικής Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας (Scanning Electron Microscopy, SEM) ο διερευνητής – αισθητήρας είναι μια δέσμη ηλεκτρονίων και ο ανιχνευτής συλλέγει τα προϊόντα της αλληλεπίδρασης της δέσμης με την επιφάνεια. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Ακόμη, εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων-Χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Στο μικροσκόπιο SEM, εικόνα 4.4, υπάρχουν δυο διακριτά θεμελιώδη τμήματα:

- α) Το τμήμα της ηλεκτρονικής στήλης
- β) Το τμήμα ελέγχου, επεξεργασίας και απεικόνισης των σημάτων. Ρυθμίζει τη σάρωση της επιφάνειας και την εμφάνιση της τελικής πληροφορίας.



**Εικόνα 4.4:** Σχηματική παράσταση ενός σαρωτικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Επισημαίνονται τα δυο θεμελιώδη τμήματα.

Η ηλεκτρονική στήλη αποτελεί την «καρδιά» του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, καθώς συμπεριλαμβάνει τα ηλεκτροοπτικά στοιχεία παραγωγής και εστίασης της δέσμης των ηλεκτρονίων και το σύστημα ανιχνευτών. Η χρήση του SEM απαιτεί η στήλη να βρίσκεται υπό κενό για να μπορεί η ακτίνα των ηλεκτρονίων να διατηρηθεί σταθερή, ειδάλλως, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα μόρια του αέρα κι απορροφώνται. Το σύστημα κενού αποτελείται από:

- \* αντλίες παραγωγής του κενού και θάλαμο διατήρησής του,
- \* βαλβίδες ελέγχου κενού και δείκτες παρακολούθησης.

Τέλος, το σύστημα ανίχνευσης και απεικόνισης του σήματος συμπεριλαμβάνει

- \* ανιχνευτές που δέχονται τα σήματα που παράγονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης με το δείγμα,
- \* σύστημα παρουσίασης – το ηλεκτρονικό τμήμα που δημιουργεί, μεγεθύνει και καταγράφει την εικόνα.

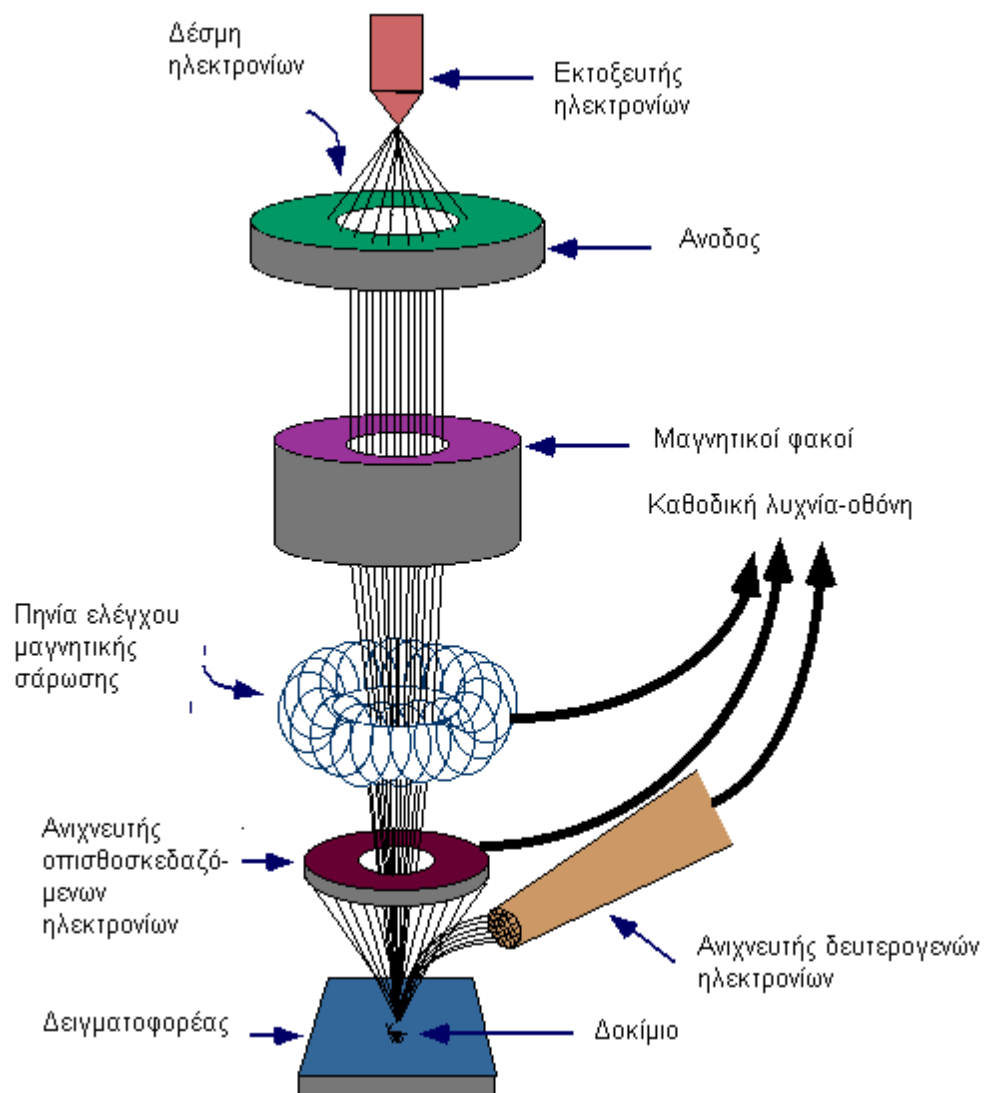
Ένα μικροσκόπιο SEM συνήθως είναι εφοδιασμένο μ' έναν κατάλληλο ανιχνευτή ακτίνων -Χ ώστε να παρέχεται η δυνατότητα στοιχειομετρικής ανάλυσης του παρατηρούμενου δείγματος. Ένα τέτοιο SEM είναι ένα αναλυτικό ηλεκτρονικό

μικροσκόπιο σάρωσης (analytical SEM). 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 Spectrometer, EDS).

Το διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης παρουσιάζεται στην (εικ. 4.5). Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται θερμοϊονικά από την κάθοδο, ένα νήμα βολφραμίου, W ή LaB<sub>6</sub>. Χρησιμοποιείται το βολφράμιο γιατί έχει το υψηλότερο σημείο τήξης και τη χαμηλότερη τάση ατμών από όλα τα μέταλλα, επιτρέποντας έτσι την υπερθέρμανσή του. Μέσα από το νήμα περνάει ρεύμα, και καθώς αυξάνεται, παράγονται ηλεκτρόνια που κατευθύνονται προς την άνοδο στην οποία εφαρμόζεται δυναμικό 1-30 KV. Αν το ρεύμα συνεχίσει να αυξάνεται τότε φτάνουμε στον κορεσμό του νήματος (filament saturation), μια κατάσταση στην οποία δεν εκπέμπονται πλέον άλλα ηλεκτρόνια. Η άνοδος επιταχύνει και κατευθύνει τα ηλεκτρόνια μέσω ισχυρών ηλεκτρικών δυνάμεων. Ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, παρεμβάλλεται ένας ηλεκτρομαγνητικός συγκλίνοντας φακός (condenser lens), που μετατρέπει τα ηλεκτρόνια σε δέσμη και η ισχύς του καθορίζει τη διάμετρο της δέσμης, που κυμαίνεται μεταξύ 5 nm και 2 μm. Η ενεργός διατομή της δέσμης είναι καθοριστική παράμετρος της διακριτικής ικανότητας του SEM, όπως επίσης και η γωνία σύγκλισης της δέσμης επάνω στο δείγμα που καθορίζει το βάθος πεδίου.

Η ηλεκτρονική ακτίνα με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης πηνίων μπορεί να αποκλίνει οριζόντια και κάθετα και να σαρώνει την επιφάνεια του προς μελέτη δείγματος. Όταν η εισερχόμενη δέσμη αλληλεπιδρά με το υλικό, τα ηλεκτρόνια ανταλλάσσουν και χάνουν ενέργεια από τις επαναλαμβανόμενες σκεδάσεις και απορροφήσεις, με αποτέλεσμα να εκπέμπονται δέσμες ηλεκτρονίων και χαρακτηριστικές ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Ένας κατάλληλος ανιχνευτής τοποθετημένος κοντά στο δείγμα, συλλέγει ένα μεγάλο ποσοστό των δευτερευόντων ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την επιφάνεια του δείγματος και ένα μικρότερο αριθμό οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Η πληροφορία που μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο ενισχύεται σε κατάλληλο σύστημα ενισχυτών και διαβιβάζεται στην είσοδο ενός καθοδικού σωλήνα (CRT).

Τέλος, εμφανίζεται στην οθόνη του οργάνου ως εικόνα και εύκολα αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή.



**Εικόνα 4.5 :** Διάγραμμα λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Η ηλεκτρονική Μικροσκοπία σαρωτικής δέσμης αποτελεί μια σπουδαία τεχνική για τη μελέτη της επιφάνειας της ύλης και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εύρεση της γεωμετρίας και τη σύσταση της μικροδομής. Συνδυάζει μεγάλη μεγέθυνση και μεγάλο βάθος πεδίου, παράγοντες πολύ περιορισμένους στην οπτική μικροσκοπία. Η εικόνα σχηματίζεται από ηλεκτρικό σήμα χωρίς τη χρήση μεγεθυντικών φακών, και

έτσι αποφεύγονται τα σφάλματα των φακών. Η μεγάλη δυνατότητα εστίασης, η ελάχιστη προετοιμασία του δείγματος και τα τρισδιάστατα διαγράμματα που μας προσφέρει το SEM το καθιστούν ένα απαραίτητο όργανο έρευνας. Το μειονέκτημα του SEM είναι η μικρή διακριτική ικανότητα λόγω μη σχηματισμού δέσμης πολύ μικρής διαμέτρου.

Τα σύγχρονα όργανα διαθέτουν κατάλληλους ανιχνευτές και εκμεταλλεύονται όλους τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης προσπίπτουσας δέσμης και δείγματος για εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων. Σήμερα, το SEM χρησιμοποιείται για τη μελέτη μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών όπως π.χ. βιολογικά, μεμβράνες, φίλτρα, ίνες, ρητίνες, χρώματα, μεταλλικές επιφάνειες, αρχαιολογικά, ορυκτά κλπ.

### **Παρατήρηση δοκιμίων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM**

Μετά την ολοκλήρωση των θερμοκρασιακών αιφνιδιασμών, όπου υποβλήθηκαν τα δοκίμια, σε θερμοκρασίες 150°C, 250°C, 350°C, και 450°C και σε 10, 20, 30 και 40 κύκλους, όλα τα δοκίμια που παράμειναν στον αέρα, καθώς και το μη κατεργασμένο, μελετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM

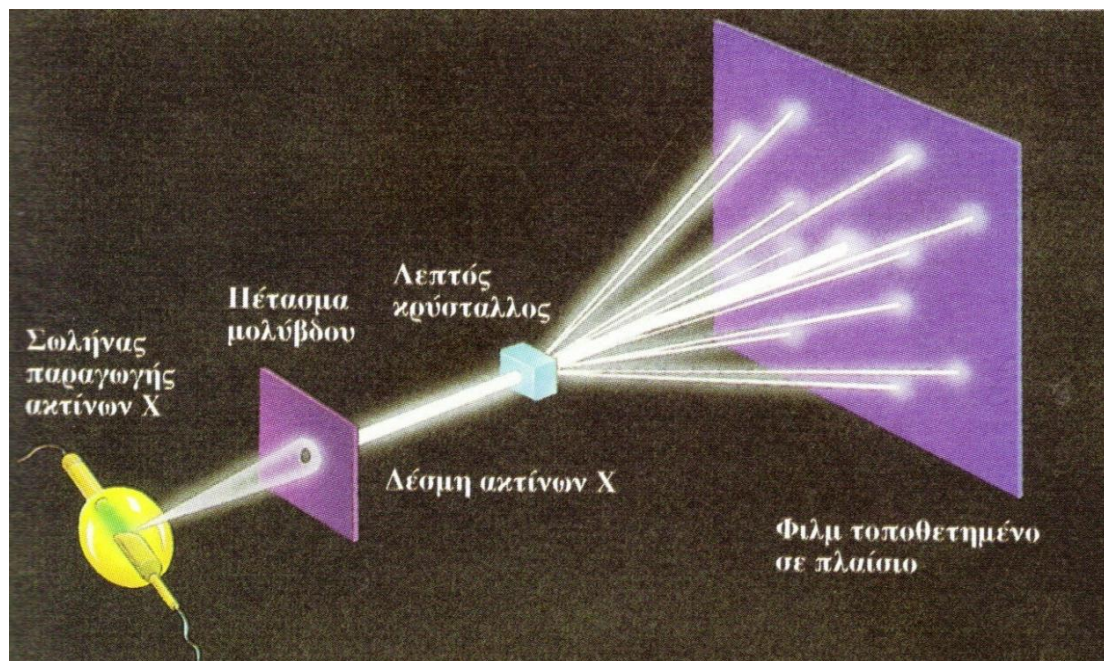


## ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ – XRD

### Περίθλαση ακτίνων-Χ (XRD)

Η περίθλαση, περιγράφεται στη φυσική, ως το φαινόμενο της διάχυσης των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις όταν αυτά προσπίπτουν σε ένα φράγμα ή οπή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματος. Το φράγμα αποτελείται από παράλληλες σχισμές ίσου πλάτους  $d$  και θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός  $d \leq \lambda$ .

Ο Max von Laue ήταν ο επιστήμονας που έθεσε τα θεμέλια της τεχνικής του XRD και πρότεινε ότι θα ήταν δυνατό ένας φυσικός κρύσταλλος να αποτελέσει ένα είδος τρισδιάστατου φράγματος περίθλασης των ακτίνων Χ αφού η διάταξη των ατόμων στον κρύσταλλο μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά από παράλληλα δικτυωτά επίπεδα, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους αποστάσεις της τάξης του 1 Å. Ως συνέπεια αυτού, μια δέσμη ακτίνων Χ θα μπορούσε να υποστεί σκέδαση, να απορροφηθεί και να εκπεμφθεί εκ νέου, από μεμονωμένα άτομα του κρυστάλλου. Τα αρχικά πειράματα περίθλασης πραγματοποιήθηκαν από τον Knipping και τον Laue, και επιβεβαίωσαν πως οι ακτίνες Χ είναι κύματα και τα άτομα σε έναν κρύσταλλο είναι διευθετημένα σε μια κανονική διάταξη (εικ. 4.6) Έκτοτε, η τεχνική χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής.

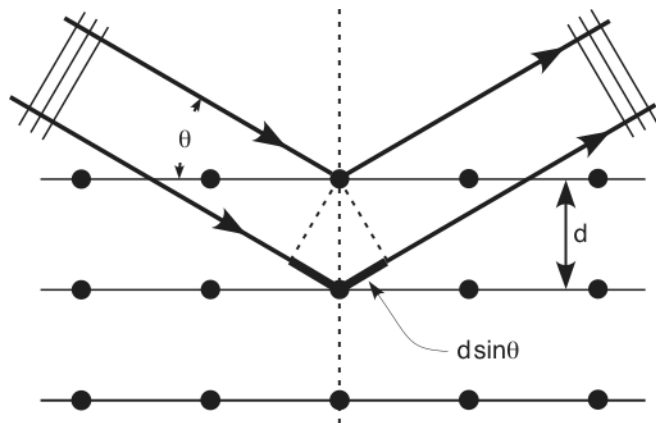


**Εικόνα 4.6:** Σε ένα πείραμα περίθλασης ακτίνων Χ, οι περισσότερες ακτίνες Χ διέρχονται διαμέσου του κρυστάλλου χωρίς να σκεδαστούν, ορισμένες όμως υφίστανται σκέδαση, σχηματίζοντας ένα διαμόρφωμα συμβολής. Με τον τρόπο αυτόν το φιλμ εκτίθεται σε ένα διαμόρφωμα που σχετίζεται με τη διάταξη των σχετικών θέσεων των ατόμων μέσα στον κρύσταλλο, το οποίο και αποτυπώνει.

Η μελέτη της δομής, απαιτεί την εφαρμογή του νόμου της σκέδασης ή συνθήκη του Bragg, προς τιμή των πρωτοπόρων της έρευνας στην περιοχή της περίθλασης ακτίνων Χ, W. και L. Bragg, πατέρα και υιού, που συνδέει το μήκος κύματος,  $\lambda$ , της ακτινοβολίας, τη γωνία περίθλαση  $\theta$ , και την πλεγματική απόσταση (interplanar distance),  $d$  μεταξύ των ατόμων σε ένα κρύσταλλο (σχ. 4.1).

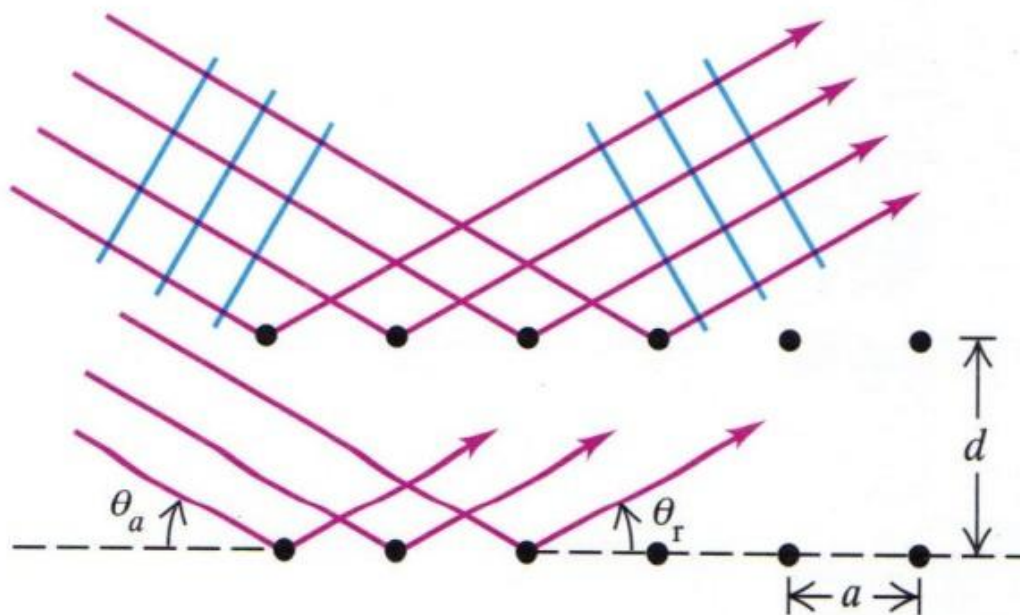
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \eta \mu \theta \quad (n=0,1,2,3\dots)$$

όπου  $n$  ακέραιος αριθμός που παίρνει τιμές 0, 1, 2, 3, 4 και αναφέρεται στα διαδοχικά παράλληλα νοητά κρυσταλλικά επίπεδα, που όλα παράγουν ενισχυτική συμβολή.



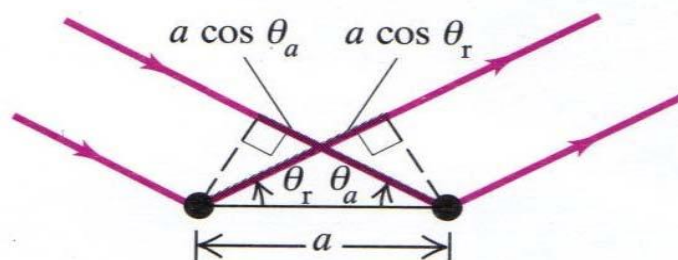
**Σχήμα 4.1:** Περίθλαση από κρύσταλλο. Λόγω της ελαστικής σκέδασης των ακτίνων Χ, κάθε άτομο αποτελεί δευτερογενή πηγή ακτινοβολίας. Για ορισμένες γωνίες  $\theta$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η διαφορά στη διαδρομή του κύματος μεταξύ δύο ατόμων δίνει μέγιστα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε γωνία  $\theta$ , ανάλογα με το μήκος κύματος  $\lambda$  της ακτινοβολίας και την απόσταση  $d$  των κρυσταλλικών επιπέδων (σχέση Bragg:  $2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$ ).

Ο θεμελιώδης νόμος που διέπει την περίθλαση ακτίνων Χ από κρυσταλλικά υλικά, εξάγεται ως εξής: Θεωρούμε πως ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει σε ένα δισδιάστατο ορθογώνιο πλέγμα κέντρων σκέδασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.

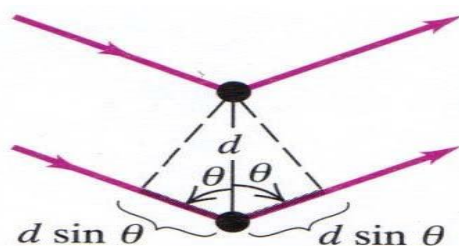


**Σχήμα 4.2:** Σκέδαση κυμάτων από μια ορθογώνια συστοιχία (πλέγμα), μια διάταξη δυο διαστάσεων.

Καθώς, η ακτίνα είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, προσδίδει στο σκεδαστή μια ταλαντούμενη ηλεκτρική διπολική ροπή δημιουργώντας εκπομπή σκεδαζόμενων κυμάτων. Το προκύπτον διαμόρφωμα συμβολής είναι η επαλληλία όλων αυτών των κυμάτων. Το διαμόρφωμα συμβολής ή διαμόρφωμα περίθλασης ακτίνων  $X$  είναι εναλλαγές περιοχών μηδενικής έντασης (σκοτεινές) και μέγιστης έντασης (φωτεινές). Ο υπολογισμός του συνάγεται εάν θεωρήσουμε τις συνολικές διαφορές δρόμου, που περιλαμβάνουν την απόσταση πηγής – σκεδαστή και σκεδαστή– παρατηρητή. Στην περίπτωση που οι γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης, θα και  $\theta_r$  αντίστοιχα, είναι ίσες, το μήκος της απόστασης από την πηγή ως το σκεδαστή είναι το ίδιο για όλους τους σκεδαστές της ίδιας σειράς [σχ. 4.3.(I)]. Σε γειτονικές σειρές ισχύει εφόσον η διαφορά είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκος κύματος. Το σχήμα 4.3(II) δείχνει πως αυτή η απόσταση είναι ίση με  $2d \sin\theta$ .



( I )



( II )

**Σχήμα 4.3:** (I) Η ενισχυτική συμβολή κυμάτων που σκεδάστηκαν από γειτονικά άτομα μιας σειράς, επιτυγχάνεται όταν η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$  είναι ίση προς τη γωνία ανάκλασης  $\theta_r$ . (II) Η συμβολή από γειτονικές σειρές ατόμων είναι επίσης ενισχυτική όταν η διαφορά δρόμου  $2d \sin\theta$  είναι ίση προς ένα ακέραιο αριθμό μηκών κύματος.

Οι προϋποθέσεις για να φθάσει στον παρατηρητή η ακτινοβολία, που προέρχεται από όλη τη συστοιχία, σε φάση είναι :

1. Η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι ίση προς τη γωνία σκέδασης
2. Η απόσταση των δυο γειτονικών σειρών να είναι ίση προς  $n\lambda$ . Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η συνθήκη του Bragg, επεκτείνοντας τη θεωρία και ανακαθιστώντας τις σειρές σκεδαστών με επίπεδα σκεδαστών. Επιπλέον, το  $d$  ισούται με την απόσταση μεταξύ των γειτονικών επιπέδων. Έτσι, γνωρίζοντας το  $d$  είναι δυνατός ο υπολογισμός του  $\lambda$ , το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ισχύει όμως και το αντίστροφο, δηλαδή γνωρίζοντας το  $\lambda$  της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός του  $d$  ενός άγνωστης δομής κρυστάλλου, με βάση το φάσμα περίθλασής του.

Σημαντικό είναι η μέτρηση της γωνίας  $\theta$ , που πραγματοποιείται ξεκινώντας από την επιφάνεια του κρυστάλλου και όχι από την κάθετη στην επιφάνεια πρόσπτωσης.

#### **Οργανολογία φασματοσκοπίας περίθλασης ακτίνων X**

Ένα περιθλασίμετρο ακτίνων X αποτελείται κυρίως από:

- I. Το σύστημα πηγής διέγερσης και παραγωγής ακτίνων X.
- II. Δυο φράγματα των ακτίνων X με μεταβαλλόμενη γεωμετρία.
- III. Το σύστημα εισαγωγής ή τοποθέτησης του δείγματος.
- IV. Το μονοχρωμάτορα, το σύστημα διασποράς και το γωνιομετρικό μηχανισμό.
- V. Το σύστημα ανίχνευσης και συλλογής των δεδομένων.



**Εικόνα 4.7 :** Όργανο φασματοσκοπίας περίθλασης ακτίνων X.

### **Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνωνΧ - XRD**

Μετά την ολοκλήρωση των θερμοκρασιακών αιφνιδιασμών, όπου υποβλήθηκαν τα δοκίμια, σε θερμοκρασίες 150°C, 250°C, 350°C και 450°C και σε 10, 20, 30 και 40 κύκλους, όλα τα δοκίμια που παράμειναν στον αέρα, καθώς και το μη κατεργασμένο, μελετήθηκαν και στο XRD

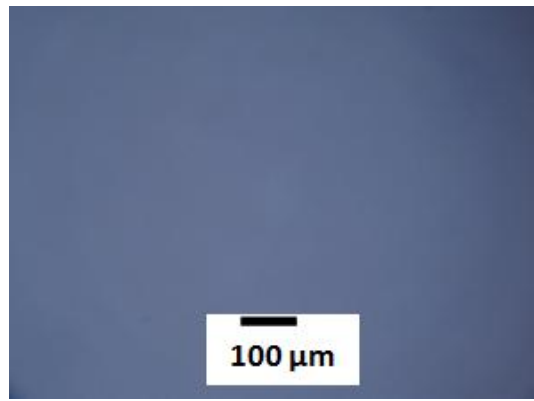
## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Παραμονή δοκιμίων στον αέρα μετά την ολοκλήρωση του πειράματος:

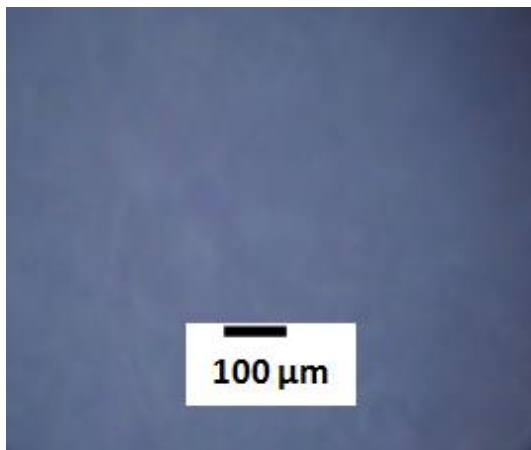
Πείραμα στους 150°C, 250°C, 350°C, 450°C

Σε 10, 20, 30, και 40 κύκλους

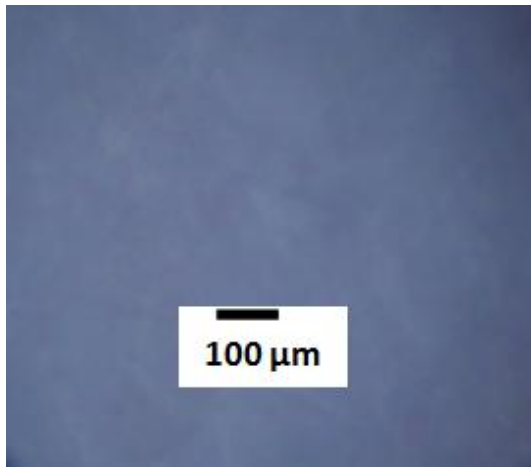
### Οπτικό μικροσκόπιο



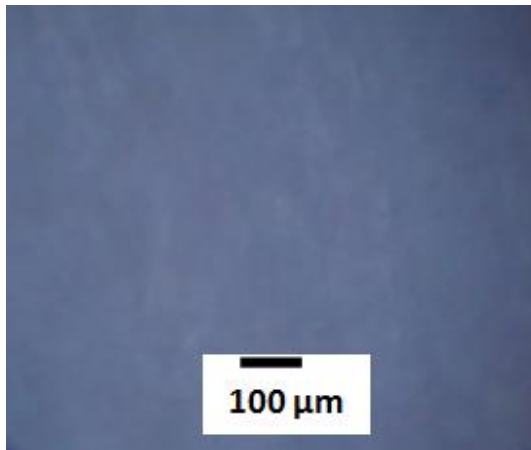
**Φωτογραφία 5.1:** Μη κατεργασμένο δοκίμιο



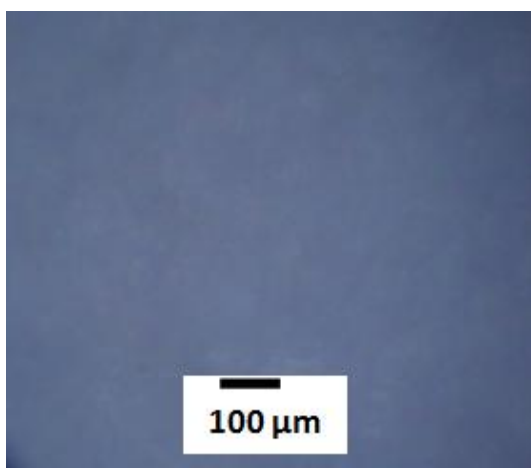
**Φωτογραφία 5.2:** 10 κύκλοι στους 150°C παραμονή στον αέρα



**Φωτογραφία 5.3:** 20 κύκλοι στους 150°C παραμονή στον αέρα



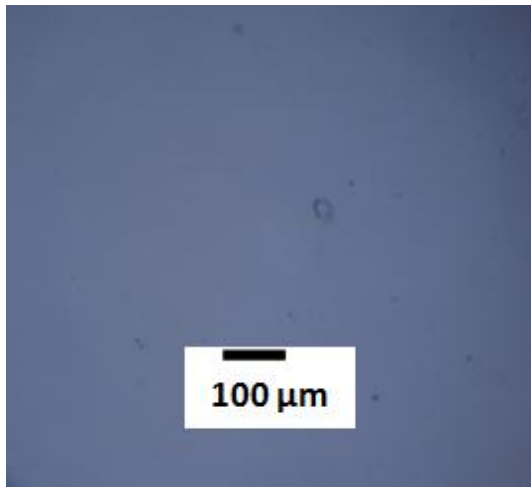
**Φωτογραφία 5.4:** 30 κύκλοι στους 150°C παραμονή στον αέρα



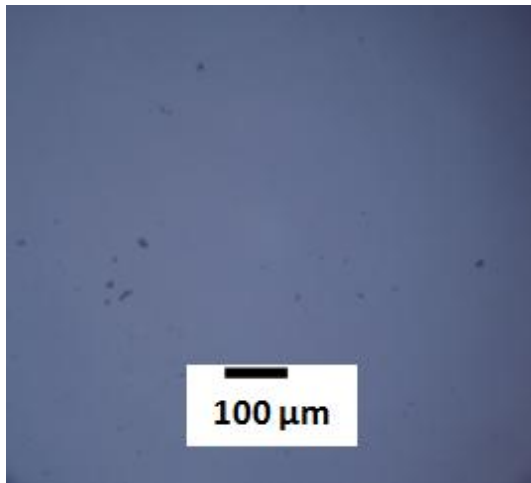
**Φωτογραφία 5.5:** 40 κύκλοι στους 150°C παραμονή στον αέρα

Στους 150°C, σε όλους τους κύκλους, αρχίζει να φαίνεται μία διαφορετική μορφολογία στην επιφάνεια των δοκιμίων, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

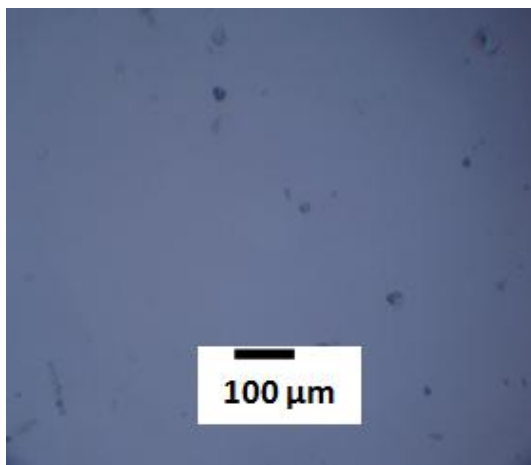




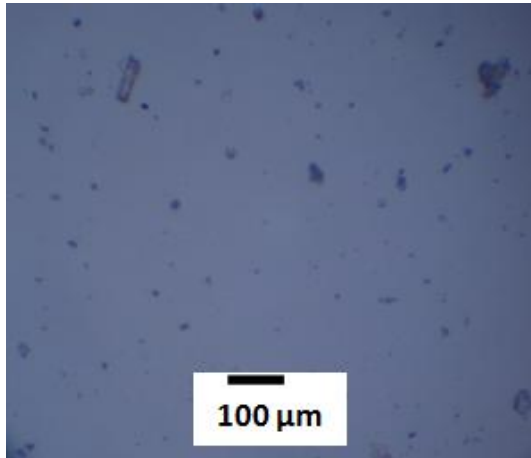
**Φωτογραφία 5.6:** 10 κύκλοι στους 250°C παραμονή στον αέρα



**Φωτογραφία 5.7:** 20 κύκλοι στους 250°C παραμονή στον αέρα

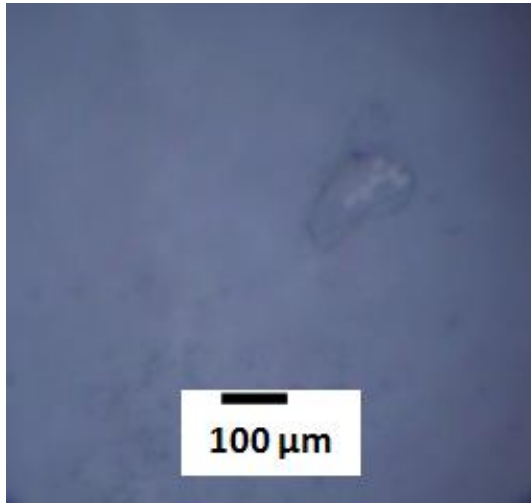


**Φωτογραφία 5.8:** 30 κύκλοι στους 250°C παραμονή στον αέρα

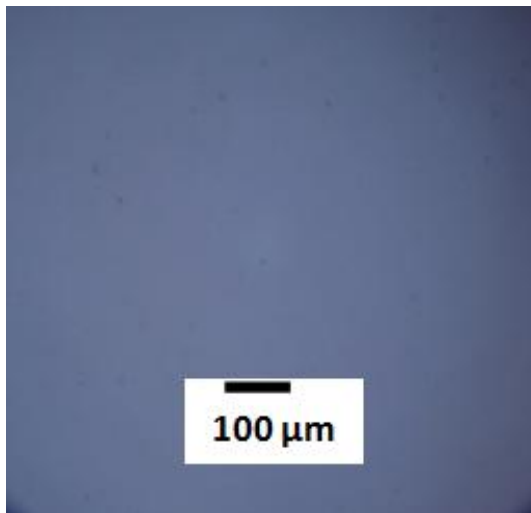


**Φωτογραφία 5.9:** 40 κύκλοι στους 250°C παραμονή στον αέρα

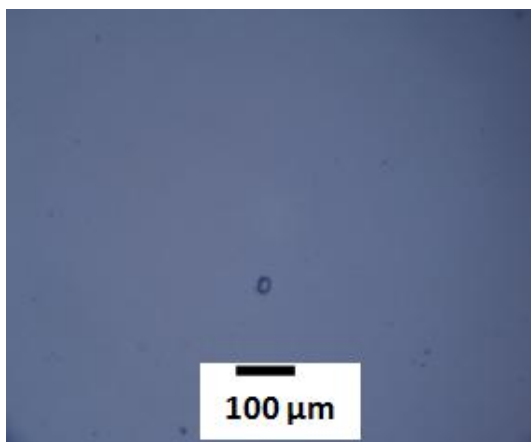
Στους 250°C, καθώς αυξάνουν οι κύκλοι, γίνεται όλο και πιο έντονη η διαφορετική μορφολογία των επιφανειών των δοκιμίων. Έντονα στίγματα εμφανίζονται που γίνονται πυκνότερα και το σχήμα τους επιμηκύνεται. Τα στίγματα αυτά πιθανότατα είναι οξειδία που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια του πειράματος.



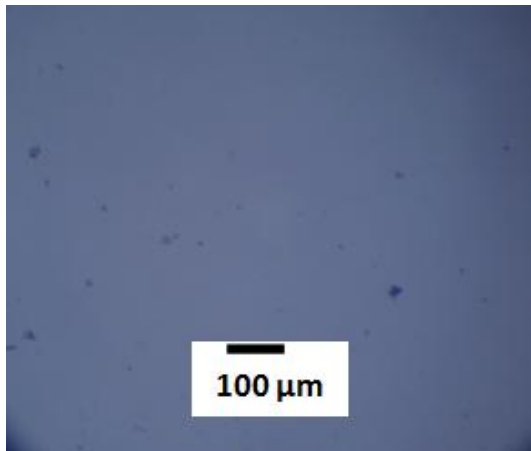
**Φωτογραφία 5.10:** 10 κύκλοι στους 350°C παραμονή στον αέρα



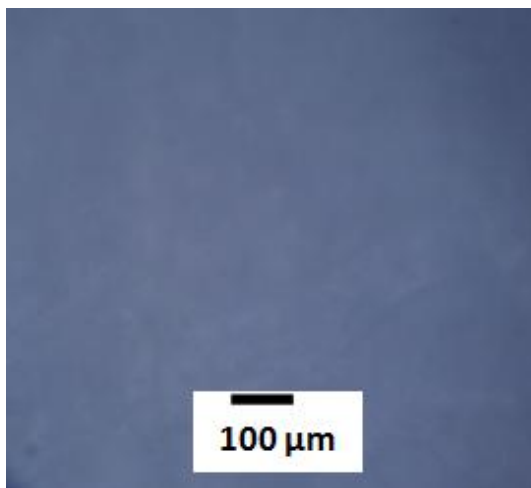
**Φωτογραφία 5.11:** 20 κύκλοι στους 350°C παραμονή στον αέρα



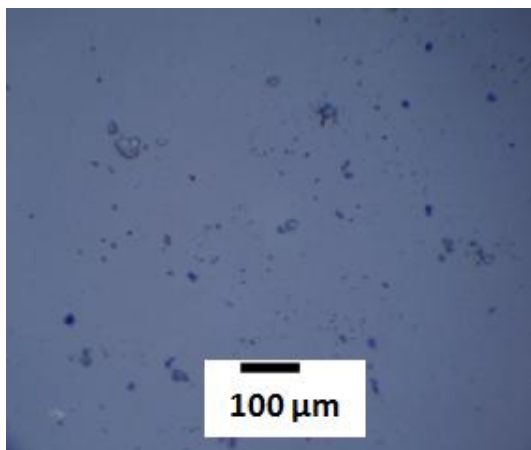
**Φωτογραφία 5.12:** 30 κύκλοι στους 350°C παραμονή στον αέρα



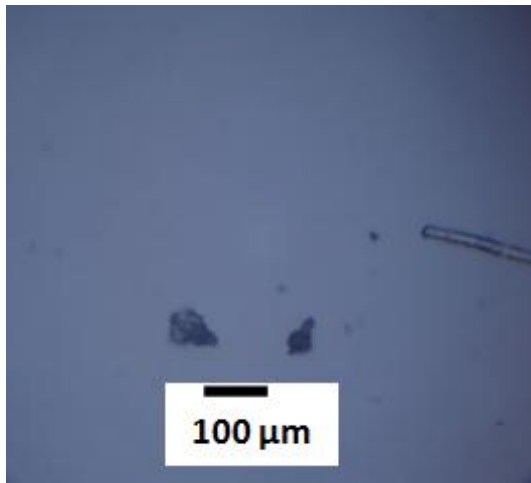
**Φωτογραφία 5.13:** 40 κύκλοι στους 350°C παραμονή στον αέρα



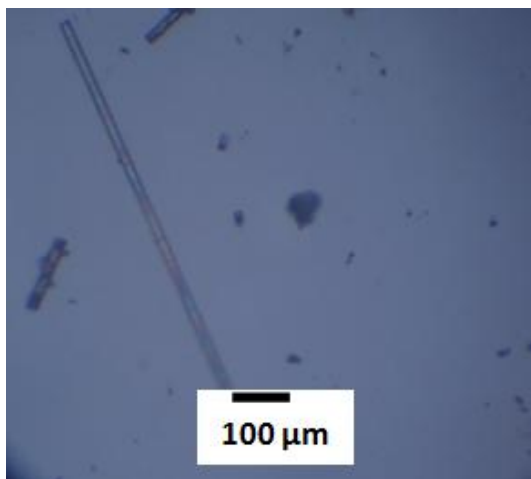
**Φωτογραφία 5.14:** 10 κύκλοι στους 450°C παραμονή στον αέρα



**Φωτογραφία 5.15:** 20 κύκλοι στους 450°C παραμονή στον αέρα



**Φωτογραφία 5.16:** 30 κύκλοι στους 450°C παραμονή στον αέρα



**Φωτογραφία 5.17:** 40 κύκλοι στους 450°C παραμονή στον αέρα

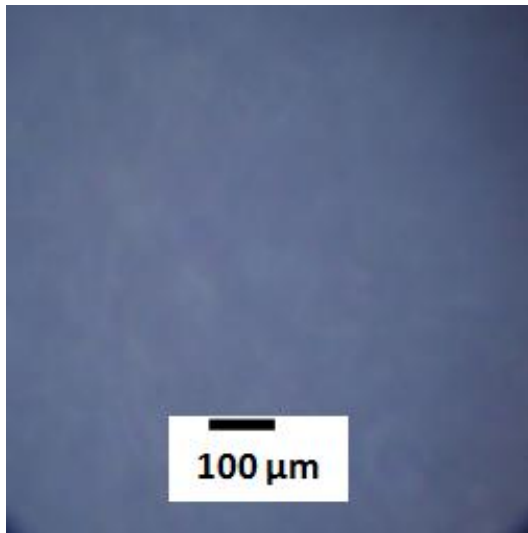
Στους 350°C και 450°C καθώς αυξάνουν οι κύκλοι, γίνεται όλο και πιο έντονη η διαφορετική μορφολογία των επιφανειών των δοκιμίων. Έντονα στίγματα εμφανίζονται που γίνονται πυκνότερα και το σχήμα τους επιμηκύνεται ακόμα περισσότερο απ' ότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Πιθανότατα τα στίγματα οφείλονται σε σχηματισμό οξειδίων κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Εμβάπτιση δοκιμίων στο νερό μετά την ολοκλήρωση του πειράματος:

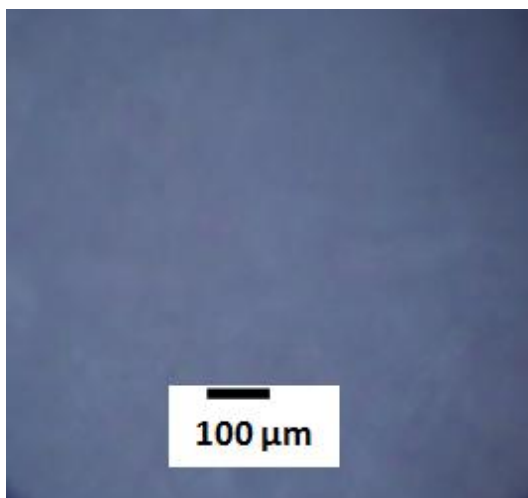
Πείραμα στους 150°C, 250°C, 350°C, 450°C

Σε 10, 20, 30, και 40 κύκλους

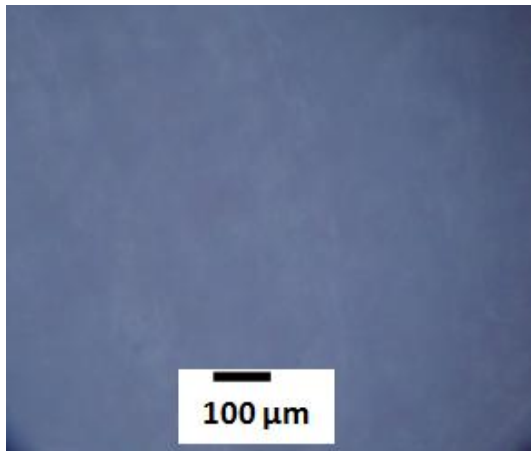
Οπτικό μικροσκόπιο



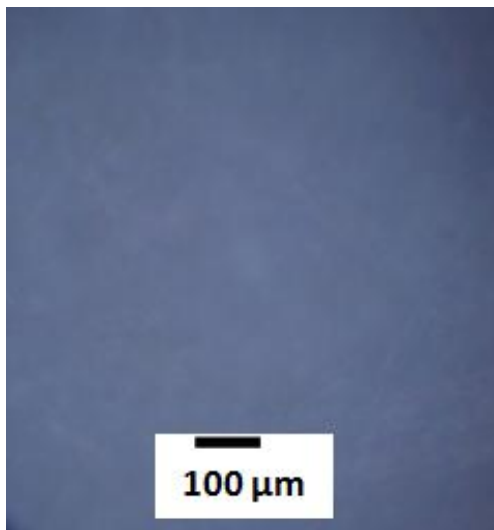
**Φωτογραφία 5.18:** 10 κύκλοι στους 150°C με εισδοχή στο νερό



**Φωτογραφία 5.19:** 20 κύκλοι στους 150°C με εισδοχή στο νερό

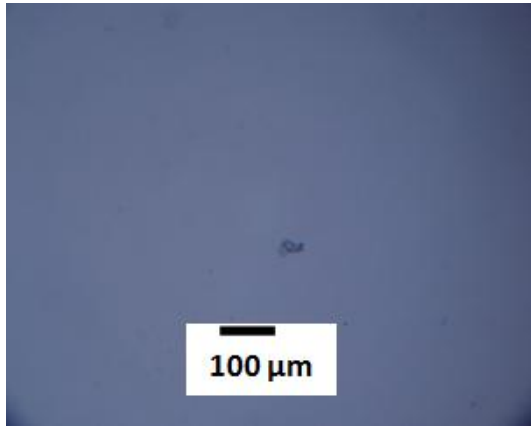


**Φωτογραφία 5.20:** 30 κύκλοι στους 150°C με εισδοχή στο νερό

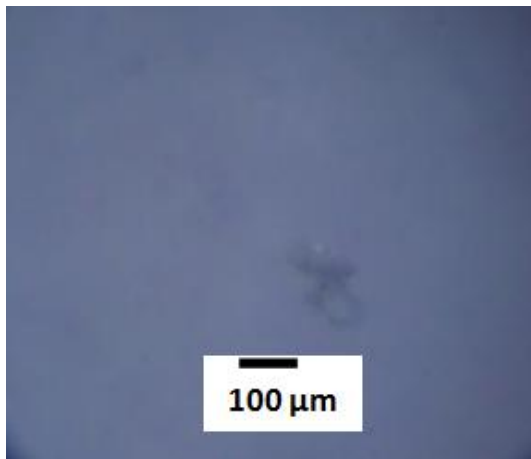


**Φωτογραφία 5.21:** 40 κύκλοι στους 150°C με εισδοχή στο νερό

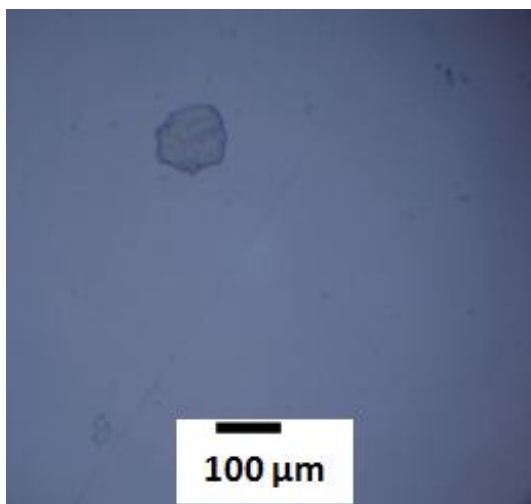
Στους 150°C, σε όλους τους κύκλους, αρχίζει να φαίνεται μία διαφορετική μορφολογία στην επιφάνεια των δοκιμίων, χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.



**Φωτογραφία 5.22:** 10 κύκλοι στους 250°C με εισδοχή στο νερό

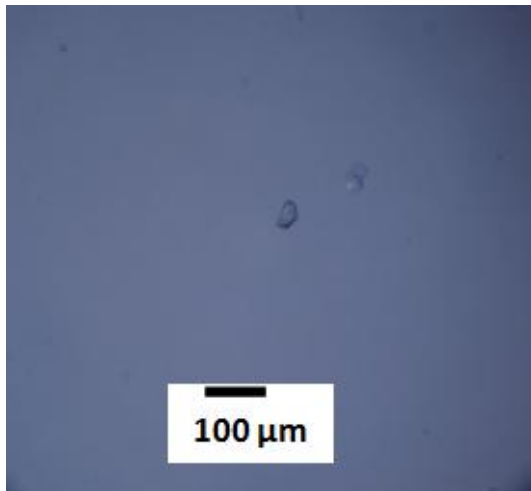


**Φωτογραφία 5.23:** 20 κύκλοι στους 250°C με εισδοχή στο νερό



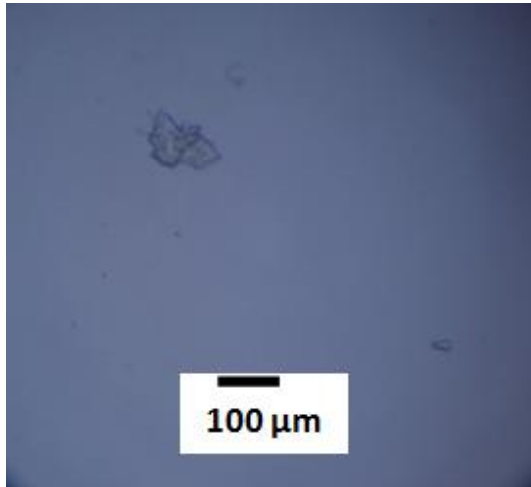
**Φωτογραφία 5.24:** 30 κύκλοι στους 250°C με εισδοχή στο νερό



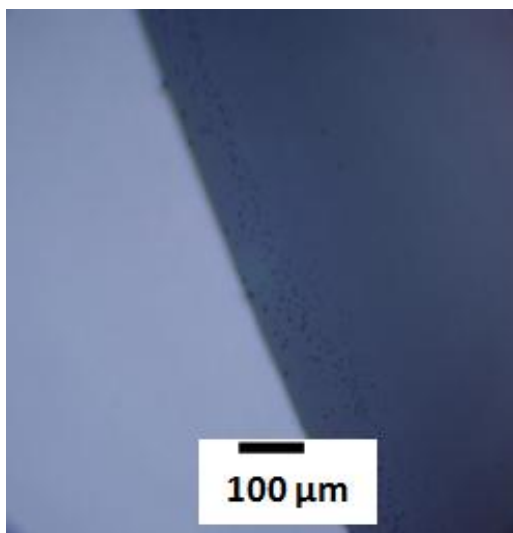


**Φωτογραφία 5.25:** 40 κύκλοι στους 250°C με εισδοχή στο νερό

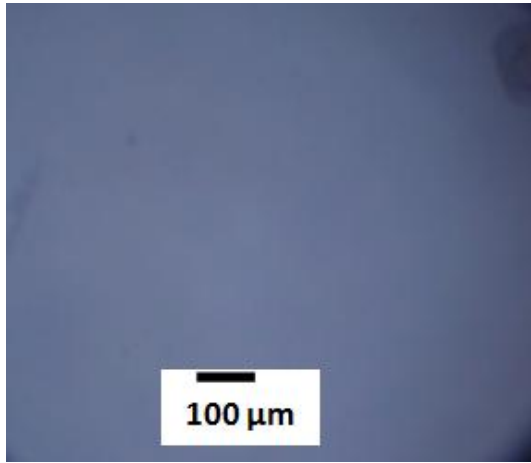
Στους 250°C, καθώς αυξάνουν οι κύκλοι, γίνεται όλο και πιο έντονη η διαφορετική μορφολογία των επιφανειών των δοκιμίων. Έντονα στίγματα εμφανίζονται που γίνονται πυκνότερα και το σχήμα τους έχει κυκλική μορφή η οποία απλώνεται με την αύξηση των κύκλων. Τα στίγματα αυτά πιθανότατα είναι οξειδία που σχηματίζονται.



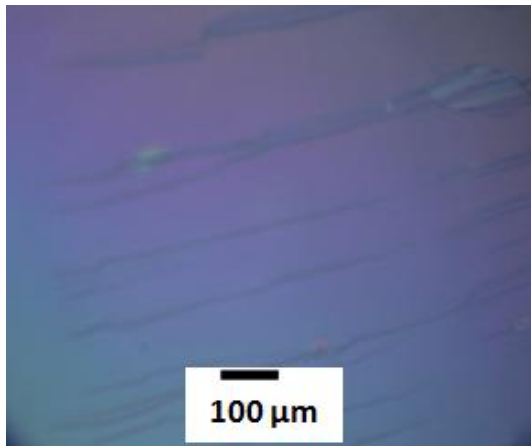
**Φωτογραφία 5.26:** 10 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό



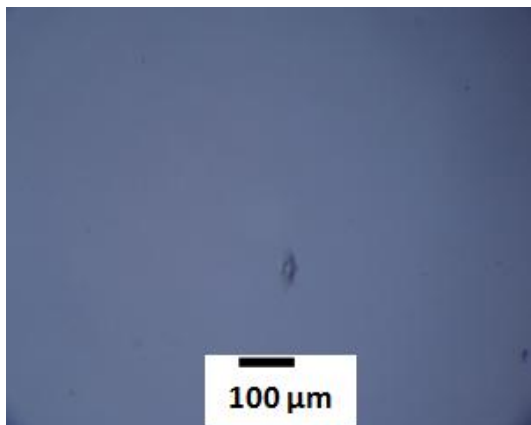
**Φωτογραφία 5.27:** 10 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό



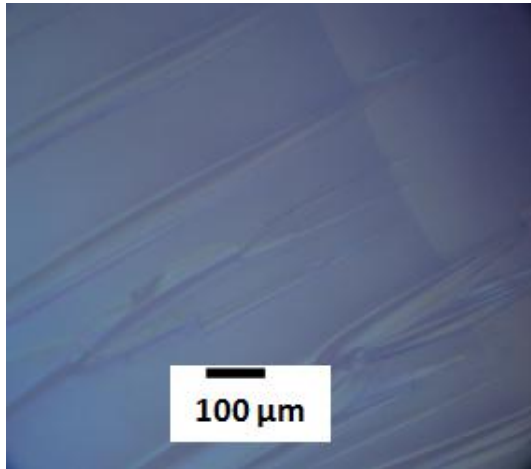
**Φωτογραφία 5.28:** 20 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό



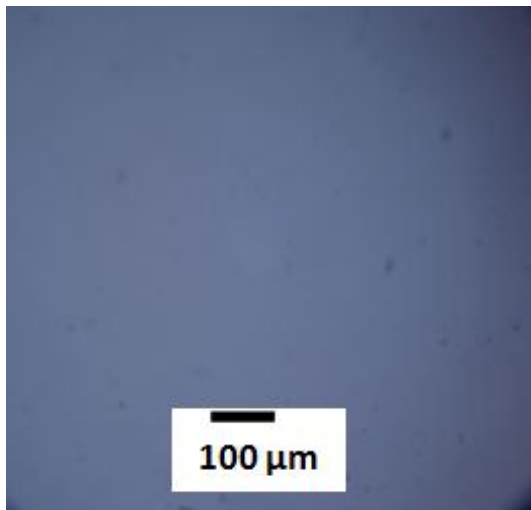
**Φωτογραφία 5.29:** 20 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό



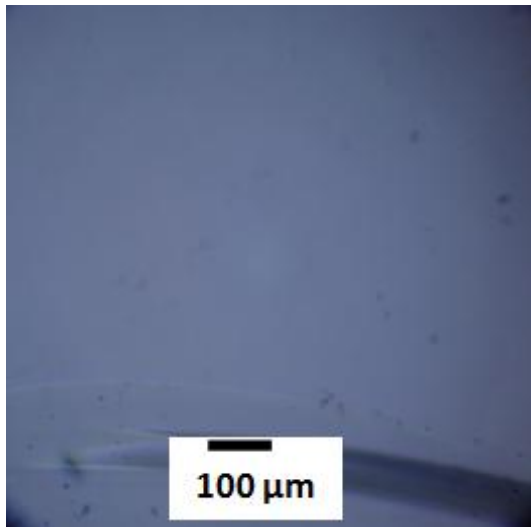
**Φωτογραφία 5.30:** 30 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό



**Φωτογραφία 5.31:** 30 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό

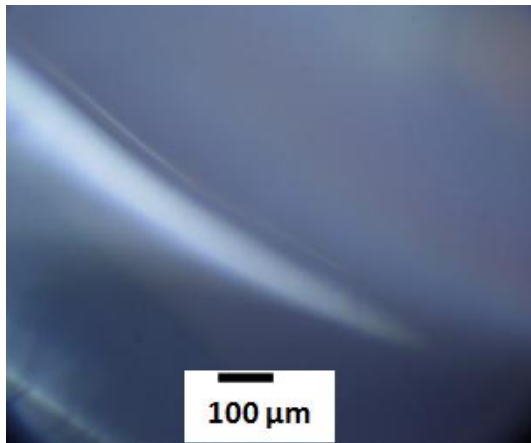


**Φωτογραφία 5.32:** 40 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό

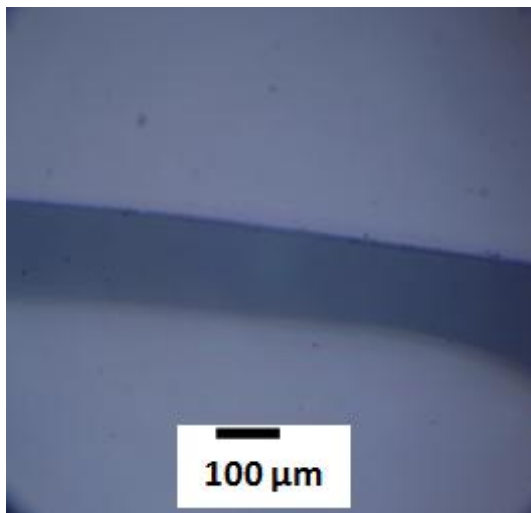


**Φωτογραφία 5.33:** 40 κύκλοι στους 350°C με εισδοχή στο νερό

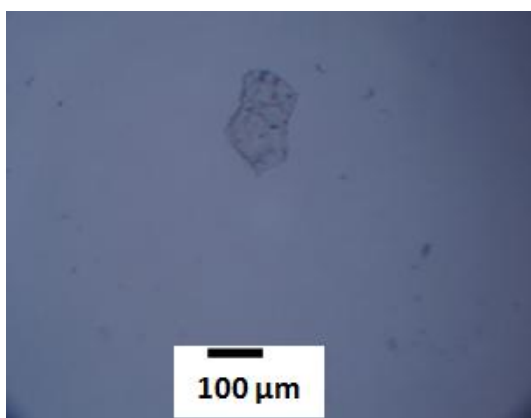
Στους 350°C σε όλους τους κύκλους τα δοκίμια παρουσίασαν ρωγμές με την εμβάπτισή τους στο νερό. Κάθε δοκίμιο παρατηρήθηκε σε σημείο που υπήρχε ρωγμή και σε σημείο εκτός ρωγμής. Όπως παρατηρούμε στα σημεία της ρωγμής υπάρχει διαφορετική φωτεινότητα γιατί έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά επίπεδα. Στα σημεία εκτός ρωγμής διακρίνονται τα απλωμένα στίγματα, πιθανότατα είναι τα οξειδία που δημιουργήθηκαν. Παρατηρούμε ότι σε περισσότερους κύκλους οι ρωγμές είναι εντονότερες.



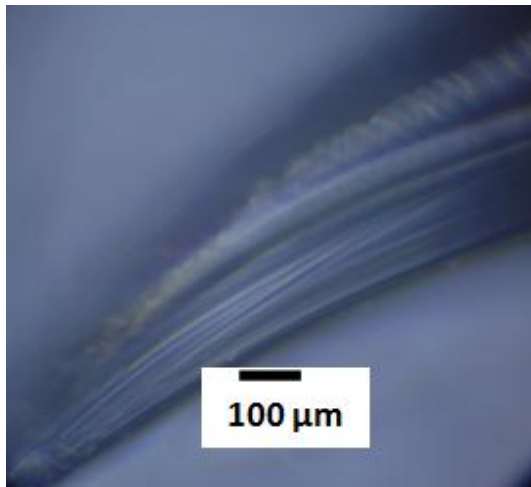
**Φωτογραφία 5.34:** 10 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



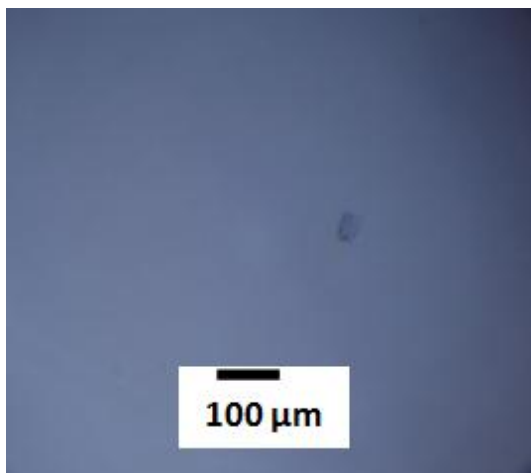
**Φωτογραφία 5.35:** 10 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



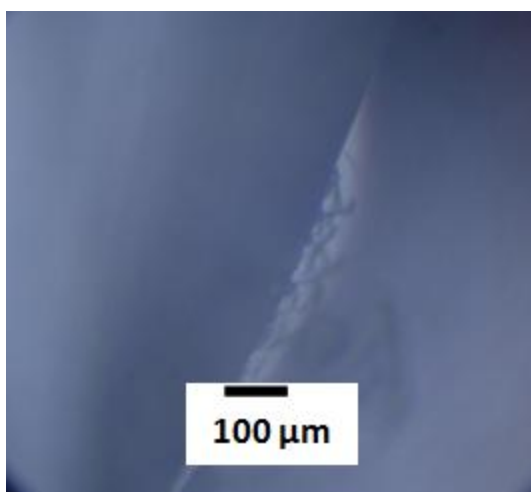
**Φωτογραφία 5.36:** 20 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



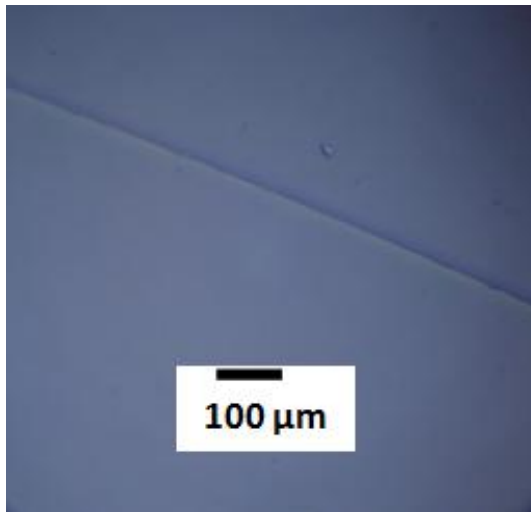
**Φωτογραφία 5.37:** 20 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



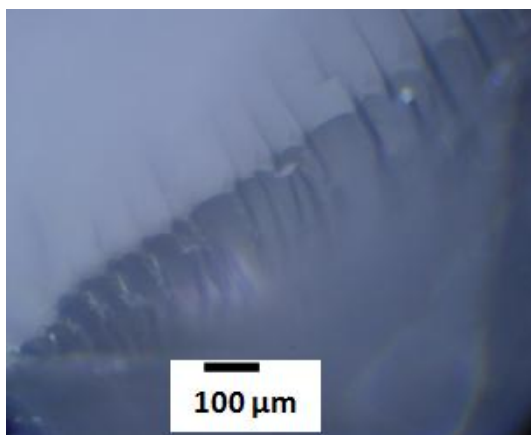
**Φωτογραφία 5.38:** 30 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



**Φωτογραφία 5.39:** 30 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



**Φωτογραφία 5.40:** 40 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό



**Φωτογραφία 5.41:** 40 κύκλοι στους 450°C με εισδοχή στο νερό

Στους 450°C σε όλους τους κύκλους τα δοκίμια παρουσίασαν ρωγμές με την εμβάπτισή τους στο νερό. Κάθε δοκίμιο πατατηρήθηκε σε σημείο που υπήρχε ρωγμή και σε σημείο εκτός ρωγμής. Όπως παρατηρούμε στα σημεία της ρωγμής υπάρχει διαφορετική φωτεινότητα γιατί έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά επίπεδα. Στα σημεία εκτός ρωγμής διακρίνονται τα απλωμένα στίγματα, πιθανότατα είναι τα οξειδία που δημιουργήθηκαν. Παρατηρούμε ότι σε περισσότερους κύκλους οι ρωγμές είναι εντονότερες. Τα αποτελέσματα δηλαδή είναι ίδια με τα δοκίμια των 350°C αλλά παρουσιάζονται σε πολύ πιο έντονη μορφή. Ιδιαίτερη εντύπωση έκανε η μορφή που παρουσίασε το δοκίμιο στους 450°C στους 40 κύκλους. Είναι η υψηλότερη θερμοκρασία που υποβλήθηκε το δοκίμιο και ο περισσότερος χρόνος παραμονής του μέσα στον κλίβανο. Στην περιοχή της ρωγμής υπάρχει μία κυματοειδής μορφή



στην επιφάνεια του δοκιμίου, προφανώς επειδή το φαινόμενο του θερμοκρασιακού αιφνιδιασμού είναι το εντονότερο απ' όσα πραγματοποιήθηκαν.

**Αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό:** είναι μια δυνατότητα του υλικού να αντέχει σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Η θερμική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$R_s = (\lambda * \sigma_F) / (\alpha * E)$$

Όπου:

**R<sub>s</sub>** : αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό

**λ** : θερμική αγωγιμότητα= 1 W/mK

**σ<sub>F</sub>** : αντοχή στην κάμψη = 29,8 GPa

**α** : συντελεστής θερμικής διαστολής = 9,5 ppm/K

**E** : μέτρο ελαστικότητας =74 GPa

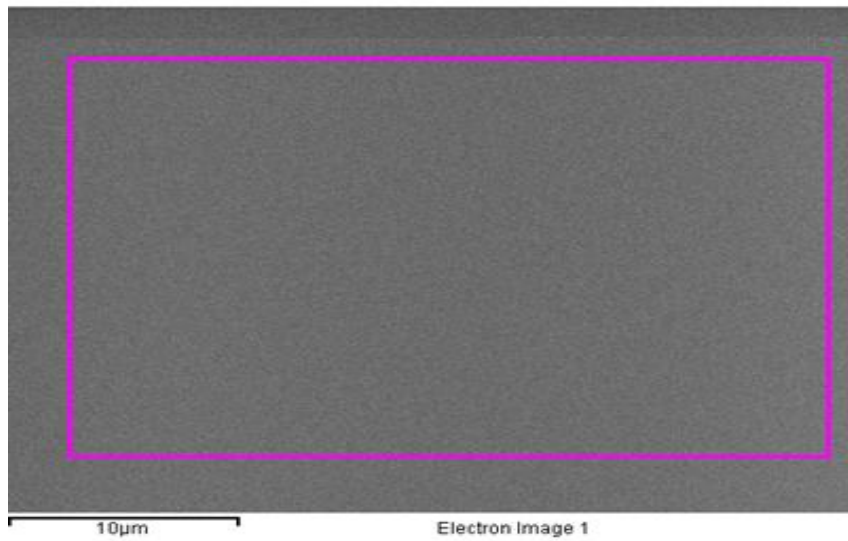
**λ<sub>γυαλιού</sub>**= 1 W/mK > **λ<sub>νερού</sub>**= 0,57 W/mK

Οπότε δυσχεραίνεται η μετάδοση της θερμότητας και δημιουργούνται εσωτερικές τάσεις που οδηγούν στο σχηματισμό ρωγμών.

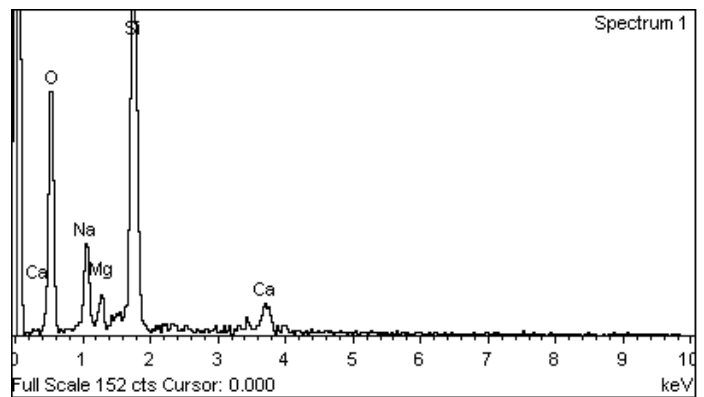
Οι φωτογραφίες του οπτικού μικροσκοπίου έχουν μεγέθυνση x50

### **Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM**

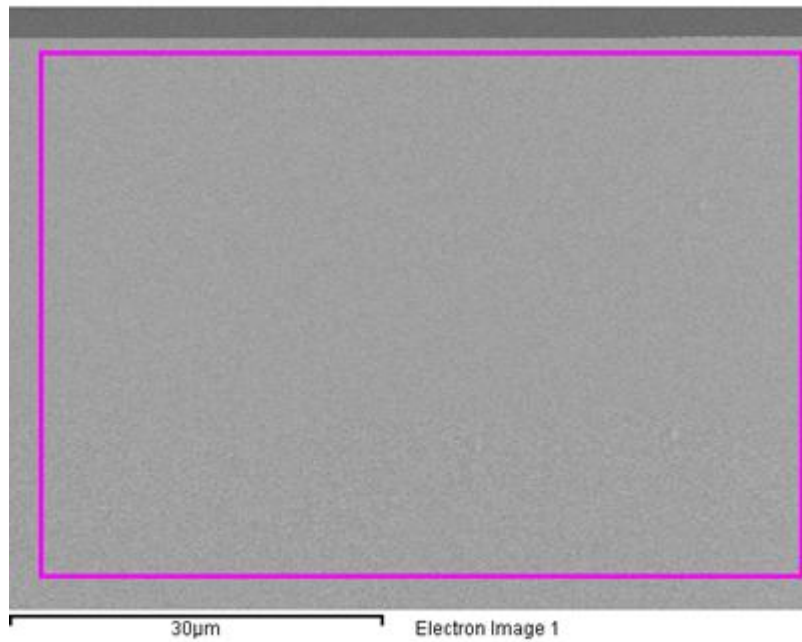
Όλα τα δοκίμια που παράμειναν στον αέρα, απ' όλες τις θερμοκρασίες και όλους τους κύκλους, καθώς και το μη κατεργασμένο παρατηρούνται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM.



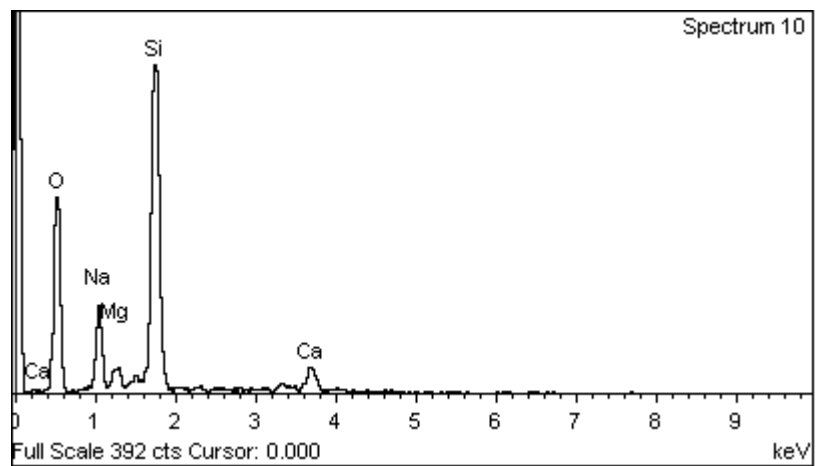
Element	Weight%	Atomic%
O K	51.03	64.22
Na K	8.70	7.62
Mg K	2.64	2.18
Si K	33.00	23.65
Ca K	4.64	2.33
Totals	100.00	



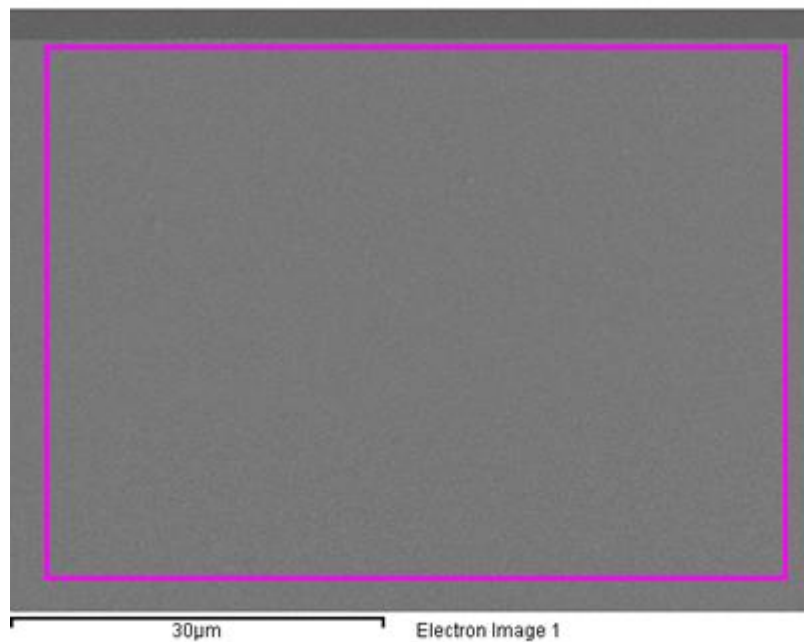
**Σχήμα 5.1:** EDS ανάλυση δείγματος για 10 κύκλους στους 150°C



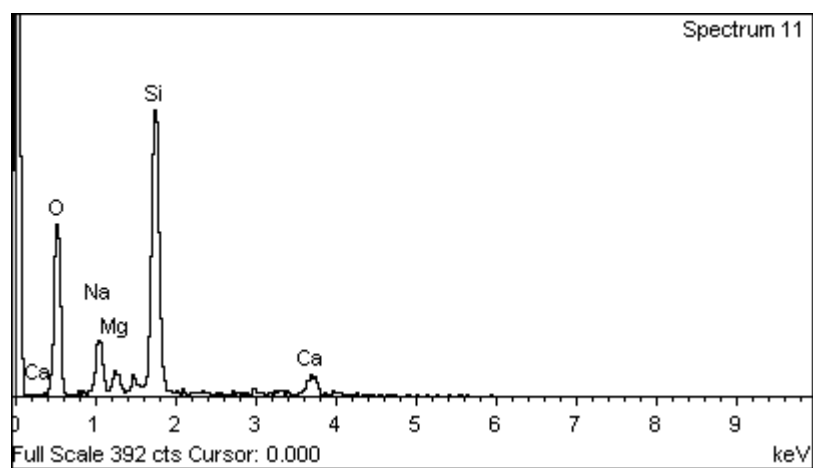
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.04	63.34
Na K	8.75	7.71
Mg K	2.25	1.87
Si K	34.28	24.72
Ca K	4.69	2.37
Totals	100.00	



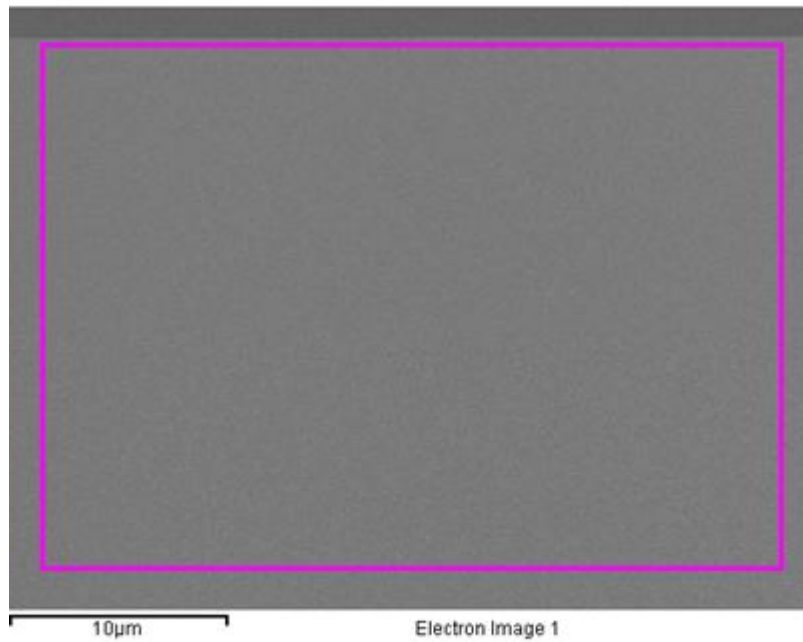
**Σχήμα 5.2:** EDS ανάλυση δείγματος για 20 κύκλους στους 150°C



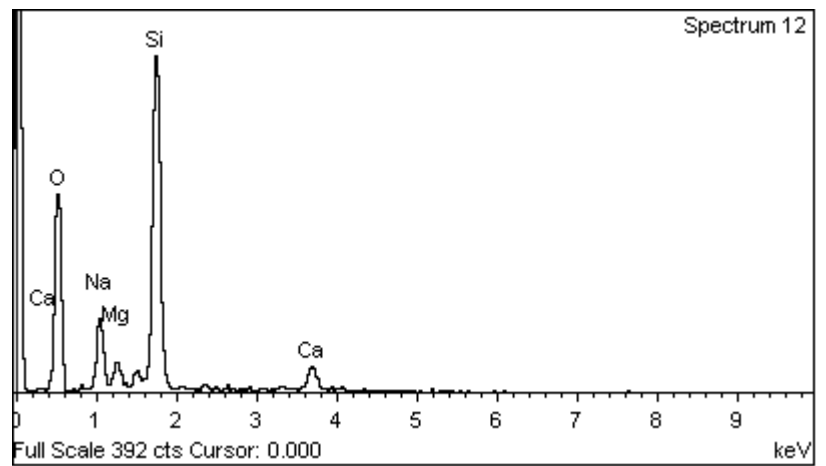
Element	Weight%	Atomic%
O K	51.00	64.25
Na K	7.65	6.70
Mg K	2.50	2.07
Si K	34.61	24.84
Ca K	4.24	2.13
Totals	100.00	



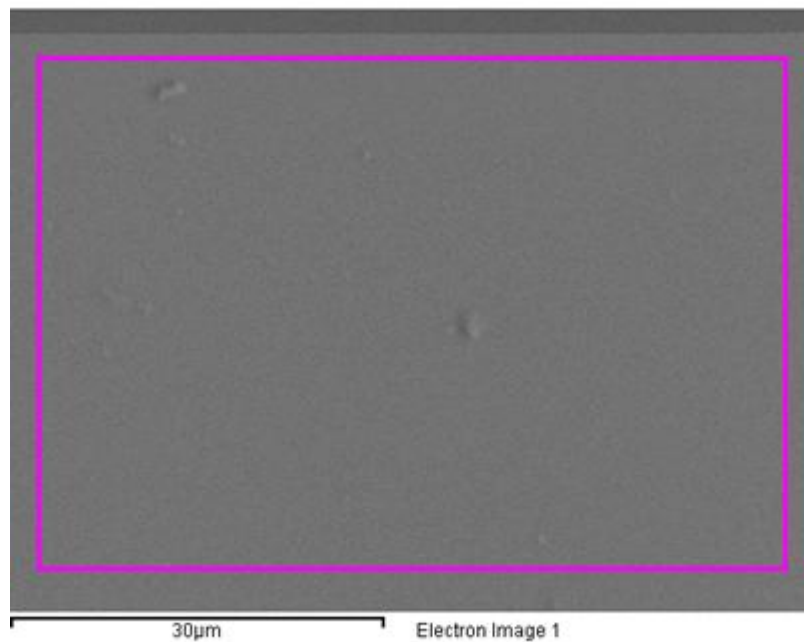
**Σχήμα 5.3:** EDS ανάλυση δείγματος για 30 κύκλους στους 150°C



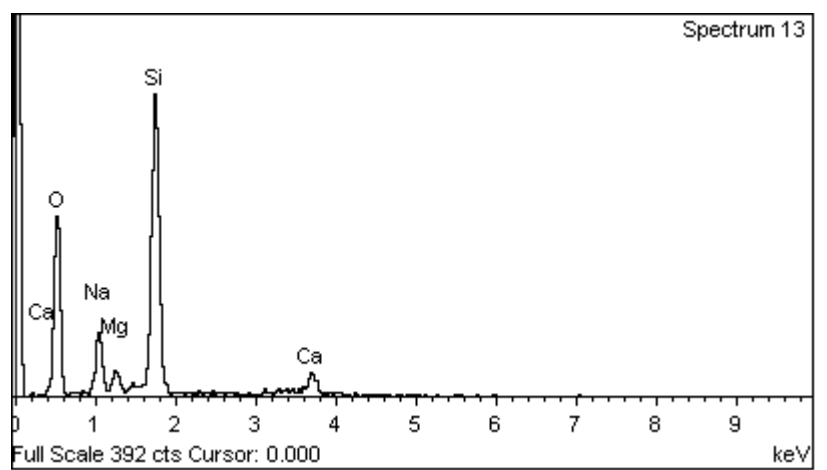
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.68	63.94
Na K	8.10	7.12
Mg K	2.72	2.25
Si K	33.98	24.42
Ca K	4.52	2.27
Totals	100.00	



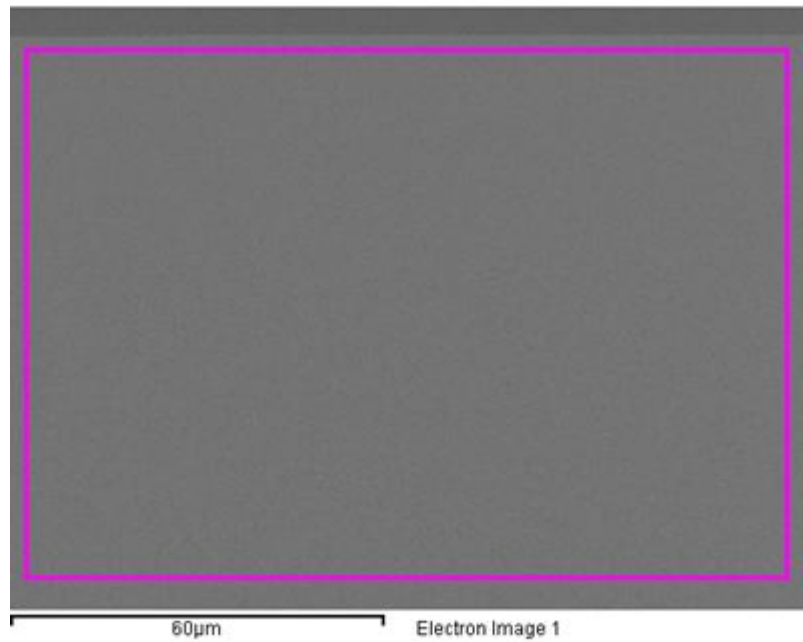
**Σχήμα 5.4:** EDS ανάλυση δείγματος για 40 κύκλους στους 150°C



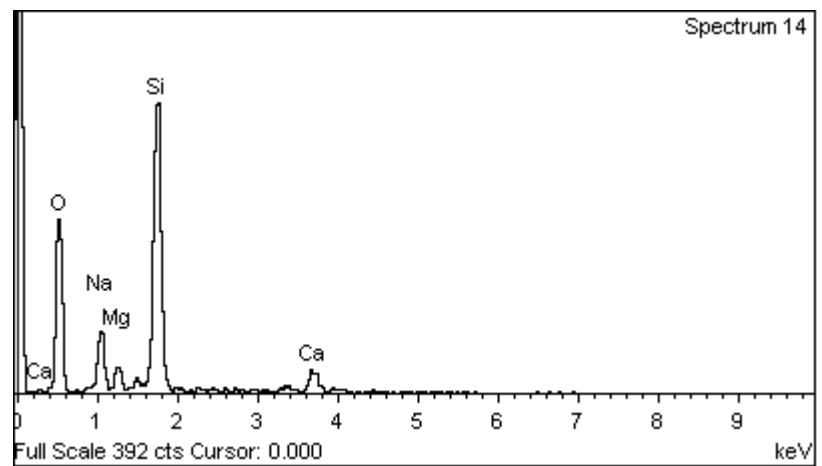
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.94	64.21
Na K	7.78	6.82
Mg K	3.01	2.50
Si K	33.56	24.10
Ca K	4.72	2.38
Totals	100.00	



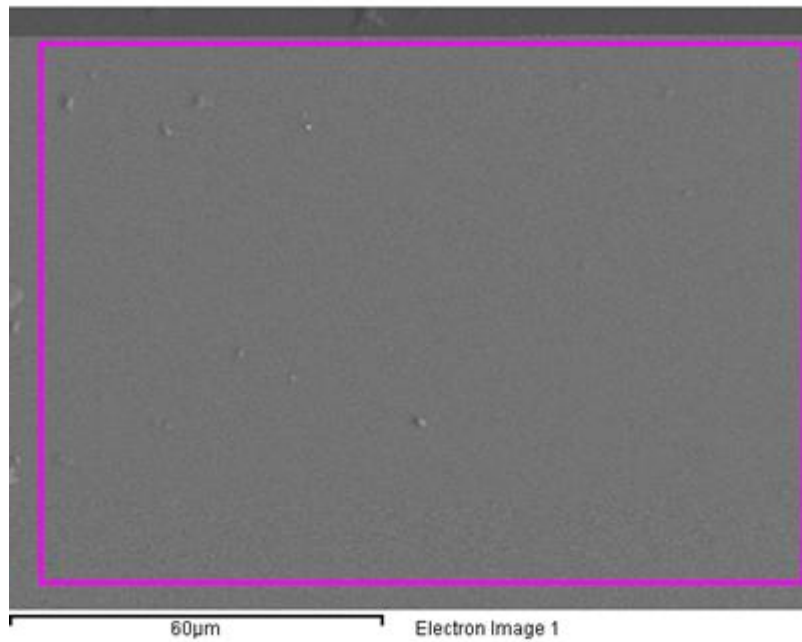
**Σχήμα 5.5:** EDS ανάλυση δείγματος για 10 κύκλους στους 250°C



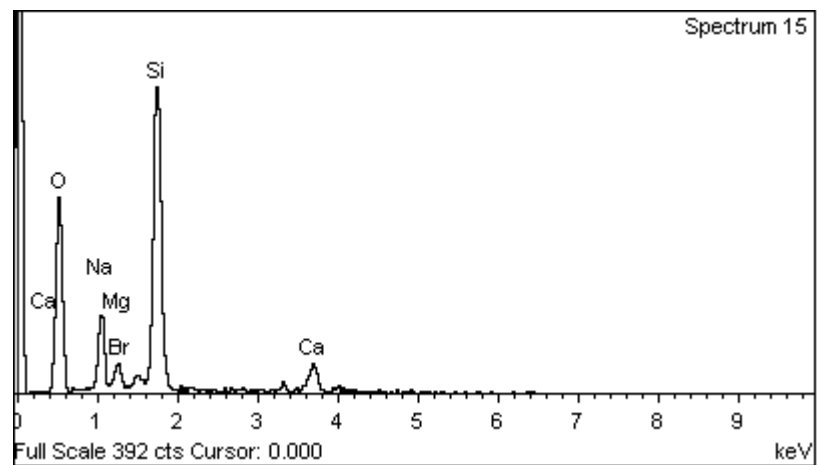
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.70	64.00
Na K	8.10	7.11
Mg K	2.58	2.15
Si K	33.81	24.31
Ca K	4.81	2.43
Totals	100.00	



**Σχήμα 5.6:** EDS ανάλυση δείγματος για 20 κύκλους στους 250°C

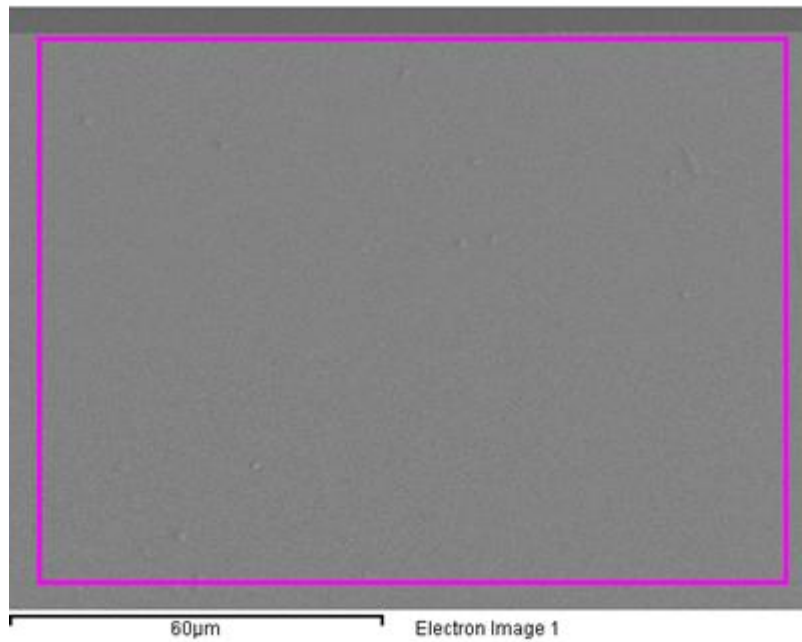


Element	Weight%	Atomic%
O K	49.77	63.64
Na K	8.69	7.73
Mg K	2.15	1.81
Si K	32.95	24.00
Ca K	4.60	2.35
Br L	1.85	0.47
Totals	100.00	

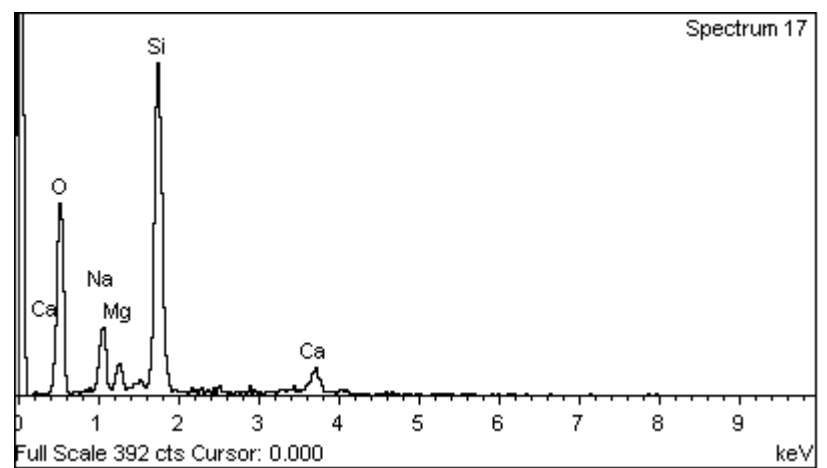


Σχήμα 5.7: EDS ανάλυση δείγματος για 30 κύκλους στους 250°C

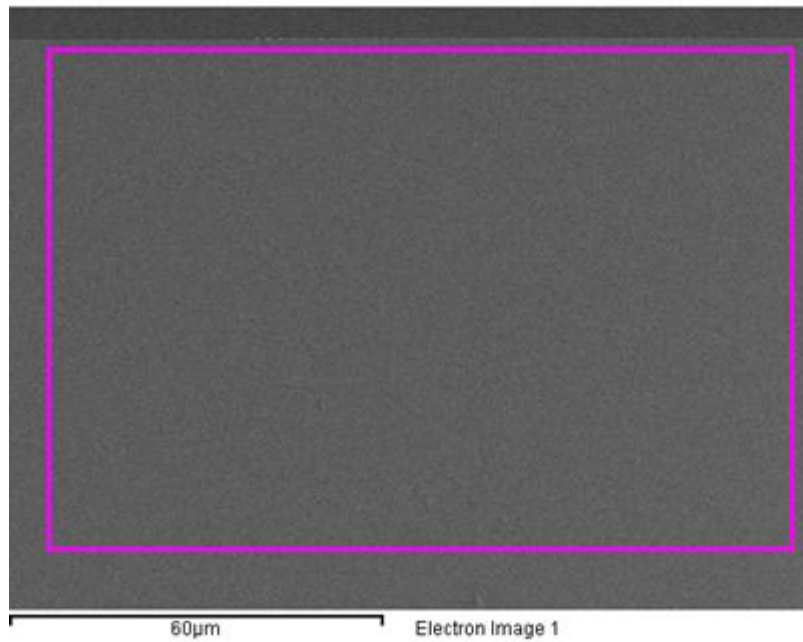




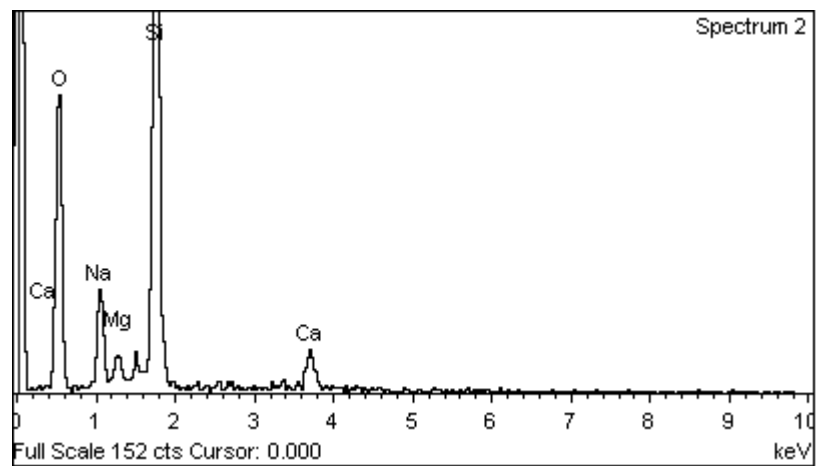
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.86	64.11
Na K	7.92	6.95
Mg K	2.75	2.28
Si K	34.03	24.43
Ca K	4.44	2.23
Totals	100.00	



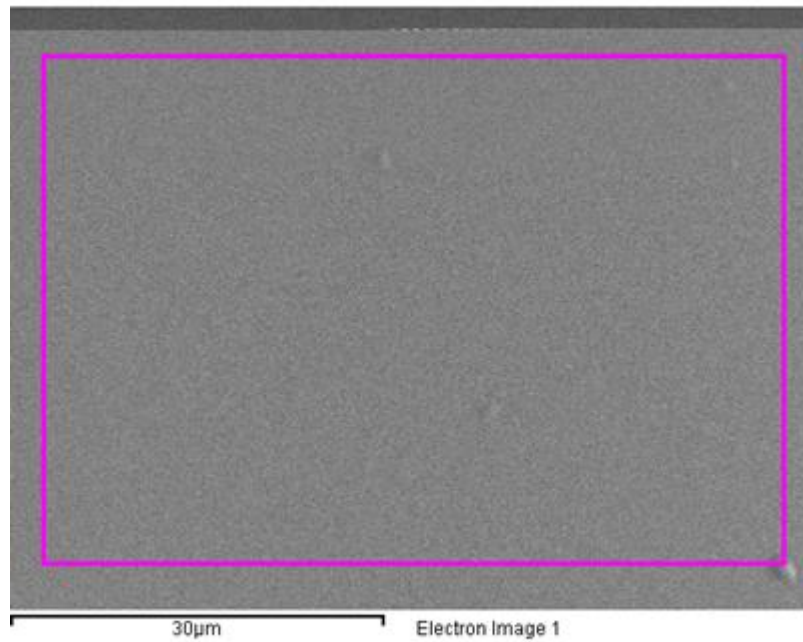
**Σχήμα 5.8:** EDS ανάλυση δείγματος για 40 κύκλους στους 250°C



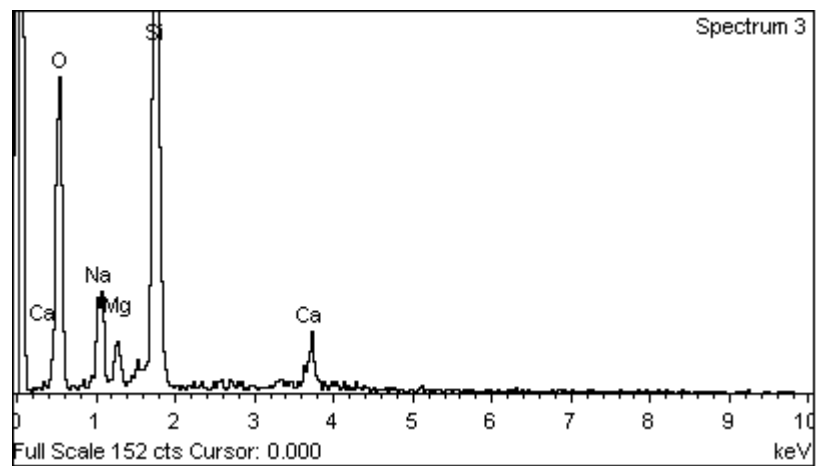
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.47	63.78
Na K	8.48	7.46
Mg K	2.07	1.73
Si K	34.24	24.65
Ca K	4.74	2.39
Totals	100.00	



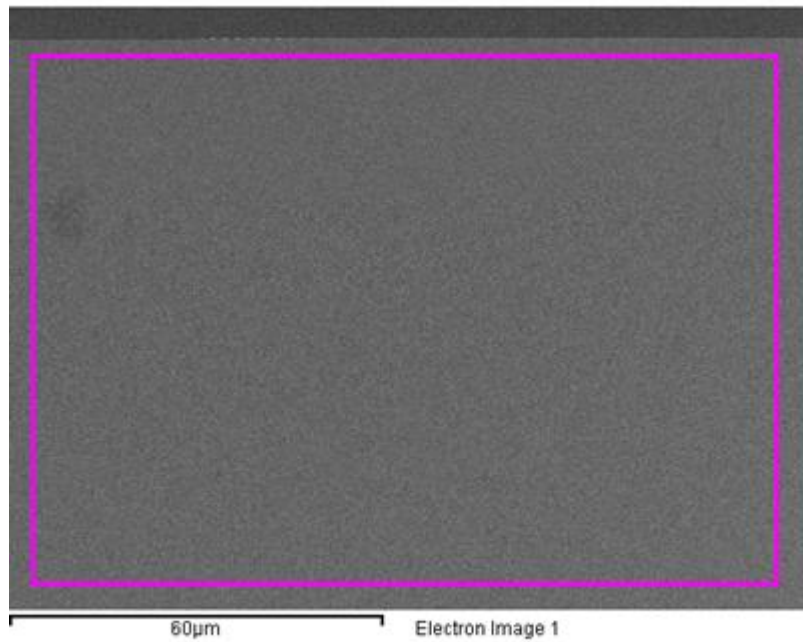
**Σχήμα 5.9:** EDS ανάλυση δείγματος για 10 κύκλους στους 350°C



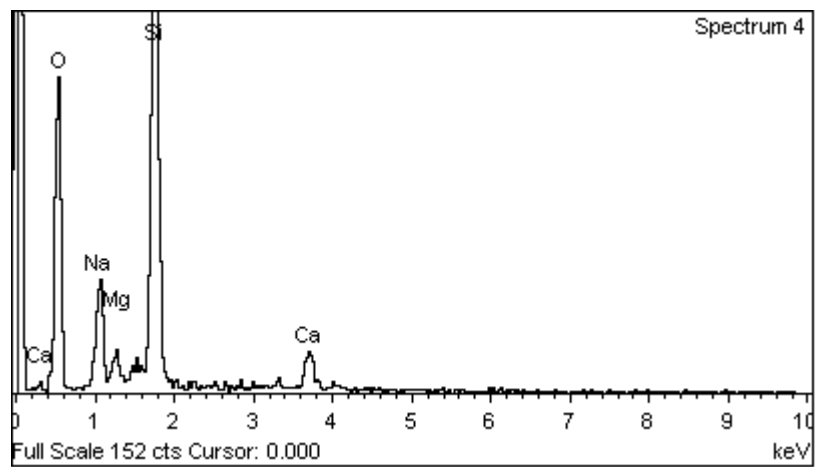
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.20	63.66
Na K	7.21	6.36
Mg K	2.82	2.35
Si K	34.64	25.03
Ca K	5.13	2.60
Totals	100.00	



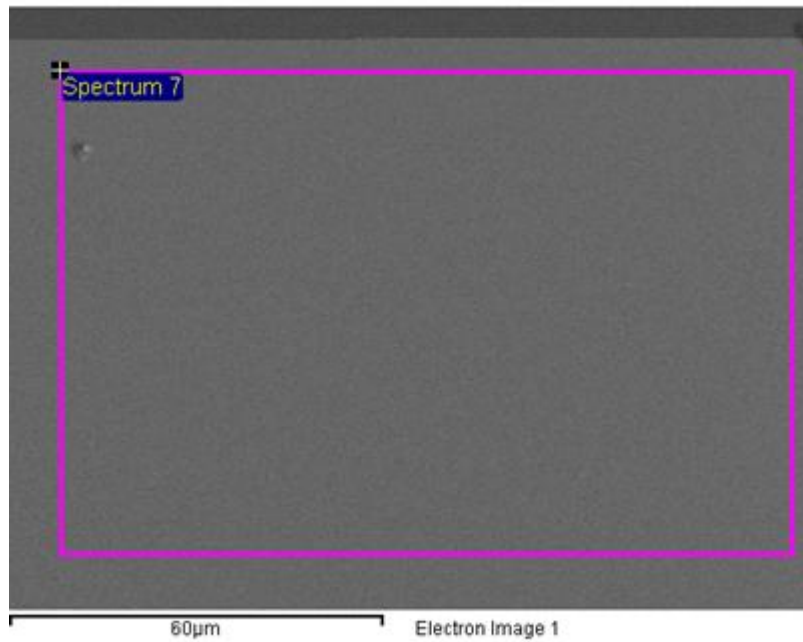
**Σχήμα 5.10:** EDS ανάλυση δείγματος για 20 κύκλους στους 350°C



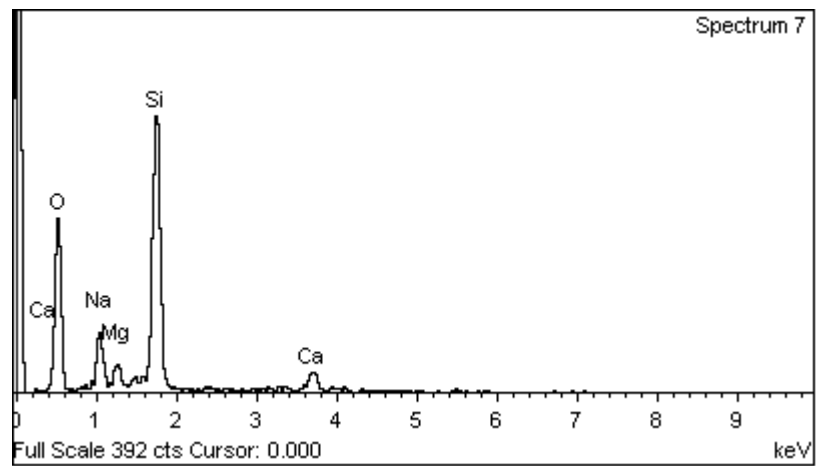
Element	Weight%	Atomic%
O K	51.10	64.40
Na K	7.78	6.82
Mg K	2.22	1.84
Si K	34.30	24.63
Ca K	4.60	2.32
Totals	100.00	



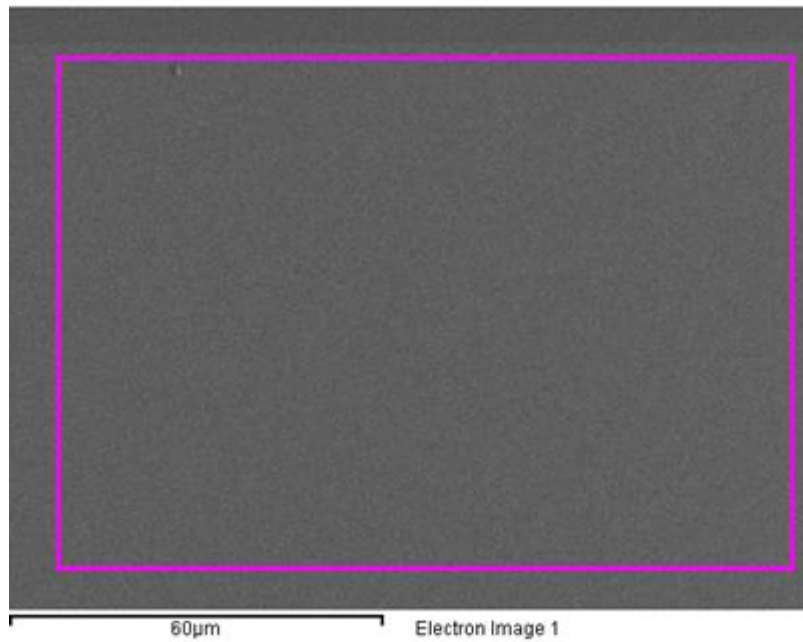
**Σχήμα 5.11:** EDS ανάλυση δείγματος για 40 κύκλους στους 350°C



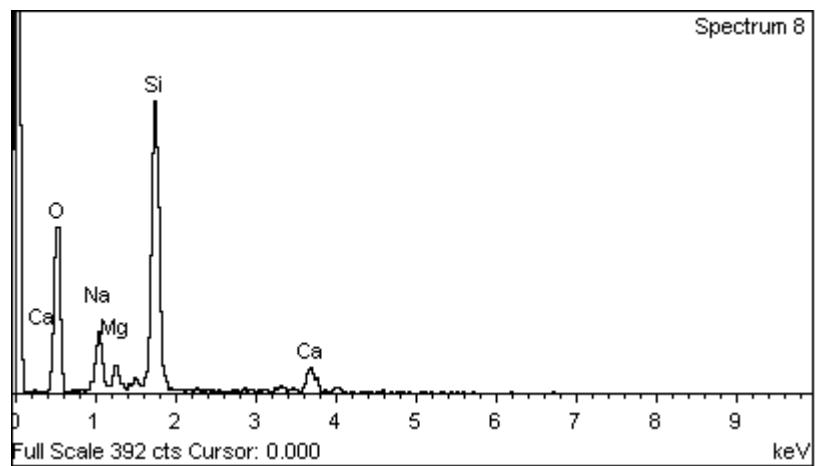
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.86	64.18
Na K	7.37	6.47
Mg K	2.94	2.44
Si K	34.21	24.59
Ca K	4.61	2.32
Totals	100.00	



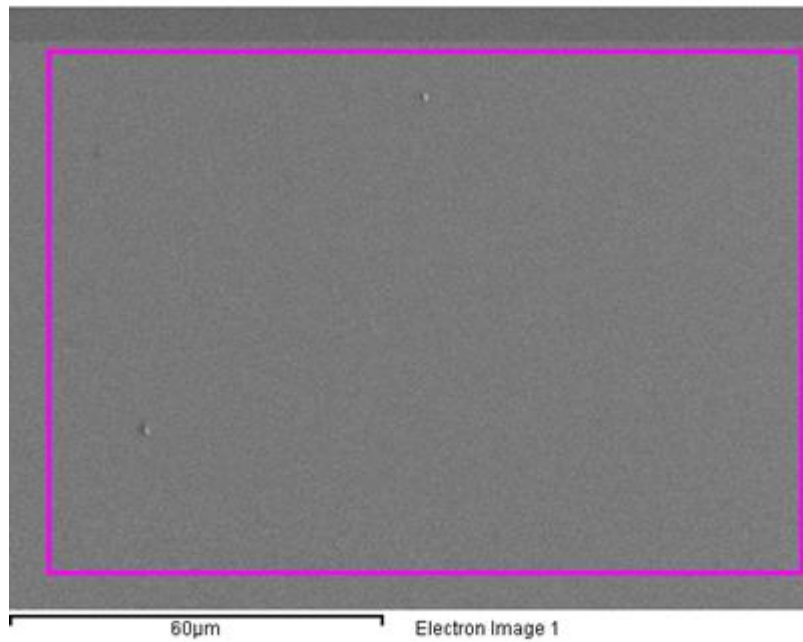
**Σχήμα 5.12:** EDS ανάλυση δείγματος για 10 κύκλους στους 450°C



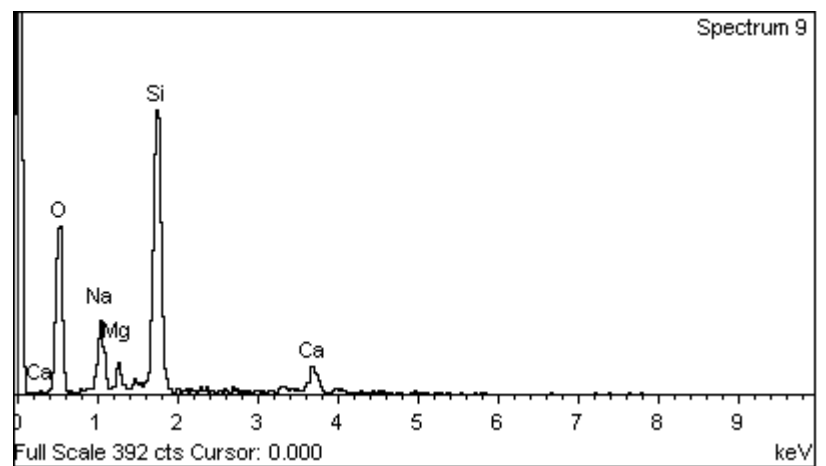
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.28	63.63
Na K	8.12	7.15
Mg K	2.65	2.21
Si K	34.04	24.54
Ca K	4.91	2.48
Totals	100.00	



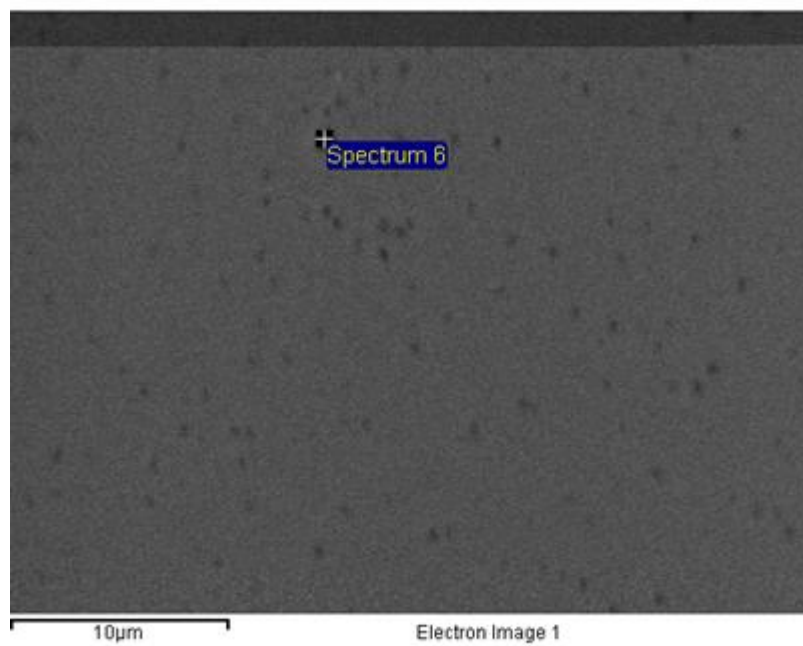
**Σχήμα 5.13:** EDS ανάλυση δείγματος για 30 κύκλους στους 450°C



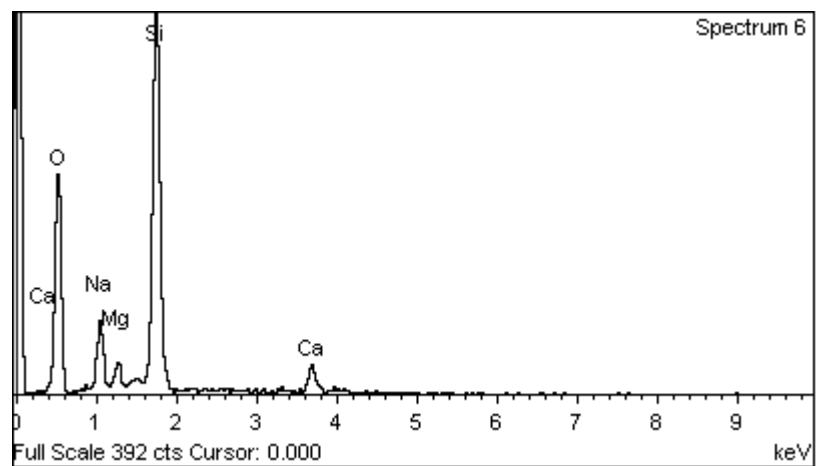
Element	Weight%	Atomic%
O K	50.78	64.12
Na K	8.10	7.12
Mg K	2.78	2.31
Si K	33.12	23.82
Ca K	5.22	2.63
Totals	100.00	



**Σχήμα 5.14:** EDS ανάλυση δείγματος για 40 κύκλους στους 450°C



Element	Weight%	Atomic%
O K	50.72	64.04
Na K	7.55	6.64
Mg K	2.28	1.89
Si K	35.09	25.24
Ca K	4.35	2.19
Totals	100.00	



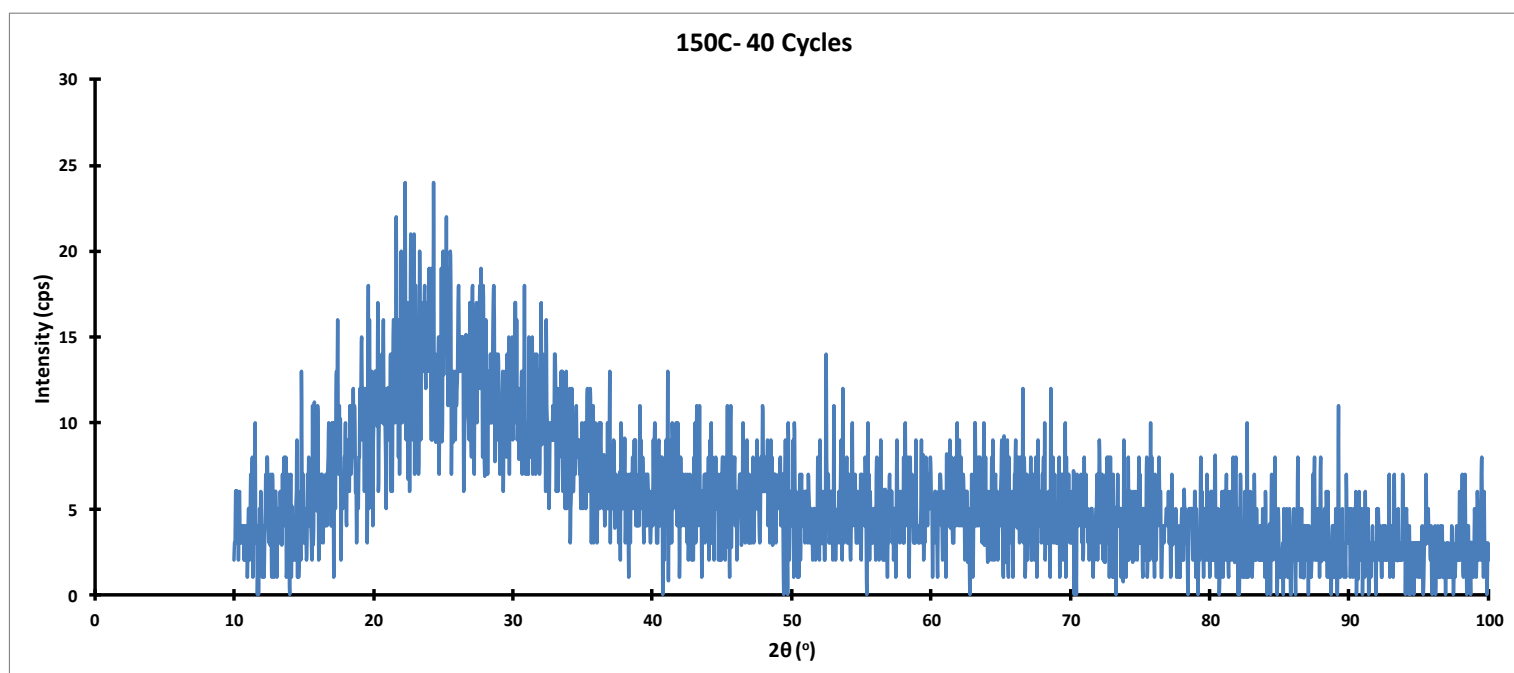
**Σχήμα 5.15:** EDS ανάλυση για μη κατεργασμένο δοκίμιο



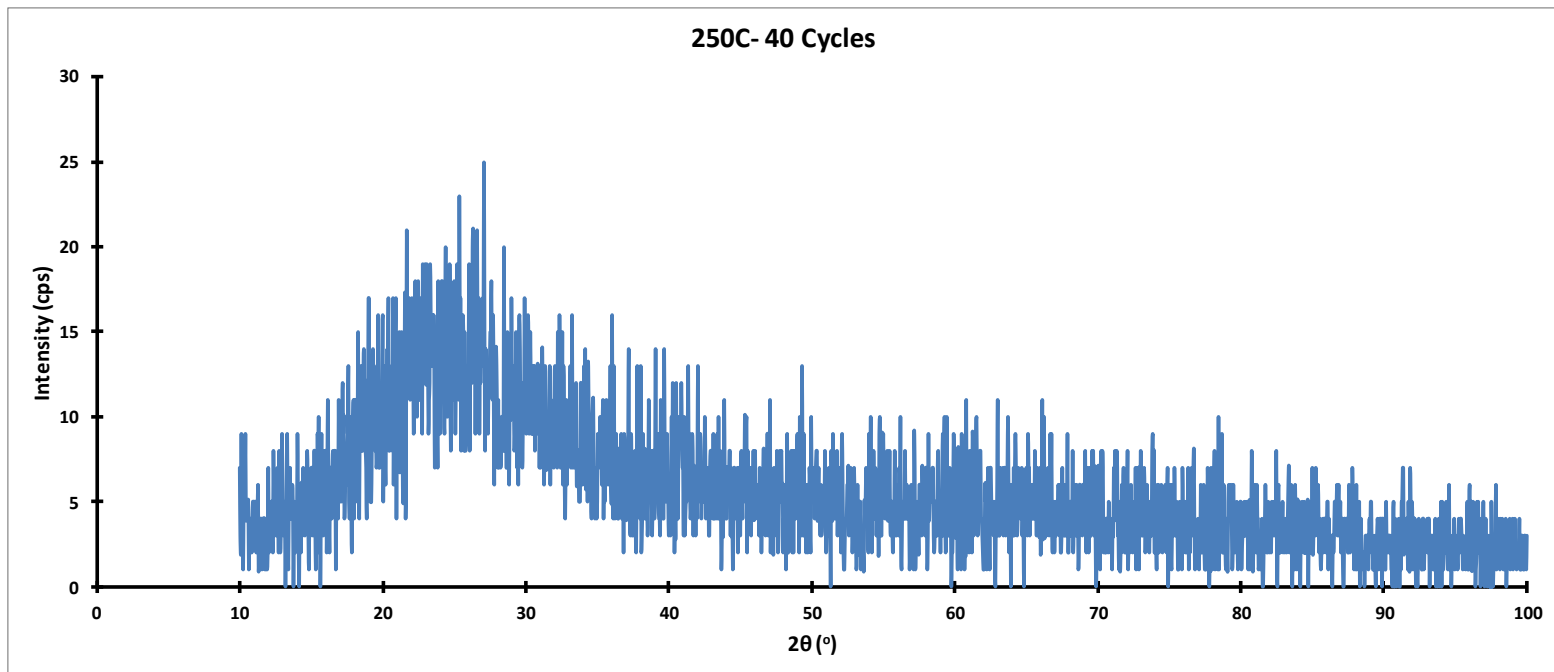
Όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης SEM έχουν την ίδια στοιχειακή ανάλυση. Όσον αφορά την επιφάνειά τους δε φαίνεται κάτι διαφορετικό, εκτός από το μη κατεργασμένο δοκίμιο όπου φαίνονται έντονα στήγματα τα οποία πιθανόν οφείλονται σε σχηματισμό οξειδίων.

## Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνωνΧ- XRD

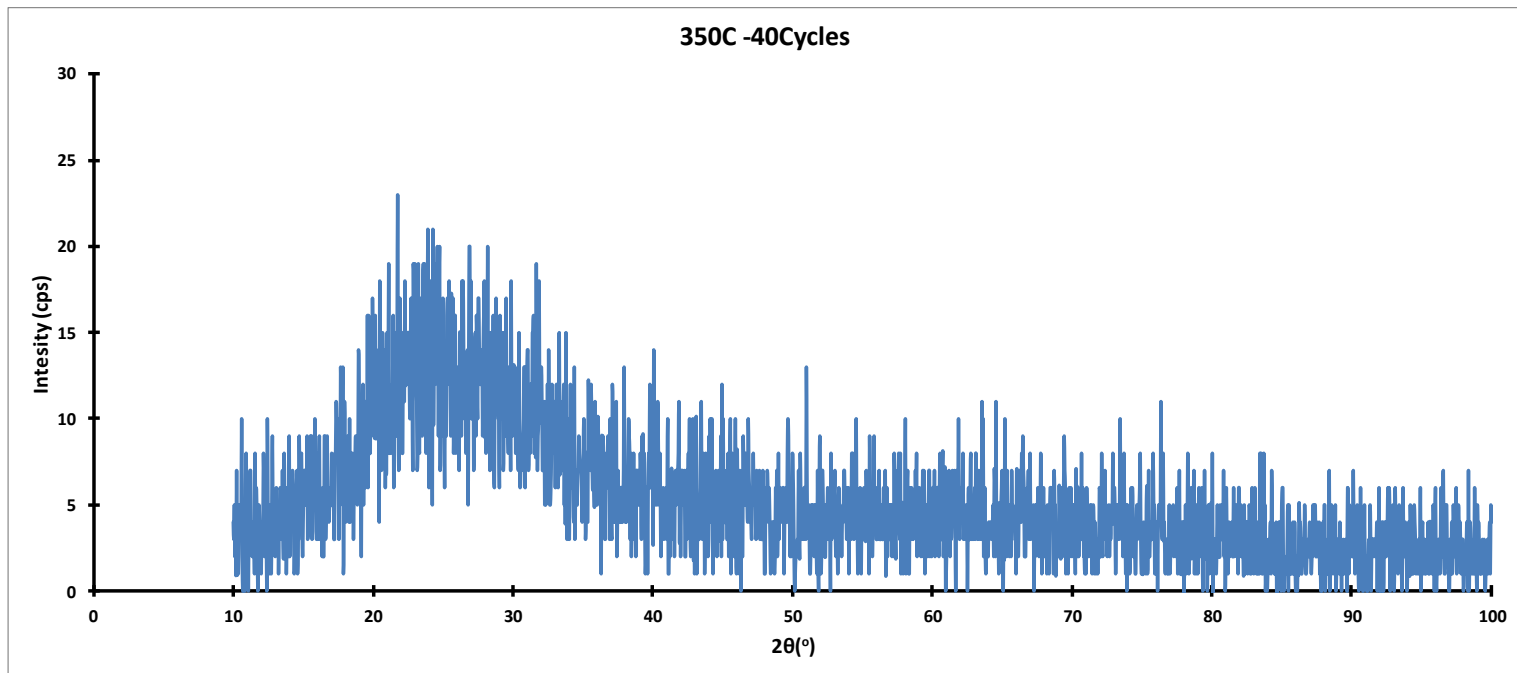
Όλα τα δοκίμια που παραμένουν στον αέρα, μετά το τέλος του πειράματος, εξετάζονται με περίθλαση ακτίνωνΧ- XRD



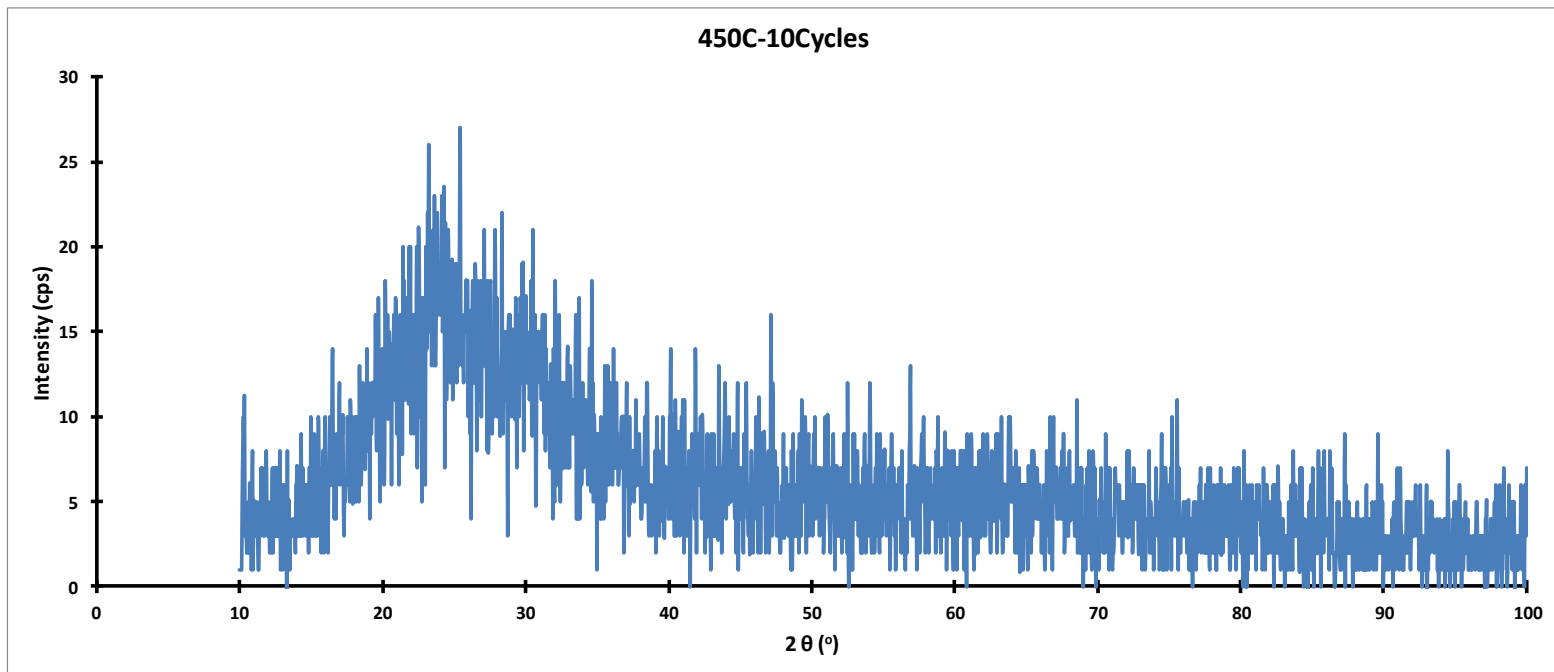
**Διάγραμμα 5.1:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ στους 150°C για 40 κύκλους



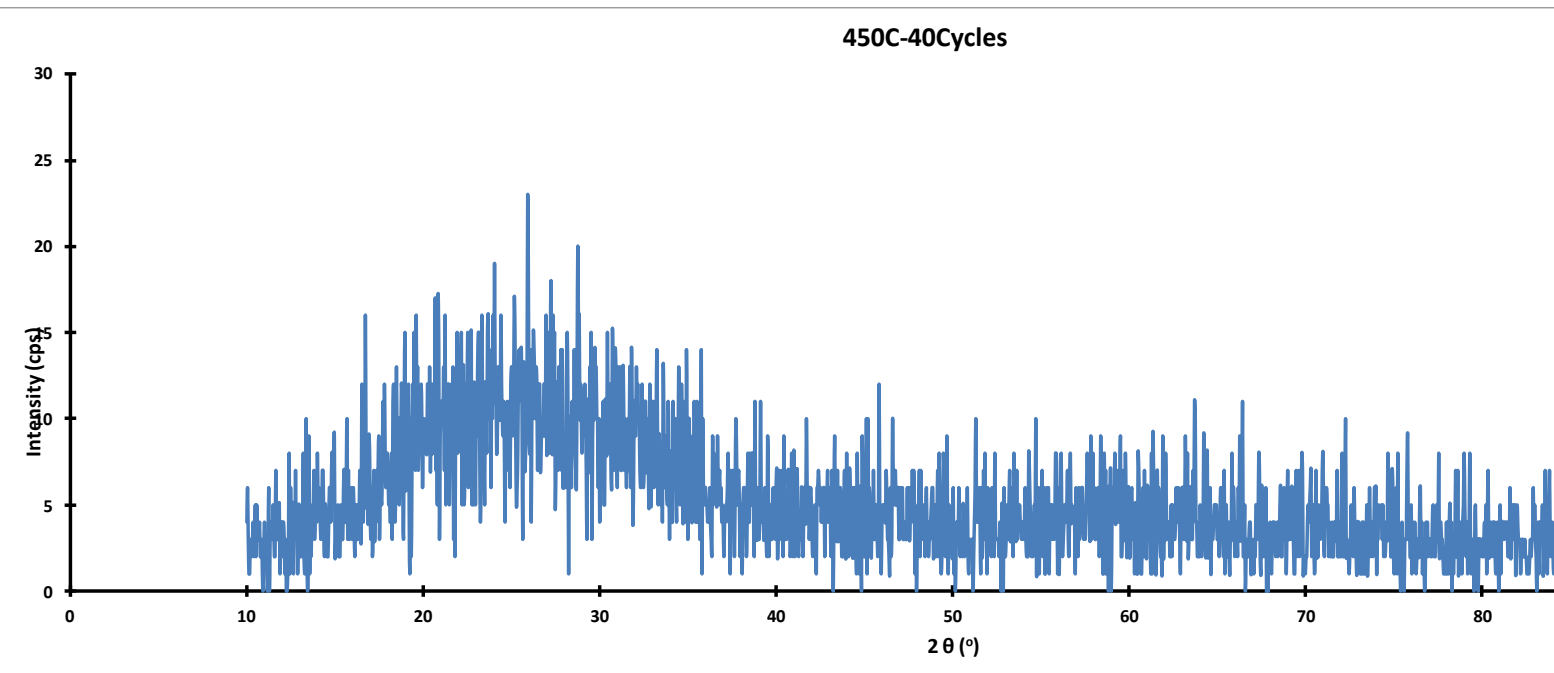
**Διάγραμμα 5.2:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ στους 250°C για 40 κύκλους



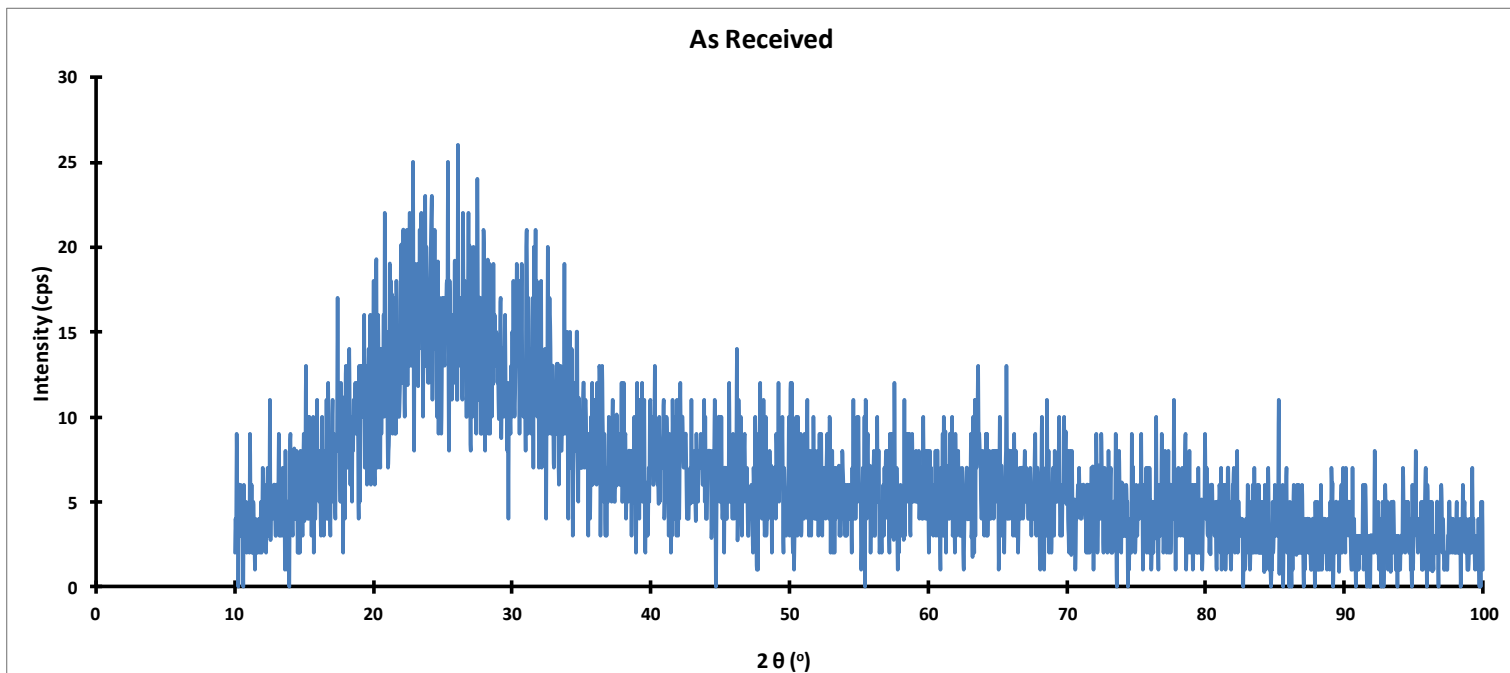
**Διάγραμμα 5.3:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ στους 350°C για 40 κύκλους



**Διάγραμμα 5.4:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X στους 450°C για 10 κύκλους



**Διάγραμμα 5.5:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X στους 450°C για 40 κύκλους



**Διάγραμμα 5.6:** Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ μη κατεργασμένου δοκιμίου

Παρατηρούμε ότι το υλικό μας είναι άμορφο και αμορφοποιείται ακόμα περισσότερο, όσο αυξάνει η θερμοκρασία και ο χρόνος επιβολής του θερμοκρασιακού αιφνιδισμού.

Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα από το άνοιγμα της καμπάνας που αυξάνεται και από την πτώση της έντασης που παρατηρείται.

### **Ζύγισμα δοκιμίων**

Μετά το τέλος του πειράματος, τα δοκίμια που παρέμειναν στον αέρα ζυγίστηκαν για να διαπιστωθεί εάν επηρεάστηκε το βάρος τους.

Παρατηρήθηκε ασήμαντη μεταβολή βάρους  $\Delta W$  (gr) αυτών των δοκιμίων πριν και μετά την εκτέλεση του πειράματος.

Επίσης με γυμνό μάτι δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές σ'αυτά τα δοκίμια ούτε κάποια άλλη μεταβολή.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όταν το κοινό γυαλί (soda lime glass) υποβάλλεται σε θερμοκρασιακούς αιφνιδιασμούς των 150°C, 250°C, 350°C και 450°C στους 10, 20, 30 και 40 κύκλους, με διάρκεια κάθε κύκλου δέκα λεπτά, πέντε λεπτά η διάρκεια παραμονής του δοκιμίου μέσα στον κλίβανο και πέντε λεπτά έξω απ' αυτόν, έχουμε:

### Για παραμονή υάλου στον αέρα

- Δεν παρατηρείται μεταβολή βάρους στα δοκίμια πριν και μετά το θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να οφείλεται και στο λείαν μικρό βάρος που έλαβαν τα δοκίμια.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας και την αύξηση των κύκλων, η εμφάνιση στιγμάτων αυξάνεται στην επιφάνεια του γυαλιού, που πιθανόν οφείλεται σε δημιουργία οξειδίων και το σχήμα τους μεγαλώνει.
- Το υλικό γίνεται όλο και πιο άμορφο με την αύξηση της θερμοκρασίας και την αύξηση των κύκλων.

### Για εμφάνιση υάλου στο νερό.

- Σε θερμοκρασίες 350°C και 450°C και σε όλους τους κύκλους παρατηρούνται ρωγμές, που οφείλονται στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων που είναι μεγαλύτερες από τη μηχανική αντοχή του γυαλιού. Οι ρωγμές είναι εντονότερες σε υψηλότερες θερμοκρασίες και σε περισσότερους κύκλους.

Η θερμική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$R_s = (\lambda * \sigma_F) / (\alpha * E)$$

Όπου:

**R<sub>s</sub>** : αντίσταση σε θερμοκρασιακό αιφνιδιασμό

**λ** : θερμική αγωγιμότητα = 1 W/mK

**σ<sub>F</sub>** : αντοχή στην κάμψη = 29,8 GPa

**α** : συντελεστής θερμικής διαστολής = 9,5 ppm/K

$E$  : μέτρο ελαστικότητας =74 GPa

$\lambda_{\text{γυαλιού}} = 1 \text{ W/mK} > \lambda_{\text{νερού}} = 0,57 \text{ W/mK} > \lambda_{\text{αέρα}} = 0,0243 \text{ W/mK}$

Όταν το γυαλί εμβαπτίζεται στο νερό, η θερμική διαβάθμιση είναι εντονότερη δηλαδή ο ρυθμός απόψυξης στο νερό είναι πιο απότομος. Ο κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης  $K_{IC}$  αυξάνεται τοπικά γρηγορότερα και εντονότερα και έχει σα συνέπεια την έναρξη ρωγμάτωσης.

Όταν το γυαλί παραμένει στον αέρα, η κλίση της θερμικής διαβάθμισης είναι μικρότερη, δηλαδή ο ρυθμός απόψυξης δεν είναι τόσο απότομος. Ο κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης  $K_{IC}$  δεν αυξάνεται τοπικά γρηγορότερα και εντονότερα και έχει σα συνέπεια τη μη έναρξη ρωγμάτωσης.

## 7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, εξετάστηκε η θερμομηχανική καταπόνηση υάλου (soda lime glass) στους 10,20,30 και 40 κύκλους σε θερμοκρασίες 150 °C, 250 °C, 350 °C και 450 °C

Βέβαια στο χρόνο που αναλογούσε για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, δεν ήταν δυνατόν να εξεταστούν όλες οι επιστημονικές πτυχές του θέματος. Για το λόγο αυτό προτείνονται ορισμένα θέματα, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν έναυσμα για νέους ερευνητές.

- ❖ Θα ήταν ενδιαφέρον λοιπόν να γίνουν δοκιμές θερμοκρασιακού αιφνιδιασμού μεταβάλλοντας τον αριθμό των κύκλων και τη θερμοκρασία.
- ❖ Να χρησιμοποιηθούν άλλα είδη γυαλιού όπως: υαλοκεραμικό, βορίου, μολύβδου και αργιλίου.
- ❖ Να γίνει έλεγχος της αντοχής των δοκιμών με μηχανικά μέσα.



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] University of Florence: Department of civil engineering Anna Bati, Maurizio Orlando, Ostilio Spadaccini, Paolo Spinelli «Use of Laminated Safety Glass plates under compression: application to the design of an arch pedestrian bridge» International Symposium on the Application of Architectural Glass (ISAAG) Munich, Germany 2006
- [2] Philip Wilson, Gennady Vasilchenko-Malishev, «The design and construction of all glass structures», International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Paris 2006.
- [3] Aki Vuolio, «Structural behaviour of glass structures in facades», Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 27, Espoo, October 2003
- [4] Leonardo Lani, «Progetto di elementi in vetrostrutturale secondo la norma EN 13474-3 (CEN/TC129/WG8)», Dipartimento Ingegneria Strutturale, Facoltà Ingegneria, Università di PISA.
- [5] Matthias Haldimann, «Fracture strength of structural glass elements – analytical and numerical modelling, testing and design», these no 3671 (2006), école polytechnique federale de lausanne, 13 décembre 2006
- [6] M. Overent, S. Gaetano, M. Haldimann, «Diagnostic interpretation of glass failure», Structural Engineering International 2/2007
- [7] Glass Science second edition, Robert H. Doremus.
- [8] “Principles of Instrumental Analysis” Skoog, Holler, Nilman, Harcourt College Publishers, 1998
- [9] “Analytical Chemistry” R.Kellner, J.M.Mermet, M.Otto, H.M.Widmer, Wiley-VCH, 1997
- [10] A.H. Compton and S.K. Allison in “X- Rays in Theory and Experiment”, 2<sup>nd</sup> Ed., D. Van Nostrand Company Inc., (1951)
- [11] R. Jenkins in “X-Ray Fluorescence Spectrometry”, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., (1999)
- [12] A.R. West in “Solid State Chemistry and its Applications”, John Wiley & Sons, (1985)
- [13] J.-J. Rousseau in “Basic Crystallography”, John Wiley & Sons, (1998)

- [14] S.R.Elliot in " The Physics and Chemistry of Solids", John Willey & Sons, (1998)
- [15] W.D. Callister in "Material Science and Engineering: An Introduction", 4<sup>th</sup> Edition, John Willey & Sons, (1997)
- [16] R.D. Rawlings, *Comp.*, 25 (1994), 372
- [17] J. Jeong, H. Adib, G. Pluinage, *J. Non. Cryst.Sol.* 351 (2005), 2065
- [18] K.A. Cerqua, S.P.Jacobs and A. Lindquist, *J. Non. Cryst.Sol.* 93 (1987) 361
- [19] Y.Pontikes, L.Esposito, A. Tucci, G.N.Angelopoylos, *J. Eur. Cer. Soc.* , 27 (2007) 1657
- [20] O. Peitl, E.D. Zanotto, *J. Non. Cryst.Sol.* 247 (1999) 39
- [21] D.P.H. Hasselman, *J.Am. Cer.Soc.* 52 (1969) 600
- [22] W.D. Kingery, *J.Am. Cer.Soc.* 38 (1955) 3

## **ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

ΚΑΡΒΟΥΝΗ ΔΗΜΗΤΡΑ

### ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΟΝΟΜΑ ΠΑΤΡΟΣ : ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
ΟΝΟΜΑ ΜΗΤΡΟΣ : ΕΛΕΝΗ  
ΤΟΠΟΣ ΓΕΝΝΗΣΗΣ : ΑΜΑΡΥΝΘΟΣ ΕΥΒΟΙΑΣ  
ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ : ΕΓΓΑΜΗ, ΜΗΤΕΡΑ ΤΡΙΩΝ ΠΑΙΔΙΩΝ

### **ΣΠΟΥΔΕΣ**

- ΑΠΟΦΟΙΤΟΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΜΕΤΣΟΒΙΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ. Έτος αποφοίτησης 1991. ΑΔΕΙΑ ΑΣΚΗΣΗΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΟΣ (1991).
- ΤΕΛΕΙΟΦΟΙΤΟΣ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.) << ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ >>ΣΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
- ΓΝΩΣΗ Η/Υ

Παρακολούθηση πληροφορικής (διάρκειας 400 ωρών) στα ακόλουθα θέματα:

εισαγωγή στην πληροφορική, D BASE III PLUS, Γεωγραφικά Συστήματα

Πληροφοριών GIS (ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ)

MS WORD, MS EXCEL, ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ (ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ)

AUTOCAD (ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ)

➤ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ

Παρακολούθηση αυτοχρηματοδοτούμενου σεμιναρίου από το (ΙΕΚΕΜ ΤΕΕ), όσον αφορά τη διαδικασία έκδοσης οικοδομικών αδειών (ΒΕΒΑΙΩΣΗ) Νομικό πλαίσιο έκδοσης οικοδομικών αδειών. Εκπόνηση μελετών. Αμοιβές – φορολογικά.

Υποβολή μελετών ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) εγκαταστάσεων.

εφαρμογές με χρήση Η/Υ.

➤ ΓΝΩΣΕΙΣ ΓΟΚ

### **ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ**

➤ ΑΓΓΛΙΚΑ

### **ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ**

Από 05/11/91 έως 16/02/06, εταιρεία Μπιώτης – Ραμπαούνης – Φαμελιάρης – Πατριανάκος Α.Ε. (Μελετητική και κατασκευαστική εταιρεία κτιριακών έργων)

Μελέτες – επιβλέψεις κτιριακών έργων. Έργα πολιτικού μηχανικού.

Από 17/02/06 έως 18/05/07, εταιρεία Πεφάνης Μακρής.

Μελέτες – επιβλέψεις κτιριακών έργων. Έργα πολιτικού μηχανικού.

Από 19/05/07 έως 15/10/07, ελεύθερος επαγγελματίας σε έργα πολιτικού μηχανικού.

Μελέτες – επιβλέψεις κτιριακών έργων. Συντηρήσεις κτιρίων, γραφείων, καταστημάτων. Τοπογραφικά. Άδειες κ.λ.π.

Από 16/10/07 έως 13/07/09, Δ.Ε.Η. Α.Ε. Έργα Πολιτικού Μηχανικού.

#### Στον ΑΣΠ ΣΑΜΟΥ

Κατασκευή μεταλλικού κτιρίου αποθήκης με γερανογέφυρα, μελέτη κατασκευής οδών, μελέτη κατασκευής περίφραξης, μελέτη κατασκευής κτιρίου θυρωρείου, μελέτη συντήρησης κτιρίων, μελέτη στεγανοποίησης – θερμομόνωσης κτιρίων, μελέτη μεταλλικών στεγάστρων, μελέτη διαμόρφωσης περιβάλλοντος χώρου κτιρίων, μελέτη περίφραξης μετασχηματιστών με αιρετά πανέλα, μελέτη κατασκευής κοιτόστρωσης και τοίχων αντιστήριξης σε χείμαρρο που διέρχεται από το γήπεδο του ΑΣΠ, κατασκευή προστατευτικών τοιχείων σε λεκάνες ασφαλείας δεξαμενών, μελέτη κατασκευής οδοστρωμάτων, μελέτη κατασκευής μεταλλικού στεγάστρου Parking, μελέτη μεταλλικής γέφυρας για προσπέλαση πεζών πάνω από τη γέφυρα, μελέτη αισθητικής ανάπλασης γηπέδου, μελέτη αυτόματου ποτίσματος, μελέτη κατασκευής σιντριβανιού, επιμετρήσεις, προϋπολογισμοί μελετών.

#### ΤΣΠ ΙΚΑΡΙΑΣ

Μελέτη κατασκευής κτιρίου Μηχανοστασίου, μελέτη συντήρησης κτιρίων, μελέτη κατασκευής περίφραξης.

Συγγραφή προδιαγραφών για καθαίρεση υπάρχοντος μηχανοστασίου και κατασκευή νέου.

#### ΑΣΠ ΛΗΜΝΟΥ

Μελέτη – κατασκευή κτιρίων: γραφείων , αποθήκης, μηχανουργείου, διαχωριστήρων.

Έλεγχος αρχιτεκτονικής μελέτης των ανωτέρω κτιρίων – διαδικασία εγκρίσεων κλπ.

#### ΑΣΠ ΣΑΜΟΥ – ΑΣΠ ΛΗΜΝΟΥ – ΑΣΠ ΣΥΡΟΥ

Αποπεράτωση της συγγραφής προδιαγραφών των μεταλλικών καμινάδων των οριζόντιων αγωγών καυσαερίων (από corten), μεταλλικών στηριγμάτων τους, κλπ.

ΑΣΠ ΣΥΡΟΥ – ΑΣΠ ΛΕΣΒΟΥ – ΑΣΠ ΣΑΜΟΥ

Έλεγχος των βάσεων των Η/Ζ, των καμινάδων, των μεταλλικών στηριγμάτων τους , κλπ.

Από 20/07/09 έως 19/08/10 Ε.Τ.Α. Α.Ε. (Εταιρεία Τουριστικής Ανάπτυξης Α.Ε.)

Σύνταξη εισηγήσεων για τη διεκπεραίωση των διαφόρων εκκρεμοτήτων τεχνικής φύσεως, μελέτη τεχνικών έργων και συντηρήσεων των εγκαταστάσεων της εταιρείας.

Εξέταση των περιουσιακών στοιχείων της Ε.Τ.Α. από τεχνικής άποψης με σκοπό την εκ νέου εκμίσθωσή τους.

Επεξεργασία στις τεχνικές περιγραφές των εκμισθούμενων ακινήτων και των προς εκμίσθωση ακινήτων.

Παρακολούθηση των εκμισθούμενων μονάδων ως προς τη νομιμότητα ή μη των κατασκευών.

Ακτή Βούλας – Ακτή Βάρκιζας:

Παρακολούθηση των νομίμων μισθωμένων κτισμάτων.

Σύνταξη εκθέσεων και πορισμάτων για τα τεχνικά έργα των μισθωμένων μονάδων και παρακολούθηση των τεχνικών έργων των συμβάσεων μισθώσεων.

Από 20/08/10 έως σήμερα ελεύθερος επαγγελματίας σε έργα Πολιτικού Μηχανικού.

