

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΟΥΛΑΚΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**“ ΤΟ ΓΥΑΛΙ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ”**



**ΡΗΓΑ ΑΘΗΝΑ**

**ΑΘΗΝΑ 2011**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ</u></b>	<b><u>1</u></b>
Εμφάνιση και εξέλιξη του αρχιτεκτονικού υαλοπίνακα	1
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</u></b>	<b><u>4</u></b>
Αφυάλωση	5
Διαδικασία παραγωγής	6
Διαδικασία παραγωγής με την μέθοδο float	8
Λείανση και στίλβωση γυάλινων επιφανειών	10
Φυσικές ιδιότητες του γυαλιού	11
Μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού	17
Φωτομετρικές και ενεργειακές ιδιότητες του γυαλιού	18
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΓΥΑΛΙ</u></b>	<b><u>20</u></b>
Δοκιμή σκληρότητας	20
Δοκιμή σε κρούση	23
Προσδιορισμός συντελεστή U-Value	29
Προσδιορισμός αντοχής γυαλιού σε κάμψη	34
Προσδιορισμός συντελεστή γραμμικής διαστολής	44
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ</u></b>	<b><u>48</u></b>
Απλοί υαλοπίνακες	48
Διπλοί υαλοπίνακες	49
Ανακλαστικοί υαλοπίνακες	49
Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής	51

Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες	53
Φωτοβολταϊκά στοιχεία	55
Πυρίμαχοι υαλοπίνακες	58
U-Glass	59
Υαλότουβλα	60
Ηχομειωτικοί υαλοπίνακες	60
Υαλοπίνακες ασφαλείας	62
Συγκολλημένοι υαλοπίνακες	63
Λοιπές κατηγορίες υαλοπινάκων	63
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΘΡΑΥΣΗ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ</u></b>	<b>64</b>
Παράγοντες φθοράς του γυαλιού	64
Αποτελέσματα της φθοράς	68
Μορφολογία της φθοράς	70
Μέθοδοι ελέγχου θραύσης του γυαλιού	73
Επιφανειακή αντοχή του γυαλιού	74
Επιφάνεια θραύσης	76
Ταχύτητα της θραύσης	78
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ</u></b>	<b>80</b>
Μέθοδοι συντήρησης	80
Συνθετικά που χρησιμοποιούνται στην συντήρηση	80
Στερέωση της επιφάνειας του γυαλιού	83
Συγκόλληση του γυαλιού	87
Οδηγίες για την επίτευξη μιας καλής ποιότητας συγκόλλησης	90



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Το γυαλί σαν υλικό υπήρχε ανέκαθεν στην φύση, σχηματισμένο από το λιώσιμο συγκεκριμένων πετρωμάτων, σε συνθήκες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (κυρίως μετά από ηφαιστειακές εκρήξεις). Πρόκειται για τον οψιδιανό, ένα σκούρο αδιαφανές πέτρωμα, που χρησιμοποιήθηκε πριν από χιλιάδες χρόνια για την κατασκευή κοσμημάτων, αγγείων, εργαλείων και όπλων.

Κατά τον ιστορικό Πλίνιο ο άνθρωπος έγινε μάρτυρας της παραγωγής γυαλιού από ένα τυχαίο περιστατικό. Σε ένα πρόχειρο τζάκι από πέτρες ορυκτής σόδας ανάψανε φωτιά. Η μεγάλη θερμοκρασία 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. Είναι η πρώτη ιστορική αναφορά παραγωγής γυαλιού από ανθρώπινη δραστηριότητα.

Το 1500 π.Χ η παραγωγή γυάλινων αντικειμένων είναι πλέον γεγονός και οι πόλεις-κράτη που δραστηριοποιούνται στον τομέα αυτό είναι κυρίως οι Μυκήνες, η Κίνα και η Συρία.

Μεταγενέστερα, ο 9ος αιώνας βρίσκει τους Αιγυπτίους να έχουν αναπτύξει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη μέθοδο παραγωγής γυάλινων αντικειμένων χρησιμοποιώντας καλούπια, και ήταν τέτοιο το ενδιαφέρον και η επιμονή τους που, για τα επόμενα 500 χρόνια, ήταν η μητρόπολη του γυαλιού, ενώ λέγεται, ότι από εκεί διαδόθηκε αυτή η σπάνια τέχνη στην Ιταλία. Ουσιαστικά, αυτό που έδωσε τη μεγάλη ώθηση στην εξάπλωσή της, ήταν η ανακάλυψη του φυσητού γυαλιού, που χρονολογικά τοποθετείται μεταξύ του 27 π.Χ. και 14 μ.Χ. Ο μακρύς λεπτός μεταλλικός σωλήνας που χρησιμοποιείται για την 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 την 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.

### **ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑ**

Το γυαλί, κατά την πήξη του, όταν έρχεται σε επαφή με στερεά σώματα παύει να είναι διαφανές και είναι μόνο φωτοδιαπερατό (χυτό γυαλί). Το χυτό, επίπεδο γυαλί πρωτοεμφανίζεται τον πρώτο π.Χ. αιώνα στην Ρώμη. Το λιωμένο γυαλί χύνεται σε ξύλινα επίπεδα καλούπια που έχουν προηγουμένως βραχεί. Τα πρώτα αυτά

επίπεδα γυαλιά έχουν διαστάσεις 40X40 εκ. και πάχος 4 έως 5 χιλιοστών. Έχουμε πλέον με τον τρόπο αυτόν γυαλιά για την πλήρωση παραθύρων. Οι πρώτοι υαλοπίνακες της ιστορίας τοποθετούνται την πρώτη μ.Χ. δεκαετία, στην 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 στην 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 την μια πλευρά των υαλοπινάκων με μόλυβδο.

Γύρω στα 1.000 μ.Χ. έχουμε σημαντικές αλλαγές στην τεχνολογία του γυαλιού όταν αναπτύσσεται από Γερμανούς υαλουργούς, μια νέα μέθοδος παραγωγής επίπεδου γυαλιού. 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. Η μέθοδος αυτή εξελίχθηκε αργότερα από Βενετούς τεχνίτες οι οποίοι, πέρα από την τελειοποίηση υφιστάμενων τεχνικών, ανέπτυξαν και νέες μεθόδους όπως η τεχνική της επιμετάλλωσης με υδράργυρο που παρήγαγε τους ονομαστούς σε όλη την Ευρώπη καθρέπτες.

Οι τεχνικές της υαλουργίας διαδόθηκαν σε όλη την Ευρώπη. Έτσι, με την ίδρυση της Βρετανικής Εταιρίας Υαλοπινάκων το 1773, η Αγγλία κατέστη το κέντρο του κόσμου όσον αφορά τους ποιοτικούς υαλοπίνακες παραθύρων. Την δεκαετία του 1870, ο υαλουργός George Ravenscroft, χρησιμοποιώντας οξείδιο του μολύβδου αντί για ποτάσα (υδροξείδιο του καλίου), παράγει διαυγές γυαλί μεγάλης αντοχής το οποίο μπορεί πλέον να χαραχθεί.

Στα 1688, αναπτύχθηκε μια καινούργια διαδικασία για την παραγωγή επίπεδου γυαλιού κυρίως για την παραγωγή καθρεπτών. 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 (λειανίζεται) 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 επιστρωνόταν στην μια τους πλευρά με ένα ανακλαστικό, εύτηκτο μέταλλο, μπορούσαν να παραχθούν υψηλής ποιότητας καθρέπτες.

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 την 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, εφεύρε 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.

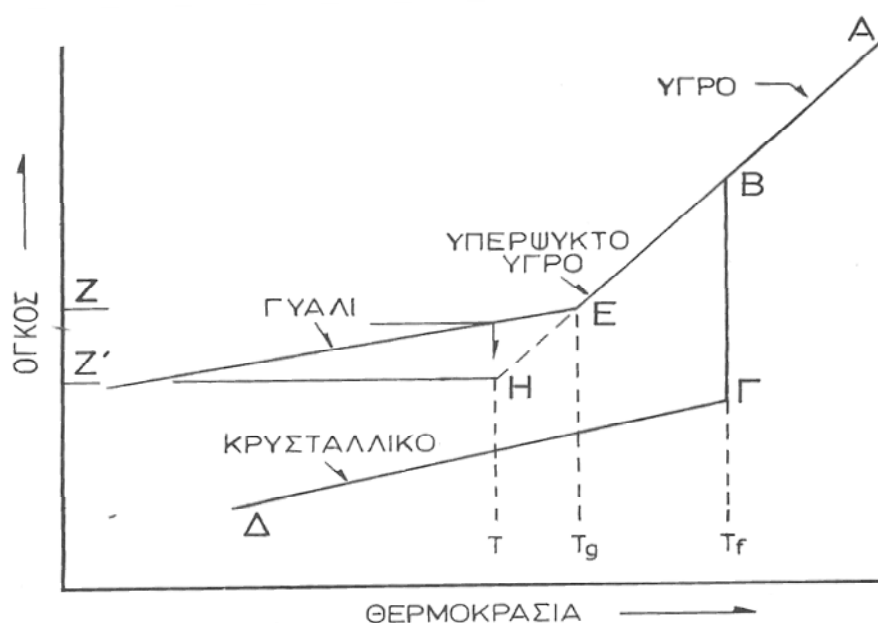
Η πρόοδος υπήρξε ραγδαία. Και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού ανεπτύχθησαν και μπήκαν σε εμπορική εφαρμογή καινοτόμες μέθοδοι παραγωγής αρχιτεκτονικού γυαλιού. Κυριότερες εξ αυτών η μέθοδος του τραβηχτού (etire) γυάλινου «σεντονιού» (sheet glass) του Βέλγου Emille Fourcault (1905), η οποία αναπτύχθηκε σχεδόν ταυτόχρονα με αυτήν του Αμερικανού Irving Colburn σε συνεργασία με την εταιρία Libbey-Owens. Με την 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 την δυνατότητα παραγωγής διακοσμημένου γυαλιού (figured glass), 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.

Με καμιά από τις παραπάνω μεθόδους δεν κατέστη δυνατόν να παραχθεί επίπεδο γυαλί με τα επιθυμητά οπτικά χαρακτηριστικά, ώσπου μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η Βρετανική εταιρία "Pilkington Brothers Ltd" παρουσίασε την 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 τον 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 στην συνέχεια τραβιέται οριζοντίως μέσα στον θάλαμο ανόπτωσης (όπου θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία) σχηματίζοντας μια συνεχή γυάλινη ταινία μέχρι την γραμμή κοπής. Με αυτή την μέθοδο παράγεται σήμερα το σύνολο σχεδόν του επίπεδου γυαλιού παγκοσμίως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι μάζες των άμορφων κραμάτων εμφανίζουν την διαδοχική μετάβαση από άμορφα -> μετάβαση σε γυαλί -> υπερψυγμένη υγρή περιοχή -> κρυστάλλωση κατόπιν συνεχούς θέρμανσης. Έτσι, οι μάζες των άμορφων κραμάτων έχουν μία ευρεία υγρή περιοχή πριν την κρυστάλλωση. Η εμφάνιση αυτής της ευρείας περιοχής συνεπάγεται ότι αυτή παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στην κρυστάλλωση.

Η σχέση μεταξύ κρυσταλλικής, υγρής και υαλώδους κατάστασης γίνεται σαφής από το διάγραμμα μεταβολής του όγκου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία:



Κατά την ψύξη του υγρού από την αρχική κατάσταση Α, παρουσιάζεται μείωση του όγκου με σταθερό ρυθμό, κατά την διαδικασία ΑΒ. Εάν, ο ρυθμός της ψύξης είναι αργός και υπάρχουν πυρήνες των διαφόρων ατόμων, γίνεται κρυστάλλωση του υλικού στην θερμοκρασία ψύξης T<sub>f</sub>. Παράλληλα, ο όγκος μειώνεται απότομα κατά την διαδικασία ΒΓ. Στη συνέχεια, το στερεό συστέλλεται με την πτώση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της διαδικασίας ΓΔ.

Αντίθετα, αν η ψύξη είναι αρκετά γρήγορη, δεν γίνεται κρυστάλλωση του υλικού στην θερμοκρασία T<sub>f</sub> και ο όγκος του υπέρψυκτου υγρού μειώνεται κατά την διάρκεια της διαδικασίας ΒΕ, που είναι συνέχεια και ίδιου ρυθμού με την ΑΒ. Στη θερμοκρασία T<sub>g</sub> η γραφική παράσταση παρουσιάζει σημαντική μείωση στην κλίση της και συνεχίζει παράλληλα με τη γραφική παράσταση της διαδικασίας ΓΔ του



σχηματισμού κρυστάλλων. Η Tg ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και κάτω από αυτή το υλικό είναι γυαλί. Το σημείο E, που αντιστοιχεί με την θερμοκρασία Tg, μεταβάλλεται με τον ρυθμό ψύξης οπότε και αναφέρεται σαν περιοχή υαλώδους μετάπτωσης, παρά σαν συγκεκριμένο σημείο. Κατά την διάρκεια της θερμοκρασίας Tg, η ρευστότητα του υλικού είναι πολύ υψηλή, περίπου  $10^{13}$  poise.

Εάν η θερμοκρασία του γυαλιού κρατηθεί σταθερή σε ένα σημείο T, ελαφρά μικρότερο από το Tg, θα έχουμε μείωση του όγκου Z με αργό σταθερό ρυθμό. Τελικά ο όγκος φτάνει στην τιμή Z με την διαδικασία EH, που είναι μια συνέχεια της διαδικασίας BE. Άλλες ιδιότητες του γυαλίνου υλικού μεταβάλλονται με τον χρόνο στην περιοχή της θερμοκρασίας Tg και η διαδικασία με την οποία το γυαλί φτάνει σε περισσότερο σταθερή κατάσταση είναι γνωστή σαν σταθεροποίηση. Σε τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες από την Tg δεν παρατηρούνται αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού με την πάροδο του χρόνου και σαν τελικό συμπέρασμα, οι παράγοντες που επιδρούν στην σταθεροποίηση εξαρτώνται άμεσα από τον ρυθμό ψύξης.

## ΑΦΥΑΛΩΣΗ

Η αφυάλωση είναι η διαδικασία κατά την οποία έχουμε αλλαγή από την υαλώδη κατάσταση σε δημιουργία λεπτοκρυστάλλων, κατά την διάρκεια κατασκευής του γυαλιού.

Όταν το λιωμένο γυαλί ψύχεται, η τυχαία κατανομή των μορίων τείνει να πάρει τέτοια διαμόρφωση όπως εκείνη των κρυστάλλων. Έτσι σχηματίζεται μια διαφορετική δομή διότι η διαδικασία δημιουργίας σταθερής κρυσταλλικής δομής εμποδίζεται από την ρευστότητα του γυαλιού. Όταν προστίθενται οι τροποποιητές δικτύου (ευτηκτικές ύλες, όπως οξείδιο του νατρίου και οξείδιο του καλίου) προκαλείται αξιοσημείωτη μείωση της ρευστότητας και έτσι σχηματίζονται νέοι τύποι κρυστάλλων οι οποίοι περιέχουν άτομα από τους τροποποιητές. Έτσι, η τήξη διατηρείται στην θερμοκρασία του υγρού για αρκετά μεγάλο διάστημα.

Θεωρείται σημαντικό το γυαλί να ψύχεται αρκετά γρήγορα όπως π.χ. με ρυθμό της τάξης των  $17\mu\text{m}/\text{min}$  στην θερμοκρασία των  $995^{\circ}\text{C}$ . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αφυάλωση και το προϊόν της δεν υπάρχει στην φύση σαν ορυκτό.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

### Προετοιμασία του μίγματος των υλικών κατασκευής του γυαλιού και τοποθέτησή του μέσα στο φούρνο

Αρχικά το επιθυμητό μέγεθος των κόκκων επιτυγχάνεται με κοσκίνισμα, με χρήση από κόσκινα διαφόρων μεγεθών. Στην συνέχεια γίνεται καλή ανάμιξη των υλικών με αυτόματα μηχανικά μέσα.

Η μεταφορά του μίγματος, με τις δονήσεις που προκαλούνται, μπορεί να προκαλέσει τον διαχωρισμό των διαφόρων υλικών με διαφορετικά μεγέθη κόκκων και αυτό αποφεύγεται με την ύγρανση της άμμου με 3-4% νερό. Αυτό επίσης έχει σαν αποτέλεσμα να μην δημιουργείται σκόνη κατά την διάρκεια της μεταφοράς και του φορτώματός του.

Η καλύτερη μέθοδος για την αποφυγή του διαχωρισμού, που είναι τεχνολογικά και οικονομικά εφικτή, είναι η χρήση ενός περιστρεφόμενου δίσκου ή τυμπάνου ή η συμπίεση του μίγματος σε έναν περιστρεφόμενο ιμάντα.

### Τήξη του μίγματος των υλικών

Μετά από την παρασκευή του μίγματος, το υλικό εισάγεται στο χώρο τήξης. Για φούρνους μεγάλης χωρητικότητας το μίγμα τροφοδοτείται με διάφορους φορτωτές, π.χ. με μια έλικα, με ένα έμβολο ή με μια έλικα παλμικού τύπου κτλ και ο ρυθμός φορτώματος ελέγχεται αυτόματα με έναν ελεγκτή του ύψους και του επιπέδου του υλικού.

Οι φούρνοι κατασκευής γυαλιού κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Οι φούρνοι δοχείων, με περιοδική λειτουργία και συνήθως κύκλο εργασίας 24 ώρες. Το γυαλί τήκεται μέσα σε κεραμικά δοχεία και συνήθως οι φούρνοι χρησιμοποιούνται για τη τήξη και κατασκευή ειδικών γυαλιών και σε σχετικά μικρές ποσότητες.
- Οι φούρνοι ημερήσιας λειτουργίας, όπου έχουμε τήξη του υλικού με κάποια περιοδικότητα, αλλά η τήξη γίνεται μέσα σε δοχείο του φούρνου. Γενικά χρησιμοποιούνται σπάνια, κύρια για την παρασκευή μικρών ποσοτήτων γυάλινων αντικειμένων που θα δουλευτούν στο χέρι.
- Οι φούρνοι συνεχούς λειτουργίας, όπου το μίγμα τροφοδοτείται συνεχώς από το ένα άκρο και το τηγμένο γυαλί λαμβάνεται από το άλλο οπότε και τροφοδοτεί τις μηχανές αυτόματης μορφοποίησης. Χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες γυαλιού.

- Οι ηλεκτρικοί φούρνοι, σε διάφορα σχήματα. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φωταέριο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο και ηλεκτρική ενέργεια.

### **Μορφοποίηση (φορμάρισμα)**

Το γυαλί παίρνει διάφορα σχήματα με την χύτευση του τήγματος σε μεταλλικά καλούπια από χρώμιο και χάλυβα. Για την αποφυγή της συγκόλλησης του τήγματος με την επιφάνεια του καλουπιού, τοποθετείται ειδικό λιπαντικό επάνω στην επιφάνεια.

Για την παραγωγή υαλοπινάκων και σωλήνων γυαλιού υπάρχουν ειδικές διατάξεις κατά τις οποίες, στην περίπτωση των υαλοπινάκων, το τήγμα διέρχεται από μία οριζόντια σχισμή και ανάμεσα από δύο αντίθετα στρεφόμενους κυλίνδρους, ενώ στην περίπτωση των σωλήνων εισάγεται αέρας με πίεση στο τήγμα που ρέει γύρω από έναν άξονα που στρέφεται.

### **Βραδεία ψύξη**

Κατά την ψύξη του γυαλιού αναπτύσσονται προσωρινές και μόνιμες τάσεις που πρέπει να εξομαλυνθούν με ένα χαμηλό ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας.

Συνολικά η ψύξη του γυαλιού εκτελείται αρχικά με θέρμανση του γυαλιού, που έχει σχετικά ψυχθεί, σε μια υψηλή θερμοκρασία. Έπειτα το γυαλί παραμένει στην θερμοκρασία αυτή για μια χρονική περίοδο κατάλληλη για την εξάλειψη των προσωρινών ή μόνιμων τάσεων μέσα στην μάζα του. Στην συνέχεια, γίνεται ψύξη με χαμηλό ρυθμό, σε φάσμα θερμοκρασιών όπου το γυαλί έχει ιξώδες  $10^{13}$  έως  $31.6 \cdot 10^{13}$  dPas για να αποφευχθεί ο σχηματισμός μόνιμων τάσεων στη μάζα. Τέλος, εκτελείται ψύξη με γρήγορο ρυθμό μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, έτσι ώστε ο ρυθμός αυτός να εμποδίζει το σχηματισμό τάσεων στη γυάλινη μάζα.

### **Διαδικασίες φινιρίσματος**

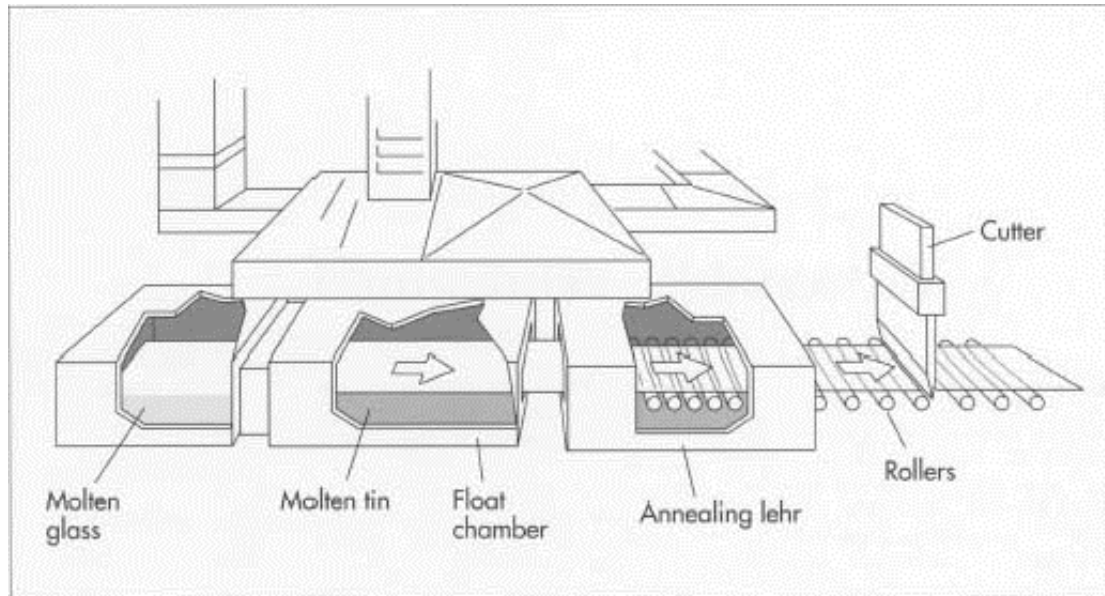
Οι διαδικασίες φινιρίσματος περιλαμβάνουν τις διορθώσεις διαφόρων ατελειών στα αντικείμενα, τη δημιουργία αδιαφάνειας επάνω στην επιφάνεια, τη χάραξη διαφόρων διακοσμήσεων και σχημάτων, την χρωματική διακόσμηση κλπ.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ FLOAT

Η παραγωγή του επίπεδου γυαλιού γίνεται πλέον με την μέθοδο "float" σε 300 περίπου εργοστάσια παγκοσμίως. Σε πρώτη φάση ζυγίζονται και αναμιγνύονται οι πρώτες ύλες με ακρίβεια και ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα. Στην συνέχεια το χαρμάνι αδειάζεται μέσα στον φούρνο τήξης (50 X 9 μέτρων περίπου), όπου λιώνουν τα υλικά σε θερμοκρασία 1.500 - 1.600 °C . Η καύσιμη ύλη είναι συνήθως φυσικό αέριο. Το λιωμένο γυαλί, ρέει (χύνεται) στο μπάνιο (45 X 5 μέτρων περίπου) με τον 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 την βαρύτητα) σχηματίζοντας ένα στρώμα πάχους 6 – 7 mm το οποίο όσο πηγαίνει προς την έξοδο του μπάνιου κρυώνει, 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, στον θάλαμο ψύξης, κυλιόμενη επάνω σε οριζόντιους κυλίνδρους (ράουλα). Η ταχύτητα κύλισης κυμαίνεται από 7 έως 20 m/min 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 στον θάλαμο ψύξης 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 τον 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.



### Παραγωγή επίπεδου γυαλιού με την μέθοδο float.

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 παλιές 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 την 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.

## ΛΕΙΑΝΣΗ ΚΑΙ ΣΤΙΛΒΩΣΗ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Συχνά η επιφάνεια του γυαλιού πρέπει να εξομαλύνεται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια : η λείανση, η λείανση με αλοιφή και η στίλβωση ανάλογα με την ποσότητα του αφαιρούμενου υλικού και του ύψους της τραχύτητας που απομένει.

Η λείανση είναι το αποτέλεσμα της τριβής με μία πολύ σκληρή ουσία όπως είναι το διαμάντι η οποία είναι είτε χαλαρή είτε συνδεδεμένη σε μέταλλο. Το διαμάντι προκαλεί θραύση στην γυάλινη επιφάνεια και διώχνει μακριά κομμάτια του υλικού της επιφάνειας. Ο βαθμός της απομάκρυνσης αυτού του υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογος με την σκληρότητα της επιφάνειας.

Η λείανση με αλοιφή είναι η απομάκρυνση υλικού από την γυάλινη επιφάνεια αλλά σε μικρότερο βαθμό από το προηγούμενο στάδιο και αφαιρεί μικρά κομμάτια. Η γυάλινη επιφάνεια είναι συνεπώς μερικώς εξομαλυμένη με αυτή την διαδικασία. Το νερό ως μέσο καθαρισμού αυξάνει την αποτελεσματικότητα του σταδίου αυτού. Ο κύριος μηχανισμός και σε αυτό το στάδιο είναι η θραύση και ο βαθμός της αποτελεσματικότητας αυτού του σταδίου είναι αντιστρόφως ανάλογος με την σκληρότητα της επιφάνειας. Η επίδραση του νερού υπονοεί ότι και η υγρασία της επιφάνειας μπορεί να παίζει κάποιο ρόλο.

Στην στίλβωση της γυάλινης επιφάνειας, η τραχύτητα μειώνεται με ένα συντελεστή με τιμή 100μm ή περισσότερο. Μαλακότεροι στερεοί κόκκοι χρησιμοποιούνται μέσα στο νερό μαζί με ένα μέσο στίλβωσης το οποίο αποτελείται από οργανικό υλικό όπως πίσσα. Οι κόκκοι απομακρύνουν το μαλακό υγρό στρώμα της γυάλινης επιφάνειας. Το μέσο στίλβωσης κρατά ενσωματωμένους τους κόκκους στίλβωσης και μεταφέρει μία φόρτιση σε αυτούς. Το μέσο στίλβωσης πρέπει να μπορεί να παραμορφώνεται ώστε να ταιριάζει στην γυάλινη επιφάνεια, επομένως πρέπει να είναι μαλακό.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το γυαλί είναι εξ ορισμού ένα άμορφο υλικό. Αποκαλείται άμορφο επειδή δεν είναι ούτε στερεό ούτε υγρό, αλλά παραμένει σε μια υαλώδη κατάσταση. Είναι μη κρυσταλλικής δομής, διαφανές (για το φάσμα του ορατού φωτός) και στερεό υψηλής σκληρότητας. Επίσης, είναι ένα εύθραυστο και μονωτικό υλικό καθώς και χημικά και βιολογικά αδρανές. Η αδράνεια είναι μια ιδιαίτερα χρήσιμη ιδιότητα του γυαλιού διότι λόγω της αδράνειας δύσκολα μεταβάλλει τη χημική του σύσταση ή αντιδρά με άλλες ουσίες.

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 «χαρμάνι» προστίθενται κατά περίπτωση και άλλα υλικά (όπως μεταλλικά οξειδία  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), σε μικρές ποσότητες, είτε για να βελτιώσουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του γυαλιού, είτε για να διευκολύνουν την διαδικασία παραγωγής, είτε για να χρωματίσουν την μάζα του. Άλλοι τύποι γυαλιών (κρύσταλλα, βοριοπυριτικά γυαλιά κλπ), προκύπτουν από συνδυασμούς των βασικών πρώτων υλών με άλλα δευτερεύοντα υλικά, στις κατάλληλες αναλογίες.

## ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

### Ιξώδες

Το γυαλί θεωρείται γενικά ως ένα άκαμπτο υλικό και σαν τέτοιο χρησιμοποιείται. Όμως, παρόλο που είναι άκαμπτο σε χαμηλές θερμοκρασίες, γίνεται πλαστικό σε υψηλές δηλ. γύρω στους  $900^\circ\text{C}$ . Ως εύπλαστο υγρό μπορεί να κατεργαστεί με διαφορετικούς τρόπους για να μορφοποιηθεί.

Τα γυαλιά είναι περισσότερο ρευστά από άλλα συνήθη υγρά και ένα χαρακτηριστικό του ιξώδους τους είναι η μεγάλη έκταση των τιμών που μπορεί να έχει εξαιτίας της σύνθεσης του γυαλιού και της θερμοκρασίας στην οποία το ιξώδες μετριέται.

Το γυαλί αναφέρεται με ιξώδες  $40\text{-}100\text{Nt}\cdot\text{sec}\cdot\text{m}^{-2}$  όπου  $1\text{Nt}\cdot\text{sec}\cdot\text{m}^{-2}=10\text{ poise}$ .

Το ιξώδες μεταβάλλεται τόσο γρήγορα ώστε ένας αριθμός παραγόντων απαιτείται για να περιγράψει τα διάφορα στάδια.

Διακρίνονται τα στάδια κατεργασίας, πλαστικότητας, σκλήρυνσης, καταπόνησης και μετασχηματισμού ανάλογα με την θερμοκρασία.

Το εύρος κατεργασίας είναι η διαφορά θερμοκρασίας του σημείου κατεργασίας και του σημείου πλαστικότητας. Έτσι, υπάρχουν γυαλιά με πλατύ εύρος θερμοκρασιών στο οποίο η επεξεργασία τους γίνεται σχετικά καλά αλλά μπορεί να χάνουν πιο

γρήγορα τη θερμότητά τους οπότε και πρέπει να θερμαίνονται στο φούρνο πιο συχνά.

Κατά την διάρκεια της τήξης του γυαλιού ο συντελεστής ιξώδους του τήγματος μπορεί να μειωθεί και κάτω από  $10^2$  poise. Για το φορμάρισμα του γυαλιού ο συντελεστής ιξώδους θα πρέπει να είναι από  $10^3$  έως  $10^7$  poise, ενώ η μάζα του γυαλιού μπορεί να δουλευτεί σε φλόγα οπότε ο συντελεστής ιξώδους κυμαίνεται από  $10^6$  έως  $10^9$  poise. Τέλος, κατά την ψύξη του γυαλιού ο συντελεστής ιξώδους κυμαίνεται από  $10^{13}$  έως  $31.6 \cdot 10^{13}$  poise.

### **Ρευστότητα του γυαλιού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος**

Η διαδικασία στερεοποίησης, δηλ. σταδιακής ψύξης του γυαλιού για απελευθέρωση των τάσεων, είναι ένα παράδειγμα βραδείας πλαστικής ροής του γυαλιού, όταν το ιξώδες του κυμαίνεται μεταξύ  $10^{11}$ - $10^{13}$  poise. Το γεγονός ότι το ιξώδες αλλάζει συνεχώς με την μείωση της θερμοκρασίας, συνεχίζοντας και στο σημείο τήξης, κάτι που παρατηρείται στα κρυσταλλικά στερεά, συνάγεται το συμπέρασμα ότι και το ψυχρό γυαλί θα πρέπει να παρουσιάζει σταδιακή ρευστότητα όταν εκτίθεται για μακρές χρονικές περιόδους. Για παράδειγμα, επιμήκεις γυάλινοι σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται για πολλά χρόνια οριζοντίως πάνω σε άγκιστρα αναπτύσσουν καμπυλότητα που οφείλεται στην ρευστότητα του γυαλιού.

Το Vickers Diamond Pyramid Hardest Test παρουσίασε ένα διάγραμμα το οποίο κατέγραψε την μεταβολή στην κλίση του ψυχρού γυαλιού, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη εξογκωμάτων στο γυαλί προς τα πάνω. Ο Douglas μέτρησε μαθηματικά αυτό το φαινόμενο και έδειξε ότι μια αντιστρεπτή ροή μπορεί να αναμένεται όταν η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι τουλάχιστον το 10% του θεωρητικού σημείου θραύσης του γυαλιού. Εφόσον το σημείο θραύσης του εμπορικού γυαλιού είναι συνήθως μόνο το 1/100 του θεωρητικού, αποδεικνύεται ότι η ρευστότητα πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μόνο κάτω από εξαιρετικές περιστάσεις.

### **Καταπονήσεις από ψύξη**

Όταν ένα πρόσφατα κατασκευασμένο φύλλο γυαλιού (τζάμι) ψύχεται απότομα, η εξωτερική επιφάνεια σκληραίνει αρκετά, πριν η εσωτερική του ψυχθεί και συσταλεί. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του τζαμιού, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του βαθμού ψύξης μεταξύ των δύο επιφανειών. Η εσωτερική συστολή συμπιέζει τις επιφάνειες και το εσωτερικό με εφελκυσμό, με αποτέλεσμα να προκύπτει μία σταθερή κατάσταση.



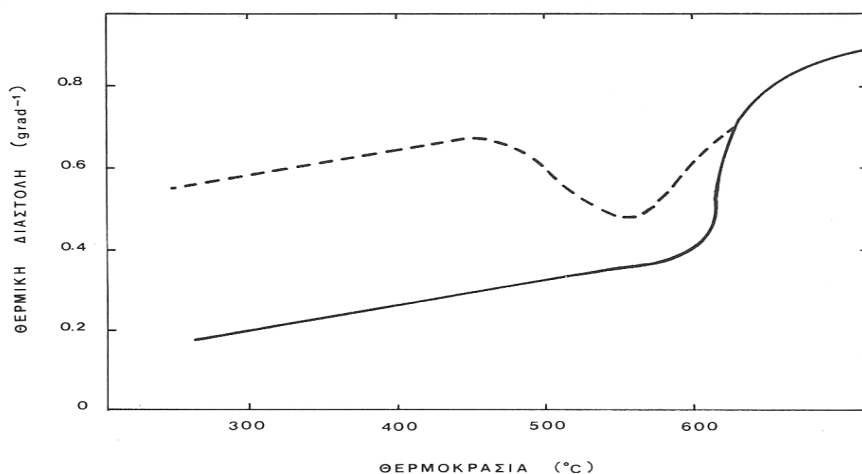
Επομένως, αν το γυαλί ψύχεται σταδιακά κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες στερεοποίησης, θα αναπτυχθούν εσωτερικές καταπονήσεις που μπορούν να προκαλέσουν απότομα σπάσιμο του γυαλιού.

### Θερμική διαστολή

Τα περισσότερα υλικά διαστέλλονται όταν θερμαίνονται και συστέλλονται όταν ψύχονται. Για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών η μεταβολή του όγκου που ορίζεται ως συντελεστής κυβικής διαστολής (CVE), είναι κανονική. Όμως, για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιείται ο συντελεστής γραμμικής διαστολής, δηλ. η αύξηση του μήκους του υλικού ανά μονάδα μήκους, όταν αυξάνει η θερμοκρασία κατά  $1^{\circ}\text{C}$ . Οι τιμές των συντελεστών γραμμικής διαστολής των γυαλιών είναι της τάξης από 5.0 μέχρι  $10 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$ .

Η τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής ενός συγκεκριμένου γυαλιού μπορεί να μετρηθεί με διάφορες τεχνικές ή να υπολογισθεί από την χημική του σύνθεση ανάλογα με τον συντελεστή γραμμικής διαστολής των συστατικών που αποτελούν το γυαλί.

### Μεταβατικό σημείο ή οριακή θερμοκρασία



*Καμπύλη θερμικής διαστολής ενός δείγματος γυαλιού που έχει ψυχθεί (α) και δείγματος ίδιου γυαλιού που έχει θερμανθεί (β)*

Η διαστολή των γυαλιών θα πρέπει να μελετάται μέσα από την καμπύλη θερμικής διαστολής, μέχρι μια θερμοκρασία της τάξης των 700°C που εξαρτάται από την σύσταση του γυαλιού. Το σχήμα παριστάνει την καμπύλη θερμικής διαστολής (καμπύλη Β) ενός γυαλιού που έχει θερμανθεί η οποία έχει μια αρκετά σταθερή κλίση μέχρι τη θερμοκρασία των 580°C και στην συνέχεια μια σχετικά απότομη αύξηση εξαιτίας της αύξησης του συντελεστή διαστολής. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό, με αποτέλεσμα τα μόρια να έχουν αρκετή ενέργεια που καθιστά την κατανομή τους περισσότερο τυχαία. Αυτό όμως προϋποθέτει υψηλό συντελεστή διαστολής που προσομοιάζεται περισσότερο με τα υγρά παρά με τα στερεά.

### **Οπτικές ιδιότητες**

Το κοινό γυαλί, επιτρέπει τη διάδοση του μήκους κύματος του ορατού φωτός διαμέσου του υλικού, καθώς επίσης τη διάδοση του μήκους κύματος της υπεριώδους και της υπέρυθρης ακτινοβολίας, δηλ. είναι διαφανές. Το γυαλί είναι αδιαφανές στο υπεριώδες και υπέρυθρο όταν οι συχνότητες των ακτινοβολιών που προσπίπτουν σε αυτό βρίσκονται σε συντονισμό με τις συχνότητες των μοριακών ταλαντώσεων στη μάζα του γυαλιού, οπότε και απορροφούνται από το γυαλί.

Όμως, η παρουσία στο γυαλί προσμίξεων, όπως μικρές ποσότητες οξειδίου του σιδήρου, μπορεί να προκαλέσουν επίσης απορρόφηση των μηκών κύματος στο ορατό, έτσι ώστε το γυαλί να φαίνεται με κάποια απόχρωση ή σχεδόν αδιαφανές. Βέβαια, το γυαλί θεωρείται διαφανές ακόμη κι αν είναι χρωματισμένο.

Επομένως, το φως μπορεί να διέρχεται διαμέσου του γυαλιού, όταν αυτό είναι διαφανές. Αυτή είναι μια ιδιότητα η οποία καθιστά το γυαλί χρήσιμο για τα παράθυρα. Επίσης, όταν καθαρίζεται και επαργυρώνεται στην πίσω επιφάνεια χρησιμοποιείται και σαν καθρέφτης. Το γυαλί ανακλά το φως, δηλ. του αλλάζει διεύθυνση όταν αυτό προσπίπτει στην επιφάνειά του.

Ο δείκτης σκέδασης ενός διαφανούς υλικού, είναι το μέτρο του βαθμού με τον οποίο ο δείκτης διάθλασης (R.I.) αλλάζει ανάλογα με το μήκος κύματος. Προσδιορίζει τη γωνία του φάσματος από το πρίσμα του εξεταζόμενου υλικού. Αν η σύσταση του γυαλιού είναι γνωστή, ο δείκτης σκέδασης μπορεί να υπολογιστεί. Η σκέδαση είναι ανάλογη του δείκτη διάθλασης.

### **Πυκνότητα**

Η πυκνότητα, δηλ. η μάζα ανά μονάδα όγκου των γυαλιών, η οποία μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 2400-5900 kg/m<sup>3</sup>, εξαρτάται από τη σύστασή τους.

Η πυκνότητα του γυαλιού σε τήξη προσδιορίζεται με το ζύγισμα ενός δείγματος από λευκόχρυσο στον αέρα και μέσα στο τήγμα. Κατά τη διαδικασία αυτή προκύπτουν διάφορα σφάλματα που οφείλονται στην προσκόλληση των φυσαλίδων αερίων επάνω στο δείγμα. Διαφορετικά είναι δυνατό να προσδιορισθεί απευθείας ο όγκος του τήγματος ή σε περιπτώσεις γυαλιών υψηλής πυκνότητας να ζυγιστεί το τήγμα μέσα σε ένα δοχείο από λευκόχρυσο σε τήγμα αλάτων, π.χ. NaCl.

Σχετικά με τη μεταβολή της πυκνότητας του γυαλιού, αυτή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η συνάρτηση της πυκνότητας με την θερμοκρασία ( $\rho_T$ ), μεταξύ της θερμοκρασίας τήξης (T) και των 1400°C, δίνεται από την εξίσωση :

$$\rho_T = \rho_{1400} / [1 + \beta(T - 1400)]$$

όπου:

$\beta$ : ο συντελεστής θερμικής κυβικής διαστολής

### Σκληρότητα σε εγχάραξη

Η ιδιότητα της σκληρότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια επειδή εξαρτάται από μερικές άλλες ιδιότητες ανάλογα με την φύση του υλικού που εξετάζεται. Για παράδειγμα αν είναι εύθραυστο, πλαστικό, ελαστικό κτλ. Η κλίμακα σκληρότητας Mohs βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε ορυκτό στη λίστα είναι λιγότερο σκληρό, δηλ. χαράσσεται, απ' όλα τα προηγούμενά του στην κλίμακα.

Τα γυαλιά, ανάλογα με την σύνθεσή τους, καταλαμβάνουν θέσεις μεταξύ 4.5 και 6.5 της κλίμακας Mohs.

Ορυκτό	Κλίμακα Mohs
Τάλκης	1
Γύψος	2
Ασβεστίτης	3
Φθορίτης	4
Απατίτης	5
Ορθόκλαστο	6
Χαλαζίας	7
Τοπάζιο	8
Κορούνδιο	9
Διαμάντι	10

Ο όρος «σκληρότητα» χρησιμοποιείται επίσης συχνά για να περιγράψει διάφορες ιδιότητες που σχετίζονται με το γυαλί. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει γυαλιά τα οποία δύσκολα κόβονται σε τροχό, λειαίνονται ή χαράσσονται. Άλλες ποιότητες γυαλιού που χαρακτηρίζονται σαν γυαλιά με μεγάλη σκληρότητα είναι εκείνα τα οποία αντέχουν στις φθορές και εκείνα που δεν μπορούν να χρωματιστούν ικανοποιητικά με άργυρο.

### **Ευθραυστότητα**

Το γυαλί δεν παρουσιάζει ελαστικότητα και απορροφά ενέργεια όταν δονείται. Με την ελαφρά κρούση μιας γυάλινης επιφάνειας, τα τοιχώματά της πάλλονται παράγοντας ήχους. Οι παλμικές δονήσεις αποσβένονται επειδή έχουμε απορρόφηση ενέργειας παράγοντας τριβή λόγω εσωτερικών κρούσεων.

Είναι γνωστό, ότι το γυαλί θραύεται εύκολα, παρόλο που όταν κατασκευάζεται είναι πολύ ισχυρό, γύρω στις πέντε φορές πιο ισχυρό από το ασάλι, εξαιτίας της φύσης των ενδοατομικών δεσμών. Στην πράξη, η παρουσία επιφανειακών ατελειών, όπως εκείνες που προέρχονται από χημική διάβρωση ή μηχανικές καταπονήσεις, οδηγεί στη συγκέντρωση όλων των εφαρμοζόμενων πιέσεων στα ενεργά κέντρα του υλικού. Κάτω από τις πιέσεις αυτές, οι ισχυροί δεσμοί σπάνε με αποτέλεσμα τη θραύση. Όταν η θραύση αρχίσει, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εξαπλωθεί σε ολόκληρη την επιφάνεια του γυαλιού γιατί δεν υπάρχουν εσωτερικά χαρακτηριστικά όρια να την περιορίσουν.

### **Επιφανειακή αγωγιμότητα**

Η αντίσταση της επιφάνειας ενός καθαρού γυαλιού στον ξηρό αέρα είναι πολύ υψηλή. Σύμφωνα με τον Geddes δεν βρέθηκε αξιοσημείωτη διαρροή από την επιφάνεια σπασμένου γυαλιού στον καθαρό ξηρό αέρα. Από την στιγμή που αυτά τα αποτελέσματα βρίσκονται στο όριο των αξιόπιστων μετρήσεων για την αντίσταση, συμπεραίνεται ότι η ενυπάρχουσα επιφανειακή αντίσταση του ξηρού γυαλιού είναι αβέβαιη.

Η αντίσταση των επιφανειών των περισσότερων γυαλιών μειώνεται ραγδαία όταν η σχετική υγρασία σε θερμοκρασία δωματίου αυξάνεται πάνω από 40%. Ωστόσο, η επιφανειακή αντίσταση γυαλιού από λιωμένο διοξείδιο του πυριτίου που

καθαρίζεται σε χρωμικό οξύ και έπειτα σε αποσταγμένο νερό παραμένει υψηλή ακόμη και σε αρκετά υψηλή σχετική υγρασία.

Αυτές οι πειραματικές παρατηρήσεις μπορούν να επεξηγηθούν με τον παρακάτω τρόπο. Η ενυπάρχουσα επιφανειακή αντίσταση του γυαλιού είναι πολύ υψηλή. Αν υπάρξει κάποια ιοντική μόλυνση της επιφάνειας, μπορεί να διεξαχθεί προσωρινά στον υγρό αέρα από την στιγμή που το φυσικά προσροφημένο νερό αντιδρά με αυτές τις προσμίξεις ώστε να παρέχει κινητά ιόντα. Τα γυαλιά που περιέχουν μονοσθενή κατιόντα μπορούν να αντιδρούν με το νερό μέσω ιοντικής ανταλλαγής σχηματίζοντας μεταλλικά υδροξείδια στις επιφάνειές τους. Αυτά τα υδροξείδια αντιδρούν περαιτέρω με το νερό σχηματίζοντας κινητά ιόντα στην επιφάνεια. Σε κάποιες περιπτώσεις, τα υδροξείδια απορροφούν τόσο πολύ νερό ώστε δημιουργείται υγρό διάλυμα στην γυάλινη επιφάνεια δίνοντας μία υψηλής αγωγιμότητας επιφάνεια. Αυτή η πιθανότητα αναγνωρίστηκε πρώτα από τον Faraday στην μελέτη του για τις ηλεκτρικές ιδιότητες του γυαλιού.

Τέλος, το σημείο στο οποίο το γυαλί γίνεται ρευστό και μπορεί να χυτευθεί (σημείο τήξεως) είναι στους 1500°C, ενώ το σημείο μαλακώματος δηλαδή το σημείο στο οποίο το γυαλί μαλακώνει και μπορεί να διαμορφωθεί π.χ. με καλούπια είναι στους 600°C. Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού σε σχέση με τον αέρα είναι 1,5.

## **ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

### **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 70.000 N/mm<sup>2</sup> και βαθμό δυσκαμψίας 29.166N/mm<sup>2</sup>.

### **Αντοχή στον εφελκυσμό**

Όταν κάμπτεται ένας υαλοπίνακας, έχει την μία του πλευρά υπό σύνθλιψη (την εσωτερική) και την άλλη (την εξωτερική) υπό εφελκυσμό. Αν και η αντίσταση του γυαλιού στην σύνθλιψη (συμπίεση) 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 «ψημένο» γυαλί, ανάλογα με το πάχος του, το τρόχισμα, τις τρύπες, εγκοπές κλπ.

### **Αντοχή στην σύνθλιψη**

Η αντοχή στην σύνθλιψη του γυαλιού είναι εξαιρετικά υψηλή: 1.000 Newton/mm<sup>2</sup> ή 1.000 MPa. Αυτό σημαίνει ότι για τον θρυμματισμό ενός κύβου γυαλιού ενός εκατοστού (1cm), χρειάζεται ένα βάρος 10 τόνων περίπου.

## **ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

### **Ορισμός του U-Value**

Σημαντικό δείκτη της θερμομονωτικής ικανότητας ενός υαλοπίνακα αποτελεί η θερμοπερατότητα (U-Value ή συντελεστής K ). Ο συντελεστής θερμοπερατότητας χαρακτηρίζει την θερμότητα που περνάει μέσα από ένα γυαλί λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στις δύο του πλευρές και δηλώνει τον ρυθμό απώλειας της θερμότητας σε σχέση με την επιφάνεια του γυαλιού και την διαφορά θερμοκρασίας. Η μονάδα μέτρησης είναι Watt ανά τετραγωνικό μέτρο και ανά βαθμό Kelvin [ W/m<sup>2</sup>K ]. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός μονού υαλοπίνακα 4mm είναι:  $U = 5,8W/(m^2K)$

Η θερμοαγωγιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει την διάδοση της θερμότητας (με αγωγή/επαφή). Η θερμοαγωγιμότητα ( $\lambda$ ) του γυαλιού είναι μικρή ( $\lambda=1,1 W/(mK)$  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 (θερμικό σοκ). Το φαινόμενο εμφανίζεται κατά κανόνα σε έγχρωμους υαλοπίνακες με μεγάλη θερμοχωρητικότητα.

### **Φωτομετρικές ιδιότητες του γυαλιού**

Ένα μέρος του ορατού ηλιακού φωτός διαπερνά το γυαλί, ένα μέρος ανακλάται και ένα μέρος απορροφάται. Η διαπερατότητα και η αντανάκλαση του ηλιακού φωτός αποτελούν δύο πολύ σημαντικές φωτομετρικές ιδιότητες του γυαλιού. Η φωτοπερατότητα του γυαλιού κυμαίνεται γύρω στο 0,90 ( δηλ. ένας μονός διάφανος υαλοπίνακας πάχους 4mm επιτρέπει στο 90% του φωτός να εισέλθει).

### **Ενεργειακές ιδιότητες του γυαλιού**

Από την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε ένα υαλοπίνακα ένα μέρος διαπερνά το γυαλί προς τον εσωτερικό χώρο (διαπερατότητα άμεσης ενέργειας  $Q_{in}$ ) και ένα μέρος αντανακλάται προς τον εξωτερικό χώρο (αντανάκλαση άμεσης ενέργειας  $Q_{out}$ ). Επιπλέον, το γυαλί εκπέμπει ένα ποσό έμμεσης θερμότητας προς το εσωτερικό ( $q_{in}$ ) και προς το εξωτερικό ( $q_{out}$ ). Η έμμεση θερμότητα προέρχεται από την επανεκπομπή της θερμότητας που έχει απορροφήσει το γυαλί. Προφανώς, το άθροισμα των  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ,  $q_{in}$ ,  $q_{out}$  ισούται με την συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΓΥΑΛΙ**

Η μηχανική συμπεριφορά του γυαλιού είναι πολύ σημαντική για την επιλογή του τρόπου διαμόρφωσής του σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι μηχανικές δοκιμές ή δοκιμασίες του γυαλιού έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών του ιδιοτήτων και αποτελούν τις καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσοι μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν βασικά οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του γυαλιού. Τέτοιες δοκιμές είναι η δοκιμή σκληρότητας και η δοκιμή κρούσης.

### **ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ**

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Θα μπορούσε μαθηματικά η σκληρότητα να εκφρασθεί ως εξής :

$$H = P/A \quad (1)$$

Όπου

P : η εφαρμοζόμενη δύναμη και

A : η επιφάνεια του αποτυπώματος

Το σώμα αυτό που επιχειρεί να διεισδύσει στο προς εξέταση υλικό ονομάζεται διεισδυτής ή εντυπωτής. Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος, που δημιουργεί ο διεισδυτής στο υλικό. Αν το αποτύπωμα αυτό είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διείσδυση και επομένως είναι σκληρό, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό αντιστέκεται λιγότερο και επομένως είναι λιγότερο σκληρό. Στο γυαλί ο έλεγχος της σκληρότητας γίνεται με την μέθοδο Κνοορ.

Η μέθοδος σκληρότητας κατά Κνοορ (HK) αναπτύχθηκε από τον Frederick Κνοορ και έπειτα από το Εθνικό Γραφείο Προτύπων (νυν NIST), το 1939. Ο χρησιμοποιούμενος «εισβολέας» είναι ένα πυραμιδοειδές διαμάντι. Η δοκιμή Κνοορ πραγματοποιείται κυρίως για φάσμα δυνάμεων από 10g σε 1000g, έτσι, ένα υψηλής απόδοσης μικροσκόπιο είναι αναγκαίο για τις μετρήσεις σε κάθε

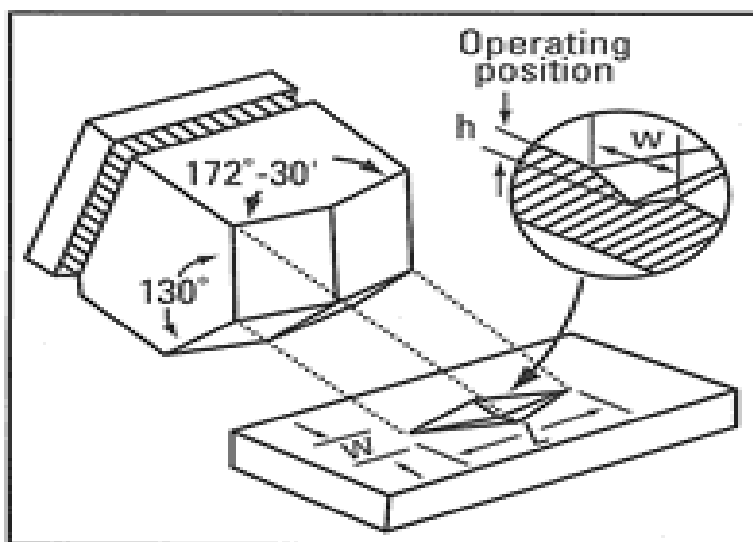


περίπτωση. Οι μεγεθύνσεις που απαιτούνται για τη μέτρηση Κνοορ κατά περίπτωση απαιτούν μια πολύ γυαλισμένη επιφάνεια δοκιμής.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για πολύ εύθραυστα υλικά ή σε λεπτά φύλλα, όπου μόνο ένα μικρό δείγμα μπορεί να αξιοποιηθεί για τη διεξαγωγή δοκιμών.

Η μέθοδος Κνοορ είναι σχεδόν πάντα μια καταστροφική δοκιμή. Ωστόσο, λόγω του ευρέος φάσματος της δύναμης δοκιμής, η δοκιμή Κνοορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε υλικό.

Η μέθοδος δοκιμής Κνοορ ορίζεται από το πρότυπο ASTM D1474.



Το πυραμιδοειδές διαμάντι ωθείται στη γυαλισμένη επιφάνεια του υλικού δοκιμής με γνωστή δύναμη. Η δύναμη διατηρείται για ένα συγκεκριμένο χρόνο παραμονής, συνήθως 10 με 15 s. Μετά από το χρόνο παραμονής, ο «εισβολέας» αφαιρείται αφήνοντας ένα επίμηκες σχήμα στο δείγμα και η προκύπτουσα εσοχή μετρείται με τη χρήση μικροσκοπίου. Η γεωμετρία του «εισβολέα» είναι μια πυραμίδα με αναλογία μήκους και πλάτους 7:01 και με αντίστοιχες γωνίες 172 μοίρες για τη μεγάλη ακμή και 130 μοίρες για την μικρή πλευρά. Το βάθος της εσοχής μπορεί να προσεγγισθεί ως το 1 / 30 της μεγάλης διάστασης. Η σκληρότητα *HK* ή *KHN* δίνεται κατόπιν με τον τύπο:

$$HK = \text{load (kg.f)} / \text{impression area (mm}^2) = P / C_p \cdot L^2$$

όπου:

$L$  = μήκος της εσοχής κατά μήκος του άξονα της μακριάς πλευράς  
 $C_p$  = ο διορθωτικός συντελεστής σχετίζεται με το σχήμα του «εισβολέα» και των μονάδων της δύναμης, ιδανικά 0.070279  
 $P$  = φορτίο

HK τιμές είναι συνήθως στο εύρος 100 - 1000, όταν προσδιορίζονται σε συμβατικές μονάδες  $\text{kg mm}^{-2}$ . Η μονάδα στο SI, Pascal , μερικές φορές χρησιμοποιείται αντί αυτού, όπου  $1 \text{ kg mm}^{-2} = 9,80665 \text{ MPa}$ .

Μια χαρακτηριστική σκληρότητα Knoop ορίζεται ως 450HK0.5, όπου 450 είναι η υπολογιζόμενη σκληρότητα και 0,5 είναι η δύναμη δοκιμής σε kg.

Τα πλεονεκτήματα του τεστ είναι ότι μόνο ένα πολύ μικρό δείγμα του υλικού χρησιμοποιείται, και ότι ισχύει για ένα ευρύ φάσμα των δυνάμεων της δοκιμής. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι η δυσκολία με τη χρήση μικροσκοπίου για τη μέτρηση της οδόντωσης (με ακρίβεια 0,5  $\mu\text{m}$ ), κάτι που προϋποθέτει τα δοκίμια να είναι γυαλισμένα αρκετά καλά ώστε να γίνει μια ακριβής μέτρηση καθώς και το χρόνο που απαιτείται για την προετοιμασία του δείγματος ώστε να εφαρμοστεί ο «εισβολέας».

Ανάλογα με το ποσόν ενέργειας, που δαπανάται κατά τη θραύση τα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε όλκιμα και ψαθυρά υλικά. Το γυαλί κατατάσσεται στην κατηγορία των ψαθυρών υλικών.

Τα ψαθυρά (ή εύθραυστα) υλικά απορροφούν μικρά ποσά ενέργειας (< 40-50 J) κατά την κρούση, χαρακτηρίζονται δηλαδή από μικρή σχετικά δυσθραυστότητα . Σε αντίθεση με τα όλκιμα υλικά, τα ψαθυρά υλικά σπάζουν απότομα χωρίς καμία προειδοποίηση (δηλαδή χωρίς να έχει προηγηθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση) και παρουσιάζουν μεγάλη, συνήθως, σκληρότητα. Γι' αυτό το λόγο δε διαμορφώνονται εν ψυχρώ. Οι επιφάνειες θραύσης ενός ψαθυρού υλικού, μετά από δοκιμή εφελκυσμού, δεν παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση, ενώ, μικροσκοπικά, χαρακτηρίζονται από κοκκώδη μορφολογία. Η τιμή της δυσθραυστότητας των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική σύσταση και την κρυσταλλική δομή του υλικού, αλλά και από την θερμοκρασία.

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ

### ΕΛΟΤ EN 12600

#### Απαιτήσεις της Δοκιμής

Κατά την δοκιμή της μεθόδου αυτής κάθε δοκίμιο πρέπει είτε να μην σπάσει είτε να σπάσει σύμφωνα με τους παρακάτω δύο τρόπους.

A) να εμφανιστούν πολυάριθμες ρωγμές αλλά όχι διάτμηση ή άνοιγμα μέσα στο δοκίμιο όταν μία σφαίρα διαμέτρου 76 mm μπορεί να περάσει με την εφαρμογή της μέγιστης δύναμης των 25 N. Επιπλέον, αν τμήματα του δοκιμίου αποσυνδεθούν μέχρι και 3 λεπτά μετά τον κτύπο, θα πρέπει αυτά να ζυγίζουν συνολικά όχι παραπάνω από το ισοδύναμο μάζας των 10.000 mm<sup>2</sup> του αρχικού δοκιμίου. Το μεγαλύτερο αποσπώμενο τμήμα πρέπει να ζυγίζει λιγότερο από το ισοδύναμο μάζας των 4.400 mm<sup>2</sup> του αρχικού δοκιμίου.

B) όταν η αποσύνθεση εμφανιστεί και τα 10 μεγαλύτερα τμήματα του δοκιμίου συλλεχθούν μέχρι και 3 λεπτά μετά τον κτύπο και ζυγιστούν όλα μαζί μέσα σε 5 λεπτά από τον κτύπο δεν πρέπει να ζυγίζουν παραπάνω από το ισοδύναμο μάζας των 6.500 mm<sup>2</sup> του αρχικού δοκιμίου. Τα τμήματα αυτά πρέπει να διαλεχτούν αποκλειστικά από το αρχικό δοκίμιο το οποίο ελέγχτηκε στο πλαίσιο της δοκιμής. Μόνο τα τμήματα που διατηρήθηκαν από την εκτιθέμενη περιοχή στο πλαίσιο της δοκιμής πρέπει να ληφθούν υπόψη στον καθορισμό του ισοδύναμου μάζας.

#### Μέθοδος της Δοκιμής

Οι συσκευές δοκιμής περιλαμβάνουν ένα σταθερό κύριο πλαίσιο, ένα πλαίσιο στερέωσης το οποίο εγκαθίσταται πάνω στο κύριο πλαίσιο και χρησιμοποιείται ώστε να κρατά το δοκίμιο στην θέση του κατά την διάρκεια της δοκιμής και ένα διπλό ελαστικό κρουστήρα με συσκευή ανάρτησης και μηχανισμό απελευθέρωσης.

- Κύριο πλαίσιο

Το κύριο πλαίσιο πρέπει να κατασκευάζεται από στενά ενωμένα τμήματα θερμής έλασης με στρογγυλεμένες άκρες σχεδιασμένο για να παρουσιάσει μια άκαμπτη και επίπεδη επιφάνεια στο υπο—πλαίσιο. Τα χαμηλότερα διαγώνια μέλη θα τοποθετηθούν με ασφάλεια σε ένα τσιμεντένιο πάτωμα. Το κύριο πλαίσιο έχει εσωτερικό πλάτος (847±5) mm και εσωτερικό ύψος (1910±5) mm.

- Πλαίσιο στερέωσης

Το πλαίσιο στερέωσης χρησιμοποιείται ώστε να κρατά το δοκίμιο στην συσκευή δοκιμής και περιλαμβάνει δύο ορθογώνια τμήματα τα οποία στερεώνουν το δοκίμιο κατά μήκος της περιμέτρου του. Το εσωτερικό μέρος του πλαισίου στερέωσης είναι συνημμένο με το κύριο πλαίσιο μέσω μιας συσκευής στερέωσης. Το πλαίσιο στερέωσης πρέπει να είναι κατάλληλα άκαμπτο ώστε να αντιστέκεται στην πίεση που ασκείται από την συσκευή στερέωσης.

Το πλαίσιο στερέωσης πρέπει να έχει εσωτερικό πλάτος  $(847\pm 5)$  mm εσωτερικό ύψος  $(1910\pm 5)$  mm.

Κάθε τμήμα του πλαισίου στερέωσης πρέπει να τοποθετείται με μια λωρίδα από λάστιχο. Οι λαστιχένιες λωρίδες πρέπει να είναι τα μόνα στοιχεία σε επαφή με το δοκίμιο και πρέπει να είναι  $(20\pm 2)$  mm σε εύρος και  $(10\pm 1)$  mm σε πάχος και να έχουν μία σκληρότητα των  $(60\pm 5)$  IRHD σύμφωνα με το ISO 48.

- Κρουστήρας

Ο κρουστήρας αποτελείται από δύο πεπιεσμένου αέρα ελαστικά ,Tyre 3.50-R8 4PR (κατασκευασμένα από τον Vredestein τα οποία χρησιμοποιούνται για την δοκιμή του εκκρεμούς ) σύμφωνα με τον ISO 4251-1, με στρογγυλό τμήμα και επίπεδο διαμήκες πέλμα. Τα ελαστικά πρέπει να τοποθετηθούν στις ζάντες των ροδών οι οποίες φέρουν δύο σταθμά χάλυβα ίσης μάζας. Τα σταθμά πρέπει να διαστασιολογούνται ώστε η συνολική μάζα του κρουστήρα να ισούται με  $(50\pm 0.1)$  Kg.

- Σύστημα ανάρτησης

Ο κρουστήρας πρέπει να αναρτάται με την βοήθεια ενός συρματόσχοινου διαμέτρου 5mm σύμφωνα με τον ISO 2408 από ένα υποστήριγμα που επισυνάπτεται πιο πάνω από την κεφαλή του κύριου πλαισίου. Το υποστήριγμα πρέπει να είναι άκαμπτο ώστε να διασφαλιστεί ότι το σημείο ανάρτησης παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια της δοκιμής και πρέπει να τοποθετείται ώστε να επιτρέπει στον κρουστήρα να χτυπήσει στο κέντρο του δοκιμίου. Στο υψηλότερο ύψος πτώσης η γωνία μεταξύ του καλωδίου ανάρτησης και του υποστηρίγματος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από  $14^\circ$  από την οριζόντιο.

Όταν ο κρουστήρας κρέμεται ελεύθερα, σε κατάσταση ηρεμίας , η απόσταση μεταξύ των πλήρως φουσκωμένων ελαστικών και της επιφάνειας του δοκιμίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15mm και δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 5mm και ο κεντρικός άξονας του κρουστήρα πρέπει να είναι εντός 50mm ακτινωτά από το κέντρο του δοκιμίου.

- Μηχανισμός απελευθέρωσης

Ο μηχανισμός απελευθέρωσης επιτρέπει στον κρουστήρα να ανυψωθεί και να τοποθετηθεί σε καθένα συγκεκριμένο ύψος πτώσης και έπειτα να απελευθερωθεί ώστε αυτός να ταλαντεύεται ελεύθερα και να προσκρούσει στο δοκίμιο. Το καλώδιο απελευθέρωσης πρέπει να ενώνεται στα άνω και κάτω άκρα του κρουστήρα με κατάλληλες συνδέσεις ώστε η ανυψωτική δύναμη να εφαρμόζεται σε ορθή γωνία προς τον άξονα του κρουστήρα. Ο μηχανισμός απελευθέρωσης πρέπει να διασφαλίζει ότι το καλώδιο απελευθέρωσης διατηρείται στον σωστό προσανατολισμό σε καθένα από τα ύψη πτώσης.

- Βαθμονόμηση

Η συσκευή της μεθόδου πρέπει να βαθμονομείται έτσι ώστε να διασφαλίζει ότι η ενέργεια που μεταφέρεται στο δοκίμιο από τον κρουστήρα κατά την διάρκεια της δοκιμής, που διενεργείται από διαφορετική συσκευή, είναι συνεπής.

### **Δοκίμια**

Κάθε δοκίμιο πρέπει να περιλαμβάνει ένα ενιαίο παράθυρο από το προϊόν του γυαλιού και να είναι αντιπροσωπευτικό της κανονικής παραγωγής του τύπου του προϊόντος που υποβάλλεται για δοκιμή. Τα δοκίμια πρέπει να έχουν πλάτος  $(876\pm 2)$ mm και ύψος  $(1938\pm 2)$ mm. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από δοκίμια αυτών των διαστάσεων είναι έγκυρα για λόγους ταξινόμησης του προϊόντος του γυαλιού.

Η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί σε κάθε ύψος πτώσης σε τέσσερα κομμάτια πανομοιότυπης δομής και με το ίδιο ονομαστικό πάχος. Αν τα δοκίμια είναι από ασύμμετρο υλικό ο αριθμός τους πρέπει να διπλασιαστεί εκτός αν προορίζονται αποκλειστικά για εγκατάσταση με κίνδυνο πρόσκρουσης από την μία πλευρά μόνο.

Για την προετοιμασία τους πρέπει να αφαιρεθεί όλο το υλικό κάλυψης και προστασίας από τα δοκίμια και να παραμείνουν για τουλάχιστον 12 ώρες στην θερμοκρασία των  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ .

### **Διαδικασία της κρούσης**

Η δοκιμή πρέπει να ξεκινήσει από το χαμηλότερο ύψος πτώσης και να αυξηθεί έως το ύψος πτώσης που είναι κατάλληλο για την κατηγορία για την οποία προορίζεται το υλικό. Η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί στην θερμοκρασία των  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ .

Κάθε δοκίμιο τοποθετείται στο πλαίσιο στερέωσης έτσι ώστε οι άκρες του να είναι εγκιβωτισμένες στο λάστιχο στο ελάχιστο βάθος των 10mm. Όταν αυτό αγκυρωθεί, το λάστιχο πρέπει να συμπιεσθεί αλλά όχι παραπάνω από το 20% του πάχους του.

Τα λάστιχα του κρουστήρα πρέπει να φουσκώσουν μέχρι την πίεση των  $(0.35 \pm 0.02)$ MPa. Η πίεση πρέπει να ελέγχεται πριν από κάθε ύψος πτώσης.

Ο κρουστήρας ανυψώνεται στο χαμηλότερο ύψος πτώσης και σταθεροποιείται. Σε αυτό το ύψος πτώσης το καλώδιο ανάρτησης πρέπει να είναι τεντωμένο και ο άξονας του κρουστήρα με το καλώδιο πρέπει να είναι στην ίδια ευθεία.

### ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ

<u>ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ</u>	<u>ΥΨΟΣ ΠΤΩΣΗΣ (mm)</u>
3	190
2	450
1	1200

Ο κρουστήρας απελευθερώνεται έτσι ώστε να πέσει με μία ταλαντευόμενη κίνηση και χωρίς αρχική ταχύτητα. Η κατεύθυνση του κρουστήρα στο κέντρο του δοκιμίου πρέπει να είναι κάθετη στην επιφάνειά του. Αν ο κρουστήρας προσκρούσει στο δοκίμιο παραπάνω από μία φορά τότε η δοκιμή πρέπει να θεωρηθεί ως μη έγκυρη. Τα σταθμά δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης.

Για ασύμμετρα υλικά τα οποία προορίζονται για εγκατάσταση όπου ο κίνδυνος πρόσκρουσης είναι και από τις δύο πλευρές, η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί και από τις δύο πλευρές.

Για ασύμμετρα υλικά όπου απαιτείται ταξινόμηση για την μία τους πλευρά μόνο τότε η δοκιμή θα διεξαχθεί μόνο για αυτή την πλευρά σχεδιασμού.

Μετά την δοκιμή το δοκίμιο επιθεωρείται και σημειώνεται αν παραμένει αδιάσπαστο, ή έσπασε σύμφωνα με τις απαιτήσεις Α) ή Β) που προαναφέρθηκαν, ή έσπασε και δεν ανταποκρίθηκε σε αυτές τις απαιτήσεις.

Αν κανένα από τα τέσσερα αρχικά δοκίμια δεν ανταποκρίνεται σε αυτές τις απαιτήσεις τότε η διαδικασία ολοκληρώνεται. Αν και τα τέσσερα δοκίμια είτε δεν σπάσουν είτε σπάσουν σύμφωνα με τα δοσμένα κριτήρια και απαιτείται να εξεταστεί το υλικό σε υψηλότερο επίπεδο κρούσης τότε η διαδικασία συνεχίζεται

για το αμέσως υψηλότερο ύψος πτώσης. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται σε τέσσερα επιπλέον δείγματα του ίδιου υλικού.

### **Ταξινόμηση**

Οι υαλοπίνακες σύμφωνα με αυτό το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ταξινομούνται ανάλογα με την απόδοσή τους υπό την δοκιμή της κρούσης, το ύψος πτώσης στο οποίο συνέβη η θραύση, το ύψος πτώσης στο οποίο το προϊόν πέρασε με βάση τις απαιτήσεις A), το ύψος πτώσης στο οποίο το προϊόν πέρασε με βάση τις απαιτήσεις B), την λειτουργία του υλικού αν παραμείνει αδιάσπαστο μετά την δοκιμή της κρούσης.

### **Ταξινόμηση του ύψους πτώσης**

Class 3: υλικό το οποίο είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις A) ή B) όταν ελέγχθηκε με αυτή την μέθοδο στο ύψος πτώσης των 190mm

Class 2: υλικό το οποίο είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις A) ή B) όταν ελέγχθηκε με αυτή την μέθοδο στο ύψος πτώσης των 190mm και 450mm

Class 1: υλικό το οποίο είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις A) ή B) όταν ελέγχθηκε με αυτή την μέθοδο στο ύψος πτώσης των 190mm και 450mm και 1200mm

### **Τύπος θραύσης**

Αν όλα τα δοκίμια παραμένουν αδιάσπαστα στο ύψος πτώσης το οποίο είναι κατάλληλο για την τάξη, που αναφέρθηκε προηγουμένως, στην οποία προορίζεται το υλικό, ο τύπος της θραύσης περιγράφεται όπως παρακάτω :

TYPE A: πολλαπλές σχισμές εμφανίζονται που αποτελούν χωριστά θραύσματα με αιχμηρές άκρες, μερικά από τα οποία είναι μεγάλα, τυπικό είδος θραύσης για γυαλί που έχει υποστεί ανόπτηση

TYPE B: πολλαπλές σχισμές εμφανίζονται αλλά τα θραύσματα είναι ενωμένα μεταξύ τους και δεν χωρίζονται, τυπικό είδος θραύσης για πολυστρωματικό γυαλί

TYPE C: εμφανίζεται διάσπαση που οδηγεί σε ένα μεγάλο αριθμό από μικρά τμήματα τα οποία είναι σχετικά αβλαβή, τυπικό είδος θραύσης για σκληρυμένο γυαλί

### **Κατηγοριοποίηση της απόδοσης**

Η κατηγοριοποίηση της απόδοσης ενός γυάλινου προϊόντος πρέπει να δίνεται με την παρακάτω μορφή :

$\alpha$  ( $\beta$ )  $\Phi$

όπου:

$\alpha$ : είναι η υψηλότερη βαθμίδα ύψους πτώσης στην οποία το προϊόν είτε δεν έσπασε είτε έσπασε σύμφωνα με τις απαιτήσεις A) ή B)

$\beta$ : είναι ο τύπος της θραύσης

$\Phi$ : η υψηλότερη βαθμίδα ύψους πτώσης στην οποία το προϊόν είτε δεν έσπασε είτε όταν έσπασε ,έσπασε σύμφωνα με τις απαιτήσεις A)

Όταν ένα γυάλινο προϊόν σπάει στο ύψος πτώσης των 190mm και η θραύση δεν είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις A) τότε η τιμή του συντελεστή  $\Phi$  εισάγεται ίση με το μηδέν.



## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΤΟ ΓΥΑΛΙ

### ( ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ U-VALUE )

#### ΕΛΟΤ EN 673

Ο συντελεστής U-Value είναι μια παράμετρος η οποία προσδιορίζει την θερμότητα που μεταφέρεται διαμέσου του κεντρικού τμήματος των υαλοπινάκων, δηλαδή χωρίς την επίδραση των άκρων και δηλώνει τη σταθερή πυκνότητα του ποσοστού μεταφοράς θερμότητας ανά διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις περιβαλλοντικές θερμοκρασίες σε κάθε πλευρά. Ο συντελεστής U-Value μετριέται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ανά βαθμό Kelvin ( $W/m^2 K$ )

Η μέθοδος αυτού του προτύπου είναι βασισμένη σε υπολογισμούς σύμφωνα με τις ακόλουθες αρχές :

Ο συντελεστής U-Value δίνεται από την εξίσωση

$$U_u = 1/h_e + 1/h_t + 1/h_i \quad (1)$$

Όπου:

$h_e$  και  $h_i$  : είναι οι συντελεστές της εξωτερικής και της εσωτερικής θερμότητας που μεταφέρεται

$h_t$  : είναι η συνολική θερμική αγωγιμότητα του υαλοπίνακα

$$1/h_t = 1/\sum^n 1/h_s + 1/\sum^m d_j \cdot r_j \quad (2)$$

Όπου:

$h_s$  : είναι η θερμική αγωγιμότητα σε κάθε κενό με αέριο

$n$  : είναι ο αριθμός των κενών

$d_j$  : είναι το πάχος κάθε στρώματος υλικού

$r_j$  : είναι η ειδική θερμική αντίσταση κάθε υλικού ( η ειδική θερμική αντίσταση του γυαλιού = 1.0 mK/W )

$m$  : είναι ο αριθμός των στρωμάτων των υλικών

$$h_s = h_r + h_g \quad (3)$$

όπου :

$h_r$ : είναι η αγωγιμότητα της ακτινοβολίας

hg: είναι η αγωγιμότητα του αερίου

Η παράμετρος hg δίνεται από την σχέση :

$$hg = 4\sigma (\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1)^{-1} T_m^3 \quad (4)$$

όπου:

$\sigma$ : είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann

$T_m$  : είναι η μέση απόλυτη θερμοκρασία του κενού του γυαλιού

$\epsilon_1$  και  $\epsilon_2$  : είναι οι διορθωμένοι συντελεστές θερμικής εκπομπής στην θερμοκρασία  $T_m$

Η παράμετρος hg δίνεται από την σχέση

$$hg = Nu \lambda / s \quad (5)$$

όπου:

s: είναι το πλάτος του κενού

$\lambda$ : είναι η θερμική αγωγιμότητα

Nu: είναι ο αριθμός του Nusselt

$$Nu = A (Gr Pr)^n \quad (6)$$

A: μία σταθερά

Gr: ο αριθμός του Grashof

Pr: ο αριθμός του Prandtl

n: ένας εκθέτης

$$Gr = 9.81 s^3 \Delta T \rho^2 / T_m \mu^2 \quad (7)$$

$$Pr = \mu c / \lambda \quad (8)$$

Όπου:

$\Delta T$  : η διαφορά θερμοκρασίας στο όριο μεταξύ της γυάλινης επιφάνειας και του κενού με το αέριο

$\rho$ : πυκνότητα

$\mu$ : το δυναμικό ιξώδες

c: η συγκεκριμένη ικανότητα θερμότητας

$T_m$ : η μέση θερμοκρασία

Για κατακόρυφους υαλοπίνακες οι παράμετροι της εξίσωσης (6) είναι

$$A = 0.035$$

$$n = 0.38$$

Για οριζόντιους ή υπό γωνία υαλοπίνακες και για ανοδική ροή θερμότητας, η θερμότητα που μεταφέρεται ενισχύεται.

Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η εξίσωση (6) να εξεταστεί με τις ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους  $A$  και  $n$

$$\text{Οριζόντιοι υαλοπίνακες : } A = 0.16 \quad \text{και} \quad n = 0.28$$

$$\text{Υπό γωνία } 45^\circ : \quad A = 0.10 \quad \text{και} \quad n = 0.31$$

Για τις ενδιάμεσες γωνίες η γραμμική παρεμβολή είναι ικανοποιητική.

Όταν υπάρχει καθοδική ροή της θερμότητας το  $Nu=1$  αντικαθίσταται μέσα στην σχέση (5).

### **Συντελεστής θερμικής εκπομπής $\epsilon$**

Οι διορθωμένοι συντελεστές θερμικής εκπομπής  $\epsilon$  στις επιφάνειες των ορίων των εσωκλειόμενων κενών απαιτούνται για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας ακτινοβολίας  $h_r$  στην εξίσωση (4).

Για τις γυάλινες επιφάνειες που δεν έχουν επίστρωση, ο διορθωμένος συντελεστής θερμικής εκπομπής που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι 0.837. Για επιστρωμένες επιφάνειες ο κανονικός συντελεστής θερμικής εκπομπής  $\epsilon_n$  θα καθοριστεί με ένα υπέρυθρο φασματόμετρο και ο διορθωμένος συντελεστής προκύπτει από τον κανονικό συντελεστή θερμικής εκπομπής.

### **Ιδιότητες του αερίου στο διάκενο**

Οι ιδιότητες του αερίου του διάκενου που απαιτούνται είναι η θερμική αγωγιμότητα ( $\lambda$ ), η πυκνότητα ( $\rho$ ), το δυναμικό ιξώδες ( $\mu$ ) και συγκεκριμένη ικανότητα θερμότητας ( $c$ ).

Οι σχετικές τιμές αντικαθίστανται στις σχέσεις (7) και (8) για τους αριθμούς του Grashof και Prandtl και ο αριθμός του Nusselt καθορίζεται από την σχέση (6).

Αν ο αριθμός του Nusselt είναι μεγαλύτερος από 1 αυτό δείχνει ότι η μεταφορά εμφανίζεται ενισχύοντας το ποσοστό ροής θερμότητας.

Αν η υπολογισθείσα τιμή του αριθμού του Nusselt είναι μικρότερη από 1 αυτό δείχνει ότι η ροή θερμότητας μέσα στο αέριο είναι υπό διεξαγωγή και ο αριθμός του Nusselt δίνεται στην οριακή τιμή του 1. Με εφαρμογή στην σχέση (5) προκύπτει η αγωγιμότητα του αερίου  $h_g$ .

### **Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $h_e$**

Ο Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_e$  αναφέρεται στην ταχύτητα του ανέμου κοντά στον υαλοπίνακα, την θερμική εκπομπή και άλλους κλιματικούς παράγοντες.

Για συνήθεις κατακόρυφες γυάλινες επιφάνειες η τιμή του συντελεστή  $h_e$  είναι  $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  για λόγους σύγκρισης των τιμών του U-Value των υαλοπινάκων.

Η διαδικασία αυτή δεν λαμβάνει υπόψη της την βελτίωση του συντελεστή U-Value λόγω της παρουσίας των εξωτερικά εκτεθειμένων με επίστρωση επιφανειών μαζί με την θερμική εκπομπή χαμηλότερη από 0.837.

### **Εσωτερικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας $h_i$**

Ο εσωτερικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $h_i$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$h_i = h_r + h_c$$

όπου :

$h_r$ : αγωγιμότητα ακτινοβολίας

$h_c$ : αγωγιμότητα μεταφοράς

Ο συντελεστής  $h_r$  για μη επιστρωμένες γυάλινες επιφάνειες είναι  $4.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Αν η εσωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα έχει χαμηλότερη θερμική εκπομπή ( low-e ) τότε ο συντελεστής  $h_r$  δίνεται από την σχέση :

$$h_r = 4.4 \epsilon / 0.837$$

$\epsilon$ : ο διορθωμένος συντελεστής θερμικής εκπομπής της επιστρωμένης επιφάνειας

0.837: ο διορθωμένος συντελεστής θερμικής εκπομπής για μη επιστρωμένο γυαλί

Αυτό ισχύει μόνο εφόσον δεν υπάρχει καμία συμπύκνωση στην επιστρωμένη επιφάνεια.

Η τιμή του συντελεστή  $h_c$  είναι  $3.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  για ελεύθερη μεταφορά. Αν πάνω ή κάτω από το παράθυρο είναι τοποθετημένη μία αεροκουρτίνα η τιμή αυτή μπορεί να είναι μεγαλύτερη αν ένα ρεύμα του αέρα φυσά στο παράθυρο.

Για κατακόρυφες γυάλινες επιφάνειες και ελεύθερη μεταφορά θερμότητας ισχύει :

$$h_i = 4.4 + 3.6 = 8.0 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (12)$$

η οποία είναι τυποποιημένη για λόγους σύγκρισης των τιμών του συντελεστή U-Value των υαλοπινάκων.

### Τιμές σχεδιασμού

Η εφαρμογή των δηλωμένων τιμών των U-Values των υαλοπινάκων στο σχεδιασμό των κτιρίων μπορεί να μην είναι πάντα αρκετά ακριβής. Σε ειδικές συνθήκες η τιμή σχεδιασμού πρέπει να καθοριστεί χρησιμοποιώντας αυτό το πρότυπο. Οι κατάλληλες τιμές σχεδιασμού του συντελεστή U-Value καθορίζονται ανάλογα με την θέση του υαλοπίνακα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες χρησιμοποιώντας τις διορθωμένες οριακές τιμές των συντελεστών  $h_s$ ,  $h_e$ , και  $h_i$  οι οποίες πρέπει να δηλώνονται.

### Δηλωμένες τιμές – Τυποποιημένες οριακές συνθήκες

Για όλες τις περιπτώσεις όπου οι τιμές του U-Value είναι δηλωμένες, για επιπρόσθετους σκοπούς, οι τυποποιημένες οριακές συνθήκες που αναφέρονται παρακάτω πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Οι τυποποιημένες οριακές συνθήκες για δηλωμένες τιμές είναι :

$r$ : θερμική ειδική αντίσταση του γυαλιού  $1.0 \text{ mK/W}$

$\epsilon$ : συντελεστής θερμικής εκπομπής  $0.837$

$\Delta T$ : : η διαφορά θερμοκρασίας στο όριο μεταξύ της γυάλινης επιφάνειας και του κενού με το αέριο  $15 \text{ K}$

$T_m$  : είναι η μέση απόλυτη θερμοκρασία του κενού του γυαλιού  $283 \text{ K}$

$\sigma$ : είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$h_e$ : συντελεστής της εξωτερικής θερμότητας που μεταφέρεται  $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

$h_i$ : συντελεστής της εσωτερικής θερμότητας που μεταφέρεται  $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

$A$ : μία σταθερά  $0.035$

$n$ : ένας εκθέτης  $0.38$

## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

### ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΔΙΠΛΟΥΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΙΚΟΥΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

#### ΕΛΟΤ EN 1288.02

Για τις σκοπιμότητες αυτής της δοκιμής ισχύουν οι παρακάτω ορισμοί:

- Ένταση κάμψης: η εφελκυστική ένταση που προκαλείται στην επιφάνεια του δείγματος
- Ενεργή ένταση κάμψης: ο σταθμισμένος μέσος όρος των εφελκυστικών καμπτικών εντάσεων υπολογισμένες με την εφαρμογή ενός συντελεστή που λαμβάνει υπόψη τη μη ομοιομορφία του πεδίου της έντασης
- Αντοχή σε κάμψη: η ένταση κάμψης ή η ενεργή ένταση κάμψης που οδηγεί σε θραύση του δείγματος
- Ισοδύναμη αντοχή σε κάμψη: η εμφανής αντοχή σε κάμψη των υαλοπινάκων των οποίων οι παρατυπίες στο πάχος τους δεν επιτρέπουν ακριβή υπολογισμό της έντασης κάμψης (π.χ. υαλοπίνακες με σχέδια)

#### Συμβολισμοί

A: επιφάνεια με σχεδόν ομοιόμορφη ένταση

E: μέτρο ελαστικότητας του δείγματος (μέτρο Young)

F: δύναμη του εμβόλου

F<sub>max</sub>: δύναμη του εμβόλου κατόπιν της θραύσης

F<sub>ring</sub>: η δύναμη που μεταβιβάζεται από τον δακτύλιο φόρτισης στο δείγμα

h: το πάχος ή ο μέσος όρος του πάχους του δείγματος

L: το μήκος της πλευράς των τετράγωνων δειγμάτων

μ: ο λόγος του Poisson του δείγματος ( για το γυαλί χρησιμοποιείται η τιμή 0.23)

p: η πίεση του αερίου στην επιφάνεια που ορίζεται από τον δακτύλιο φόρτισης

p(F): ονομαστική πίεση του αερίου ως συνάρτηση της δύναμης του εμβόλου

$p_{\max}(F_{\max})$ : ονομαστική πίεση του αερίου ως συνάρτηση της δύναμης του εμβόλου κατόπιν της θραύσης

$r_1$ : ακτίνα του δακτυλίου φόρτισης

$r_2$ : ακτίνα δακτυλίου υποστήριξης

$r_{em}$ : μέση ακτίνα δείγματος (για την αξιολόγηση)

$\sigma$ : ένταση

$\sigma_{bB}$ : αντοχή σε κάμψη

$\sigma_{beqB}$ : ισοδύναμη αντοχή σε κάμψη

$t$ : χρόνος

$\Delta F/\Delta t$ : ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του εμβόλου

$F, r, \sigma$ : μη διαστασιολογημένες ποσότητες που αναφέρονται στα  $F, r, \sigma$

### Αρχές της μεθόδου

Το τετράγωνο δείγμα πλευράς μήκους  $L$  και έχοντας ουσιαστικά απλές παράλληλες επιφάνειες τοποθετείται χαλαρά στον δακτύλιο υποστήριξης (ένα κυκλικό δακτύλιο ακτίνας  $r_2$ ). Το δείγμα υποβάλλεται σε φορτίο  $F_{ring}$ , με την βοήθεια του δακτυλίου φόρτισης (ακτίνας  $r_1$ ) ο οποίος είναι τοποθετημένος ομόκεντρα με τον δακτύλιο υποστήριξης. Επιπλέον, η περιοχή  $A$ , που ορίζεται από τον δακτύλιο φόρτισης  $0 < r < r_1$  έχει τεθεί υπό την πίεση του αερίου  $p$ , η οποία έχει μία συγκεκριμένη σχέση με το φορτίο του δακτυλίου  $F_{ring}$ .

Όταν το δείγμα υποβάλλεται στο φορτίο και τη σχετική πίεση του αερίου η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις  $r_1, r_2, L$  και  $h$ , το πεδίο της ακτινικής τάσης του εφελκυσμού, που είναι επαρκώς ομοιογενής για τους σκοπούς της μεθόδου, αναπτύσσεται στην κυρτά λυγισμένη επιφάνεια που ορίζεται από τον δακτύλιο φόρτισης. Η εφαπτομενική τάση του εφελκυσμού είναι ίση με την ακτινική τάση του εφελκυσμού στο κεντρικό σημείο του δείγματος ( $r=0$ ) αλλά μειώνεται όσο η ακτίνα  $r$  αυξάνεται.

Έξω από τον δακτύλιο φόρτισης οι ακτινικές και εφαπτομενικές τάσεις σημειώνουν ραγδαία πτώση προς τις άκρες του δείγματος, έτσι ο κίνδυνος της θραύσης έξω από τον δακτύλιο φόρτισης είναι μικρός. Στην άκρη του δείγματος, οι ακτινικές τάσεις είναι μηδενικές και οι εφαπτομενικές είναι θλιπτικές και στις δύο λυγισμένες πλευρές του δείγματος. Η άκρη του δείγματος είναι έτσι πάντα κάτω από εφαπτομενική θλιπτική τάση.

Αυξάνοντας την δύναμη,  $F$ , και την πίεση του αερίου,  $p$ , η εφελκυστική τάση στο κέντρο του δείγματος αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι την θραύση έτσι ώστε η διακοπή να αναμένεται να συμβεί στην επιφάνεια που υποβάλλεται στην μέγιστη εφελκυστική τάση εντός του δακτυλίου φόρτισης.

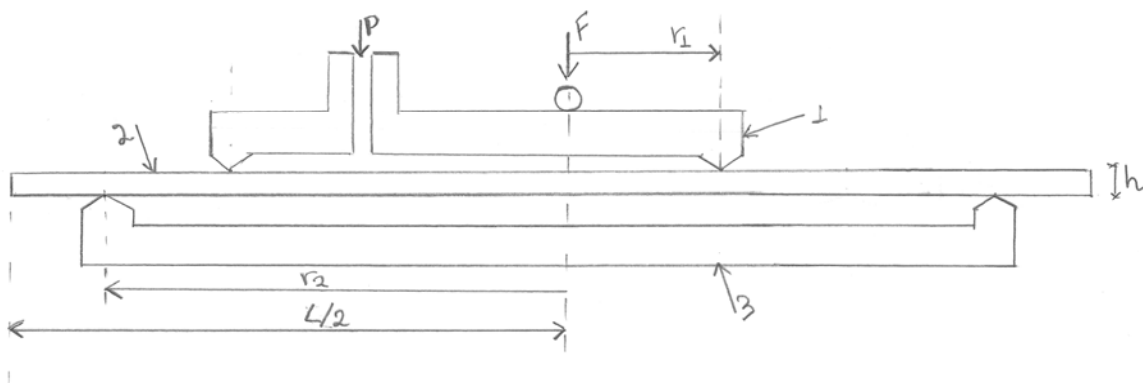
Η αντοχή σε κάμψη,  $\sigma_{bb}$ , ή η ισοδύναμη αντοχή σε κάμψη,  $\sigma_{beqB}$ , υπολογίζονται από την μέγιστη τιμή της δύναμης του εμβόλου,  $F_{max}$ , η οποία μετριέται την στιγμή της θραύσης, και από το πάχος,  $h$ , του δείγματος λαμβάνοντας υπόψη τις καθορισμένες διαστάσεις του δείγματος και διάφορες χαρακτηριστικές τιμές του υλικού. Αυτό προϋποθέτει ότι η πίεση του αερίου,  $p$ , ακολουθά την δύναμη του εμβόλου,  $F$ , σύμφωνα με την ονομαστική σχέση  $p(F)$ .

## Εξοπλισμός

### Συσκευή της μεθόδου

Η μέθοδος της κάμψης πρέπει να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μηχανήμα ελέγχου της κάμψης το οποίο να ενσωματώνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

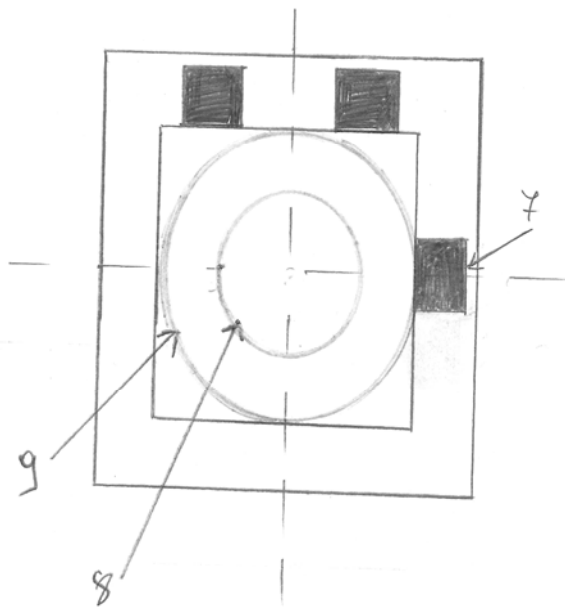
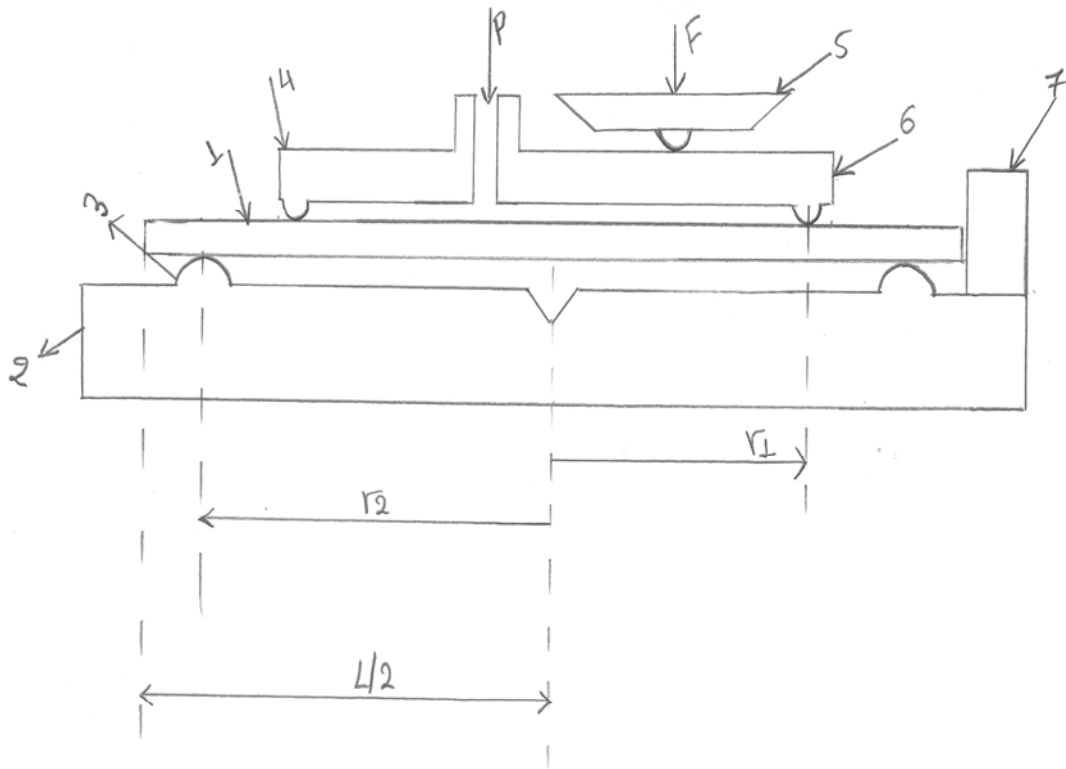
- A) η ένταση στο δείγμα πρέπει να εφαρμόζεται από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή με τέτοιο τρόπο που να ελαχιστοποιεί τα τινάγματα και να είναι αδιαβάθμητη
- B) η συσκευή πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί στην κλίμακα αυτή της έντασης
- Γ) η συσκευή ελέγχου πρέπει να ενσωματώνει μία συσκευή μέτρησης του φορτίου με ένα όριο σφάλματος  $\pm 2.0\%$



- 1: Δακτύλιος φόρτισης
- 2: Δείγμα
- 3: Δακτύλιος υποστήριξης

**ΣΧΗΜΑ 1:** ΒΑΣΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ





## ΣΧΗΜΑ 2: ΣΥΣΚΕΥΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

1: Δείγμα

2: Άκαμπτη πλάκα βάσης, κατά προτίμηση κατασκευασμένη από ατσάλι με δακτύλιο υποστήριξης ακτίνας  $r_2$

3: Κατατομή από το λάστιχο προσαρμοσμένο στον δακτύλιο υποστήριξης, πάχους 3mm, με σκληρότητα  $(40\pm 10)$  IRHD σύμφωνα με τον ISO 48

4: Άκαμπτος δακτύλιος φόρτισης, κατά προτίμηση κατασκευασμένος από ατσάλι

5: Συνιστώσα της δύναμης που μεταβιβάζεται με ένα σφαιρικό μηχανισμό ώστε να διαβεβαιώνεται ότι η δύναμη είναι κεντροθετημένη στον δακτύλιο φόρτισης

6: Κατατομή από το λάστιχο προσαρμοσμένο στον δακτύλιο φόρτισης, πάχους 3mm, με σκληρότητα  $(40\pm 10)$  IRHD σύμφωνα με τον ISO 48

7: Σιαγόνες προσαρμογής για την τοποθέτηση του δείγματος κεντρικά

8: Κύκλος επαφής του δακτυλίου φόρτισης

9: Κύκλος επαφής του δακτυλίου υποστήριξης

## **Συσκευή φόρτισης**

Ο δακτύλιος φόρτισης πρέπει να εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας μία συσκευή φόρτισης όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Η συσκευή φόρτισης περιλαμβάνει τον δακτύλιο φόρτισης  $r_1$  ( $300\pm 1$ )mm, τον δακτύλιο υποστήριξης  $r_2$  ( $400\pm 1$ )mm και την επιφάνεια  $A$   $240.000\text{mm}^2$

## **Επιφάνεια του ρυθμιστή πίεσης**

Η συσκευή φόρτισης για την επιφάνεια πίεσης φαίνεται στο σχήμα.

Ο ρυθμιστής πρέπει να διαλέγεται σε σχέση με την ακρίβεια και τον ρυθμό ροής με τέτοιο τρόπο ώστε η σχέση  $p(F)$  να μπορεί να επιτευχθεί.

Έτσι απαιτείται ένα όργανο μέτρησης που να επιτρέπει στο πλάτος του δείγματος να μετριέται στο κοντινότερο χιλιοστό και ένα όργανο μέτρησης που να επιτρέπει στο πάχος του δείγματος να μετριέται στο κοντινότερο 0.01 του χιλιοστού.

## **Σχήμα και διαστάσεις του δείγματος**

Το ελάχιστο πάχος για τα δείγματα έχει υπολογισθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η επίδραση του ίδιου βάρους των δειγμάτων κατά την κατανομή των τάσεων να μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι, τα δείγματα πρέπει να έχουν μήκος πλευράς  $L$  ( $1000\pm 4$ )mm, ελάχιστο ονομαστικό πάχος 3mm και μέση ακτίνα (για την αξιολόγηση),  $r_{em}$  600mm.

Στην περίπτωση δειγμάτων με επίπεδες επιφάνειες η ανοχή στην ομαλότητα πρέπει να είναι 0.3 mm και η ανοχή στον παραλληλισμό πρέπει να είναι 2% του πάχους του δείγματος.

Στην περίπτωση δειγμάτων με μία ή δύο διαμορφωμένες επιφάνειες οι διακυμάνσεις του πάχους της πλάκας δεν πρέπει να είναι παραπάνω από 4% και οι τοπικές αποκλίσεις από το μέσο πάχος ( λόγω του βάθους της διαμόρφωσης ) πρέπει να είναι κατά μέγιστο 30% ή 2mm ( όποιο είναι το μικρότερο ).

## **Δειγματοληψία και προετοιμασία των δειγμάτων**

Η μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις επιφάνειες οι οποίες υποβάλλονται συνέχεια σε εφελκυστικές τάσεις . Αυτές δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με

εργαλεία, λειαντικούς παράγοντες , θραύσματα από γυαλί κτλ και επίσης δεν πρέπει να τραυματιστεί κατά την διάρκεια της αποθήκευσης.

Οι προστατευτικές επιστρώσεις πρέπει να απομακρύνονται 24 ώρες πριν την δοκιμή. Τα δείγματα πρέπει να αποθηκεύονται στο περιβάλλον όπου θα διεξαχθεί η δοκιμή για τουλάχιστον 4 ώρες πριν από αυτή.

Πριν από την δοκιμή αντοχής σε κάμψη όλα τα δείγματα πρέπει να εξεταστούν για τυχόν ελαττώματα τα οποία δεν είναι αντιπροσωπευτικά των ποιοτικών χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου υλικού.

Μία κολλητική ταινία πρέπει να εφαρμοστεί στην πλευρά του δείγματος που θα αντιμετωπίσει τον δακτύλιο φόρτισης ώστε να παραμένουν ενωμένα τα θραύσματα. Αυτό διευκολύνει την θέση της προέλευσης της θραύσης και την μέτρηση του πάχους του δείγματος.

Ο αριθμός των δειγμάτων που θα εξεταστούν πρέπει να καθοριστεί ανάλογα τα απαιτούμενα όρια εμπιστοσύνης ιδίως όσον αφορά την εκτίμηση της κατανομής της δύναμης.

## **Διαδικασία της δοκιμής**

### **Θερμοκρασία**

Η δοκιμή κάμψης με τον ομοαξονικό δακτύλιο πρέπει να διεξαχθεί στην θερμοκρασία των  $(23\pm 5)^{\circ}\text{C}$ . Κατά την διάρκεια της δοκιμής η θερμοκρασία του δείγματος πρέπει να διατηρείται σταθερή στον  $1^{\circ}\text{C}$  ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη θερμικών καταπονήσεων.

### **Υγρασία**

Η δοκιμή κάμψης με τον ομοαξονικό δακτύλιο πρέπει να διεξαχθεί στην σχετική υγρασία μεταξύ 40% και 70%.

### **Μέτρηση πάχους**

Εφόσον η ονομαστική σχέση  $\rho(F)$  εξαρτάται από το πάχος των δειγμάτων,  $h$ , αυτό θα πρέπει να καθοριστεί πριν από την έναρξη της δοκιμής. Για τον λόγο αυτό το πάχος πρέπει να μετρηθεί σε ένα ελάχιστο των οχτώ πόντων στην άκρη του δείγματος. Για δείγματα με μία ή δύο διακοσμητικές επιφάνειες, και το πάχος της πλάκας και το πάχος του πυρήνα πρέπει να μετρηθούν. Από αυτές τις τιμές που μετρήθηκαν λαμβάνεται ο μέσος όρος. Η τιμή που λαμβάνεται με αυτό τον τρόπο για το πάχος των δειγμάτων ή για το ισοδύναμο πάχος των δειγμάτων,  $h$ , χρησιμοποιείται για να καθορίσει την ονομαστική σχέση  $\rho(F)$ . Μετρώντας το πάχος

στην άκρη του δείγματος, ανεπιθύμητες ζημιές στην επιφάνεια που προκαλούνται από τα εργαλεία μέτρησης δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά θραύσης.

### **Πλάκα βάσης**

Η πλάκα βάσης είναι κεντροθετημένη μετακινώντας κάτω τον κώνο που μεταβιβάζει την δύναμη ( χωρίς τον δακτύλιο φόρτισης και το δείγμα) μέσα στον κώνο προσαρμογής. Η πλάκα βάσης πρέπει να τοποθετηθεί σε αυτή την θέση. Λειαντικοί παράγοντες και άλλα σκληρά και κοφτερά τμήματα πρέπει να καθαρίζονται από τον δακτύλιο υποστήριξης. Οι ζημιές στον δακτύλιο υποστήριξης πρέπει να εξαλείφονται.

### **Θέση του δείγματος και του δακτυλίου φόρτισης**

Το δείγμα τοποθετείται με την εξεταζόμενη επιφάνεια προς τα κάτω. Ο δακτύλιος φόρτισης από τον οποίο λειαντικοί παράγοντες και άλλα σκληρά και κοφτερά τμήματα έχουν αφαιρεθεί τοποθετείται στην πάνω πλευρά του δείγματος και κεντρικά σε αυτό. Η ένωση με το λάστιχο που επισυνάπτεται στον δακτύλιο φόρτισης πρέπει να ελέγχεται για το αποτέλεσμα σφράγισης που αυτή προσφέρει και αν είναι απαραίτητο να αντικατασταθεί. Οι ζημιές στον δακτύλιο φόρτισης πρέπει να εξαλείφονται.

### **Εφαρμογή του φορτίου**

Η δύναμη του εμβόλου,  $F$ , και η πίεση του αερίου,  $p$ , πρέπει να αυξάνονται διαρκώς μέχρι το δείγμα να σπάσει. Η σχέση  $p(F)$  που πρέπει να διατηρείται κατά την διάρκεια της φόρτισης, πρέπει να καθορίζεται από την αδιάστατη παράσταση του σχήματος 3 (καμπύλη  $p''$ ). Οι ακόλουθες σχέσεις υπάρχουν μεταξύ των αδιάστατων παραμέτρων  $p''$  και  $F''$  και των τιμών  $p$  και  $F$ .

$$p = p'' E h^4 / r_{3m}^4 (1 - \mu^2) \quad (1)$$

$$F = F'' E h^4 / r_{3m}^2 (1 - \mu^2) \quad (2)$$

Η δύναμη του εμβόλου  $F$  και η πίεση του αερίου  $p$  πρέπει να παρακολουθούνται μέχρι την θραύση του δείγματος ώστε να ελέγχεται αν η ονομαστική σχέση  $p(F)$  ικανοποιεί αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.

Η μέγιστη δύναμη  $F_{max}$  και η σχετική πίεση του αερίου  $p_{max}$  πρέπει να μετρούνται. Από αυτές τις δύο τιμές, η ένταση κατά την θραύση  $\sigma_{bb}$  ή  $\sigma_{beqB}$  μετρουμένες σε  $N/mm^2$  πρέπει να καθορίζονται σύμφωνα με το σχήμα 3.

### Κλίμακα φόρτισης

Η αυξανόμενη με τον χρόνο δύναμη του εμβόλου και η σχετική πίεση του αερίου πρέπει να διαλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε η ακτινική εφελκυστική τάση στο κέντρο του δείγματος να αυξάνεται στο ύψος των  $(2 \pm 0.4) \text{ N/mm}^2 \text{ s}$  μέχρι το δείγμα να σπάσει. Εφόσον δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της έντασης και της δύναμης του εμβόλου, η επιτρεπόμενη κλίμακα φόρτισης πρέπει να καθορίζεται σύμφωνα με το σχήμα 3.

### Θέση προέλευσης

Η θέση προέλευσης της θραύσης καθορίζεται από τα θραύσματα. Η τοποθεσία της προέλευσης της θραύσης ' μέσα ή έξω από τον κύκλο επαφής του δακτυλίου φόρτισης ' πρέπει να καθορίζεται για κάθε δείγμα.

## Αξιολόγηση

Για τους σκοπούς της αξιολόγησης, εξετάζονται μόνο εκείνα τα δείγματα στα οποία η προέλευση της θραύσης ανήκει μέσα στην περιοχή που ορίζεται από τον δακτύλιο φόρτισης.

### Υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη

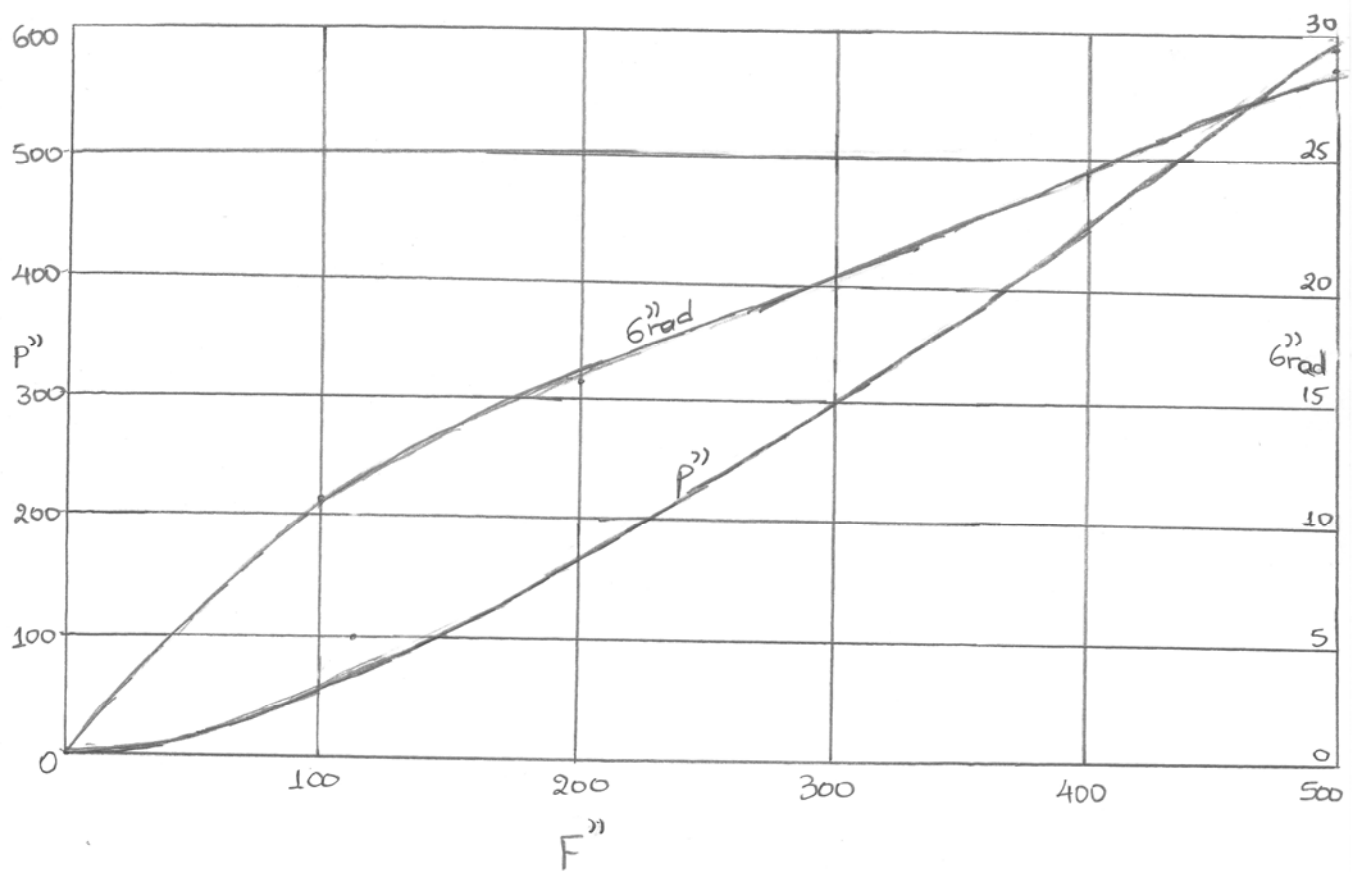
Η αντοχή σε κάμψη,  $\sigma_{bb}$ , ή η ισοδύναμη αντοχή σε κάμψη,  $\sigma_{beqB}$ , που σχετίζονται με την δύναμη θραύσης,  $F_{max}$ , και την αντίστοιχη πίεση αερίου,  $p_{max}(F_{max})$ , καθορίζεται από την αδιάστατη παράσταση στο σχήμα 3 (καμπύλη σ'') λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του δείγματος,  $h$ . Για τον λόγο αυτό οι μετρημένες μεταβλητές  $F_{max}$  και  $p_{max}(F_{max})$  μετατρέπονται με την βοήθεια των σχέσεων (3) και (4) στους αντίστοιχους αδιάστατους παράγοντες  $F_{max}''$  και  $p_{max}''$ .

$$F_{max}'' = F_{max} r_{3m}^2 (1 - \mu^2) / Eh^4 \quad (3)$$

$$p_{max}'' = p_{max}(F_{max}) r_{3m}^4 (1 - \mu^2) / Eh^4 \quad (4)$$

Η αδιάστατη ένταση θραύσης,  $\sigma_{bb}''$ , πρέπει να καθοριστεί από αυτές τις τιμές χρησιμοποιώντας το σχήμα 3 (καμπύλη σ'') και έπειτα μετατρέπεται στην αντοχή κάμψης,  $\sigma_{bb}$ , σύμφωνα με την εξίσωση (5)

$$\sigma_{bb} = \sigma_{bb}'' Eh^2 / r_{3m}^2 (1 - \mu^2) \quad (5)$$



**ΣΧΗΜΑ 3 :** ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΕΝΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ  $\sigma_{rad}$ , ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ  $p''(F'')$  ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΤΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ  $F''$ , ΣΕ ΜΙΑ ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΟΠΟΥ  $r_1/r_2=1/1.33$  ΚΑΙ  $r_2/r_{3m}=1/1$ .

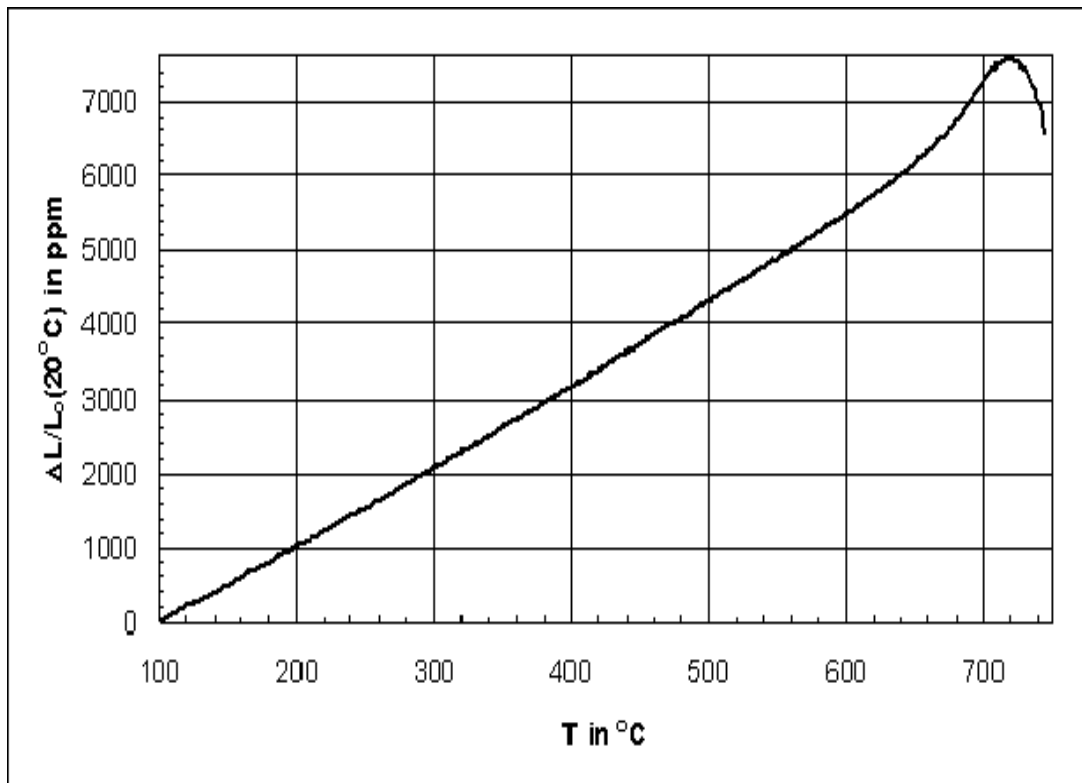
**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ,  
ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ  $T_g$ , ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΑΛΑΚΥΝΣΕΩΣ  $M_g$**

Στόχος είναι η χρήση μηκυνσιόμετρου για την καταγραφή της μεταβολής των διαστάσεων του γυαλιού συναρτήσει της θερμοκρασίας και η χρήση της καμπύλης που λαμβάνεται για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών θερμοκρασιών του γυαλιού.

Κάτω από μία ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία, ο συντελεστής διαστολής του γυαλιού παραμένει περίπου σταθερός με μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι καμπύλες διαστολής και συστολής ενός κομματιού γυαλιού που έχει υποστεί καλή όπτηση είναι ίδιες και αντιστρεπτές. Σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ο συντελεστής διαστολής του γυαλιού παρουσιάζει μία σημαντική αύξηση. Η θερμοκρασία αυτή αντιστοιχεί στο σημείο μετατροπής του γυαλιού ( $T_g$ ).

Όταν η διαστολή μετριέται με χρήση μηκυνσιόμετρου, το σημείο μαλακύνσεως του γυαλιού ( $M_g$ ) είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα αρχίζει να παραμορφώνεται ή να μειώνεται σε μήκος. Και οι δύο αυτές θερμοκρασίες παρουσιάζουν τεχνολογικό ενδιαφέρον. Το γυαλί στη θερμοκρασία  $T_g$  έχει ιξώδες  $10^{12.4} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$  (ή  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ). Η θερμοκρασία  $M_g$  αντιστοιχεί σε ιξώδες  $10^{10.3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .





Σχήμα 1

Μεταβολή του μήκους (L) γυαλιού συναρτήσει της θερμοκρασίας

### Πειραματική διαδικασία

Γίνεται χρήση μηκυσιόμετρου για τη μέτρηση των μεταβολών του μήκους λόγω διαστολής σε θερμαινόμενη ράβδο γυαλιού. Το είδος του γυαλιού που χρησιμοποιείται σ' αυτή την διαδικασία αποτελείται από  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  και  $\text{CaO}$ . Το δείγμα θερμαίνεται σε κυλινδρικό φούρνο, ο οποίος βρίσκεται πάνω σε ράγες έτσι

ώστε να μπορεί να μετακινείται μπρος και πίσω για να είναι δυνατή η τοποθέτηση και απομάκρυνση του δείγματος.

Ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης του φούρνου ελέγχεται από προγραμματιζόμενο ελεγκτή. Μπορεί έτσι να καθοριστεί ο ρυθμός αύξησης ή ελάττωσης της θερμοκρασίας, καθώς και ο χρόνος παραμονής σε μια ορισμένη θερμοκρασία. Ανά πάσα στιγμή είναι δυνατή η παρατήρηση της θερμοκρασίας που έχει καθοριστεί καθώς και η πραγματική θερμοκρασία του φούρνου, που μετρείται με θερμοστοιχείο. Ο ελεγκτής έχει ήδη προγραμματιστεί ώστε να αυξάνεται η θερμοκρασία του φούρνου με σταθερό ρυθμό 20°C/min.

Λαμβάνουμε ένα δείγμα γυαλιού με μορφή ράβδου και μετράμε το αρχικό του μήκος ( $l_0$ ). Ο κυλινδρικός φούρνος σύρεται έξω, και αφού το δείγμα εισαχθεί στην ειδική γι' αυτό θέση, τον επαναφέρουμε στην αρχική του θέση. Φροντίζουμε η μία άκρη της πυριτικής ράβδου του οργάνου να εφάπτεται στην επίπεδη πλαϊνή επιφάνεια του δείγματος, ενώ η άλλη της άκρη εφαρμόζεται με προσοχή στην άκρη της βελόνας του οργάνου που μετρά τις μεταβολές του μήκους. Το όργανο αυτό έχει κλίμακα που φτάνει ως τα 10mm, και μετρά με ακρίβεια 0.01mm. Η αρχική ρύθμιση του οργάνου δεν τίθεται στη θέση 0mm, αλλά σε μία μεγαλύτερη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση και των συστολών. Στη συνέχεια ανοίγουμε το διακόπτη (θέση ON), και δίνουμε στον ελεγκτή την εντολή RUN για την έναρξη του προγράμματος. Κατά τη διάρκεια της ανόδου της θερμοκρασίας καταγράφουμε την ένδειξη της αύξησης του μήκους του δείγματος ( $\Delta l$ , σε mm), καθώς και τη θερμοκρασία του φούρνου. Η θέρμανση συνεχίζεται έως ότου το γυάλινο δείγμα αρχίσει να μαλακώνει και να συστέλλεται. Στο σημείο αυτό διακόπτουμε το πρόγραμμα και η θερμοκρασία αρχίζει να πέφτει.

Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \Delta l / l_0 \Delta T$$

όπου:  $\alpha$ : Συντελεστής γραμμικής διαστολής ( $K^{-1}$ ).

$\Delta l$ : Μεταβολή του μήκους του δείγματος (mm).

$l_0$ : Αρχικό μήκος του δείγματος μετρημένο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (mm).

$\Delta T = T - T_0$ : Αύξηση της θερμοκρασίας (K).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφονται οι τιμές της θερμοκρασίας και η αύξηση του μήκους του δείγματος ( $\Delta l_m$  σε mm). Η αύξηση όμως αυτή δεν είναι η πραγματική, αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και η διαστολή του πυριτικού υποδοχέα. Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του πυριτικού γυαλιού είναι  $0.56 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Έτσι η πραγματική αύξηση του μήκους είναι  $\Delta l_c = \Delta l_m + 0.56 \cdot 10^{-6} \cdot l_0 \cdot \Delta T$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η παρασκευή του γυαλιού πρέπει να λαμβάνει υπόψη την χρήση για την οποία προορίζεται ειδικά όταν είναι σύνηθες να παρασκευάζονται γυάλινα προϊόντα απευθείας από το ακατέργαστο υλικό στο τελικό αντικείμενο σε ένα κύκλο εργασιών. Η παραγωγή και η εκμετάλλευση του γυαλιού περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων έτσι που είναι αναμενόμενο ότι οι ιδιότητες φέρουν μεγαλύτερης σημασίας από την ίδια την παραγωγή του γυαλιού.

### **ΑΠΛΟΙ (ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΙ) ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ**

Πρόκειται για την πιο απλή μορφή υαλοπίνακα. Οι υαλοπίνακες αυτοί προσφέρουν προστασία από τα καιρικά φαινόμενα, επαφή με το φυσικό περιβάλλον επιτρέποντας την είσοδο του φυσικού φωτός και υποτυπώδη θερμομόνωση. Στους υαλοπίνακες αυτούς ο συντελεστής θερμοπερατότητας U-Value μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του γυαλιού. Για παράδειγμα ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός απλού υαλοπίνακα πάχους 4mm είναι ίσος με 5.8 W/(m<sup>2</sup> K) ενώ για ένα απλό υαλοπίνακα πάχους 19 mm ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι ίσος με 5.4 W/(m<sup>2</sup> K).

*Προδιαγραφές απλών υαλοπινάκων*

<b>Πάχος [mm]</b>	<b>βάρος [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>ορατό φως[%] διαπερα- τότητα</b>	<b>ηλιακή ενέργεια[%] αντανά- κλαση</b>	<b>ηλιακή ενέργεια[%] διαπερα- τότητα</b>	<b>ηλιακή ενέργεια[%] αντανά- κλαση</b>	<b>απορρό- φηση</b>	<b>συντελεστής σκίασης</b>
2.00	5.00	91	8	87	8	5	1.03
3.00	7.50	91	8	84	7	9	1.00
4.00	10.00	90	8	82	7	11	0.99
5.00	12.50	90	8	80	7	13	0.97
6.00	15.00	89	8	78	7	15	0.95
8.00	20.00	89	8	74	7	19	0.92
10.00	25.00	88	8	71	7	22	0.90
12.00	30.00	86	8	66	6	28	0.86
15.00	37.50	83	8	62	6	32	0.83

\*συντελεστής σκίασης: δείχνει πόση από την ηλιακή ενέργεια αφήνει να περάσει σε σχέση με ένα απλό υαλοπίνακα πάχους 3mm (ηλιακός συντελεστής 0.87)

## ΔΙΠΛΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Οι διπλοί υαλοπίνακες αποτελούνται από δυο υαλοπετάσματα τα οποία διαχωρίζονται από ένα στρώμα αέρα. Σε σύγκριση με το σύστημα μονής υάλωσης οι διπλοί υαλοπίνακες περιορίζουν τις θερμικές απώλειες λόγω της θερμομονωτικής ιδιότητας του αέρα στο διάκενο. Επιπλέον παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα σε φυσικό φως.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός απλού υαλοπίνακα πάχους 4mm είναι ίσος με  $5.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , ενώ για ένα διπλό υαλοπίνακα ο οποίος αποτελείται από δύο υαλοπίνακες πάχους 4mm ο καθένας με διάκενο 12mm μεταξύ τους ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι ίσος με  $2.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Ο συντελεστής θερμοπερατότητας (U-Value) μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του διακένου σε ένα διπλό υαλοπίνακα μέχρι πάχους διακένου ίσο με 16mm. Για πάχος διακένου μεγαλύτερου από 16 mm ο συντελεστής θερμοπερατότητας αυξάνεται ελάχιστα.

Επιπλέον, αν αντί για αέρα στο διάκενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο αέριο όπως Αργό (Ar) ή Κρυπτό (Kr) τότε η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας μπορεί να μειωθεί κι άλλο μέχρι τα  $2.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  (περίπτωση διπλού υαλοπίνακα ο οποίος αποτελείται από δύο υαλοπίνακες πάχους 4mm ο καθένας με διάκενο 16mm).

## ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Η ύπαρξή τους οφείλεται στην απαίτηση για προστασία του εσωτερικού του κελύφους από τα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή περίοδο του έτους, ιδιαίτερα στις περιοχές με θερμό γενικά κλίμα και έντονη ηλιοφάνεια, όπως είναι ο Ελλαδικός χώρος. Ως γενική αρχή λαμβάνεται ότι όσο αυξάνεται το πάχος ενός υαλοπίνακα, τόσο μειώνεται το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που τον διαπερνά και αποδίδεται στον εσωτερικό χώρο, ποσοστό το οποίο καθορίζει τελικά τον αποκαλούμενο συντελεστή σκίασης του υαλοπίνακα. Αναλυτικότερα, υπάρχει δυνατότητα για βελτίωση της συγκεκριμένης ιδιότητας του υαλοπίνακα, είτε με την επικάλυψη αυτού με ειδικά ανακλαστικά επιστρώματα, είτε με την προσθήκη των κατάλληλων ουσιών στην υαλόμαζα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί, ότι οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες επηρεάζουν ταυτόχρονα και τη διέλευση του φυσικού φωτός μέσω αυτών, οπότε είναι αναγκαίος ο εξ' αρχής προσδιορισμός της απαιτούμενης στάθμης φυσικού φωτός στο εσωτερικό του κελύφους, προκειμένης της επιλογής του κατάλληλου υαλοπίνακα. Στόχος είναι η μείωση του τεχνητού φωτισμού ο οποίος αποτελεί σημαντική πηγή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ορισμένα κτίρια καθώς ανάλογα με τον τύπο των λαμπτήρων, ένα μικρό ή μεγάλο ποσοστό

του φορτίου φωτισμού μετατρέπεται σε θερμότητα που επηρεάζει το θερμικό και το ψυκτικό φορτίο του κτιρίου. Έτσι, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό των ανοιγμάτων που επιτρέπουν την είσοδο του φυσικού φωτός. Ο σχεδιασμός αυτός θα πρέπει να συμβάλλει στην βελτίωση του φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου και στην μεγαλύτερη οπτική άνεση, στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για φωτισμό καθώς και στην μείωση του ψυκτικού φορτίου.

Η χρήση φυσικού φωτισμού κάνει δυνατή την μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό έως και κατά 80%. Στην περίπτωση όπου το κτίριο λειτουργεί σε 24ωρη βάση με την χρησιμοποίηση τεχνητού φωτισμού, η συνεισφορά του φυσικού φωτισμού φθάνει μέχρι και στο 40% της αρχικής κατανάλωσης. Οι διάφορες τεχνικές φυσικού φωτισμού μπορούν να ομαδοποιηθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

-Ανοίγματα στην κατακόρυφη τοιχοποιία

-Ανοίγματα οροφής, με την χρήση ανακλαστικών υαλοπινάκων καθώς αυτοί ανακλούν το 50-75% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών, αλλά μπορεί να προκαλέσουν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο και στα γύρω κτίρια. Τέλος, είναι κατάλληλοι για νότιους προσανατολισμούς με κλίση προς τα έξω.

#### Προδιαγραφές ανακλαστικών υαλοπινάκων

ονομασία υαλοπίνακα	<u>ορατό φως[%]</u> <u>ηλιακή ενέργεια[%]</u>					ηλιακός συντελε- στης	συντελε- στης σκίασης	
	διαπερα- τότητα	αντανά- κλαση	διαπερα- τότητα	αντανά- κλαση	απορρό- φηση			
Stopsol Classic Clear(1/ 2)	34/35	35/28	38	30/23	32/39	0,45/ 0,46	0,52/ 0,53	2,8
Stopsol Classic Bronze (1/2)	19/20	34/12	24	29/11	47/65	0,32/ 0,34	0,37/ 0,39	2,8
Sun- Guard Solar Light Blue 52 (2/3)	46	15/17	36	13/17	51/47	0,44/ 0,61	0,50/ 0,69	2,7
Stopsol Supersil ver Clear (1/2)	58	38/37	53	31/27	16/20	0,59	0,68	2,8
Stopsol	26/27	35/12	28	27/11	45/61	0,35/ 0,37	0,40/ 0,43	2,8

Supersilver Gray (1/2) SG	10	44/36	07	40/36	53/57	0,13/ 0,39	0,14/ 0,44	2,8
Solar Silver 10 (2/3) SG	29	23/21	22	20/23	58/55	0,29/ 0,52	0,33/ 0,59	2,5
Solar Silver Gray 32 (2/3) Cool- Lite SS108 (2)	07	42	05	37	58	0,12	0,14	2,3
Cool- Lite TB130 (2)	27	17	19	17	64	0,28	0,32	2,6
Cool- Lite STB130 (2)	33	18	25	15	60	0,34	0,39	2,7

Για την ελάττωση της διαπερατότητας ενέργειας δύο πράγματα μπορούν να συμβούν: απορρόφηση της ενέργειας ή αντανάκλαση της ενέργειας. Η απορρόφηση της ενέργειας αποτελεί μια παλιά τεχνολογία κυρίως χρωματιστών γυαλιών (φυμέ, μπρονζέ κτλ) τα οποία απορροφούν στο σώμα τους μέρος της ενέργειας. Η αντανάκλαση της ενέργειας επιτυγχάνεται με την μεταλλική επίστρωση του γυαλιού.

Οι ανάγκες του κοινού από τους αντανάκλαστικούς υαλοπίνακες είναι η θερμομόνωση, η ομοιογένεια στο χρώμα, η αισθητική τελειότητα, η ευκολία στην επεξεργασία, η δυνατότητα τεχνικής κατεργασίας και κυρίως η καλύτερη δυνατή σχέση μεταξύ διάδοσης φωτός και ενέργειας.

Είναι φυσικώς αδύνατον ο ηλιακός συντελεστής (διαπερατότητα άμεσης και έμμεσης ηλιακής ενέργειας) να είναι κάτω από το μισό της διαπερατότητας φωτός. Αναζητούμε την χρυσή τομή σε ένα κτίριο ώστε να είναι φωτεινό αλλά να περνάει όσο το δυνατόν λιγότερη θερμότητα.

Η επίστρωση ανακλά την θερμότητα η οποία προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Δεν αποτρέπει, βέβαια, την μετάδοση θερμότητας δια επαφής και μέσω αερίων ρευμάτων. Συνεπώς, είναι ιδανικό για θερμά κλίματα με μεγάλη ηλιοφάνεια καθώς μετριάζει την ηλιακή θερμότητα που εισέρχεται στο χώρο.

#### **ΔΙΠΛΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ- ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ**

Ο ενεργειακός υαλοπίνακας εμποδίζει την εκπομπή της θερμότητας προς τα έξω και για αυτό και ονομάζεται "χαμηλής εκπομπής" ή "Low-E" (Low –Emissivity).

Οι χαμηλής εκπομπής (Low-E) διπλοί υαλοπίνακες αποτελούνται από δύο κομμάτια

γυαλιού εκ των οποίων το ένα γυαλί περιέχει αόρατη σύνθεση μεταλλικών στοιχείων, την αποκαλούμενη χαμηλής εκπομπής επίστρωση.

Ένα λεπτό, αόρατο στρώμα αφήνει να διαχυθεί στο εσωτερικό το φως και η ηλιακή ενέργεια αλλά παράλληλα αποτρέπει την έξοδο της θερμότητας. Το κενό μεταξύ των δύο υαλοπινάκων μπορεί να γεμίσει με ευγενές αέριο για να μειωθεί περαιτέρω ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας U (θερμοπερατότητας).

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός διπλού υαλοπίνακα ο οποίος αποτελείται από δύο υαλοπίνακες πάχους 4mm ο καθένας με διάκενο 12mm μεταξύ τους είναι ίσος με  $2.9W/(m^2 K)$ , ενώ για τον αντίστοιχο διπλό ενεργειακό υαλοπίνακα ο συντελεστής θερμοπερατότητας κυμαίνεται από 1.6 έως  $2.0 W/(m^2 K)$ .

Στους συμβατικούς διπλούς υαλοπίνακες τα 2/3 της απώλειας θερμότητας οφείλονται σε θερμική ακτινοβολία, ενώ το υπόλοιπο 1/3 οφείλεται σε θερμότητα διά επαφής και θερμικά ρεύματα.

Στους διπλούς ενεργειακούς υαλοπίνακες η διάδοση της θερμότητας οφειλόμενη σε ακτινοβολία σχεδόν ελαχιστοποιείται από την επίστρωση έως και 96%. Επιπλέον, η χρήση αερίων στο διάκενο μειώνει την μετάδοση της θερμότητας (U-Value =  $1.1W/m^2 K$  με χρήση Ar) ενώ ακόμα καλύτερη θερμομόνωση επιτυγχάνεται με χρήση θερμομονωτικού πηχακίου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι προδιαγραφές μερικών τύπων ενεργειακού υαλοπίνακα.

ονομασία υαλοπίνακα και θέση επίστρωσης	διαπερα- τότητα	<u>ορατό φως[%]</u>		<u>ηλιακή ενέργεια[%]</u>		απορρό- φηση	ηλιακός συντελε- στης σκίασης	συντελε- στης
		αντανά- κλαση	αντανά- κλαση	διαπερα- τότητα	αντανά- κλαση			
Planibel G (2/3)	74	16/17	60	15/16	25/24	0,66/ 0,72	0,76/ 0,83	1,9
EKO (3)	73	21	64	16	10	0,71	0,82	2,3
ClimaGuard DT (2/3)	72	11/12	53	17/19	30/28	0,58/ 0,68	0,64/ 0,75	1,9

Οι ενεργειακοί υαλοπίνακες πλεονεκτούν καθώς βοηθούν στην εξοικονόμηση των δαπανών για θέρμανση και εγγυώνται την ομοιογενή θερμοκρασία του χώρου. Επιπλέον, εξασφαλίζουν υψηλή διαπερατότητα φωτός και περιορίζουν το φαινόμενο



των υδρατμών. Τέλος, μειώνουν την μετάδοση της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) και βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος από τη μειωμένη εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

### ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Τα παράθυρα και γενικά τα ανοίγματα των κτιρίων συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των χώρων γιατί από τα παράθυρα μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Τον χειμώνα εσωτερική θερμότητα τείνει να διαφύγει προς το εξωτερικό περιβάλλον ενώ το καλοκαίρι γίνεται το αντίθετο. Η θερμομόνωση των χρησιμοποιούμενων υαλοπινάκων συμβάλλει στην μείωση της διαφεύγουσας θερμικής ενέργειας από και προς τις δύο κατευθύνσεις. Μέσα στα πλαίσια της εξασφάλισης ικανοποιητικών συνθηκών διαβίωσης εντός του κτιρίου, αλλά και της εξοικονόμησης ενέργειας, εντάσσεται και η χρήση των αποκαλούμενων θερμομονωτικών υαλοπινάκων. Οι τελευταίοι αποτελούν ένα σύστημα δύο ή τριών, είτε απλών, είτε ανακλαστικών υαλοπινάκων, οι οποίοι διατηρούνται σε απόσταση μεταξύ τους μέσω μεταλλικής κατατομής με συνήθη απόσταση 12mm. Ο εγκλωβισμένος στο διάκενο αέρας βελτιώνει εξαιρετικά τη θερμομονωτική συμπεριφορά του υαλοπίνακα. Χαρακτηριστικά ο συντελεστής θερμοπερατότητας του απλού υαλοπίνακα, ήτοι  $5,8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , ο οποίος στην περίπτωση του διπλού με διάκενο 12mm αποκτά τιμή  $2,8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . Σημειώνεται επίσης, ότι η μεταλλική κατατομή περιέχει πυριτικά άλατα, με σκοπό την αφύγρανση του εγκλωβισμένου αέρα και κατ' επέκταση την αποφυγή του φαινομένου της συμπύκνωσης υδρατμών. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί η δυνατότητα προσθήκης κατάλληλων μιγμάτων αερίων στο διάκενο μεταξύ των υαλοπινάκων, τα οποία βελτιώνουν την απόδοση του συστήματος, όσον αφορά τόσο στις θερμομονωτικές, όσο και στις ηχομονωτικές ιδιότητές του.

Πλεονεκτούν καθώς προσφέρουν αύξηση θερμομόνωσης κατά 30% (τιμή συντελεστή θερμομόνωσης  $K=1,5-1,7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ), μείωση καυσίμων, ελάττωση δημιουργίας CO<sub>2</sub>, είναι φιλικό στο περιβάλλον και μειώνουν κατά 75% τη διέλευση ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος.

Τον χειμώνα δεν επιτρέπουν την μεταφορά της ζέστης από μέσα προς τα έξω, αντιθέτως την αντανακλά πίσω στον εσωτερικό χώρο. Το καλοκαίρι δεν επιτρέπουν την μεταφορά της ζέστης από έξω προς τα μέσα.

Επίσης, μειώνουν στο ελάχιστο την πιθανότητα εμφάνισης υγρασίας (νότισμα) στην εσωτερική πλευρά και δεν εμποδίζουν την είσοδο του ορατού φωτός στο σπίτι.

Είναι άχρωμοι και παρέχουν δυνατότητα επιλογής μεγέθους διακένου ανάμεσα στους δύο υαλοπίνακες, 12mm, 15mm, 19mm για καλύτερη θερμομόνωση.

Συνιστώνται σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα, όπου απαιτείται υψηλή θερμομόνωση του κελύφους.

### Εκτενέστεροι λόγοι χρήσης θερμομονωτικών υαλοπινάκων

Τα παράθυρα ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών θερμότητας σε ένα κτίριο. Οι θερμικές απώλειες ενός κτιρίου οφείλονται κατά 20% στη σκεπή, κατά 25% στους τοίχους, κατά 20% στο δάπεδο και κατά 35% στα παράθυρα. Ο ρυθμός απώλειας θερμότητας  $P(W)$  μέσω μιας επιφάνειας εμβαδού  $S(m^2)$  και συντελεστή θερμοπερατότητας  $U(W/m^2 K)$  για θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T (K)$  μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου δίνεται από την σχέση (1) :

$$P=S*\Delta T*U \quad (1)$$

Σύμφωνα με την σχέση (1) σε ένα διαμέρισμα δεδομένης επιφάνειας τζαμιών και δεδομένης διαφοράς θερμοκρασίας ισχύει η σχέση (2) :

$$\Delta P=\Delta U \quad (2)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν αντί για συμβατικό διπλό υαλοπίνακα ( $U=2.9 W/m^2K$ ) χρησιμοποιήσουμε ενεργειακό διπλό υαλοπίνακα με Arg ( $U=1.1 W/m^2 K$ ) μπορούμε να επιτύχουμε έως και 62% μείωση του U-Value.

Επομένως, το χειμώνα μπορούμε να μειώσουμε την θερμότητα που χάνεται από τα τζάμια έως και 62%.

Το καλοκαίρι αντίστοιχα μπορούμε να μειώσουμε έως και 62% τη θερμότητα που εισέρχεται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (1/3 της ολικής θερμότητας). Επιπλέον, μπορούμε να επιτύχουμε 65% μείωση του ηλιακού συντελεστή SF δηλαδή της θερμότητας που εισέρχεται λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας (2/3 της ολικής θερμότητας) , καθότι ο ηλιακός συντελεστής ενός συμβατικού διπλού υαλοπίνακα είναι SF=75% ενώ για έναν ενεργειακό και ανακλαστικό διπλό υαλοπίνακα με Arg μπορεί να είναι SF=10% . Προκύπτει , δηλαδή, συνολική μείωση της θερμότητας το καλοκαίρι έως 64%.

Επιπλέον, συγκριτικά με τα κουφώματα οι υαλοπίνακες συνεισφέρουν πολύ περισσότερο στην θερμομόνωση και με λιγότερο κόστος. Αν εξετάσουμε το παράδειγμα μιας δίφυλλης μπαλκονόπορτας σε άνοιγμα  $(230cm)*(220cm)=5.06m^2$  (κατά προσέγγιση) παρατηρούμε ότι οι υαλοπίνακες καλύπτουν επιφάνεια  $(200cm)*(200cm)=4.00m^2$  δηλαδή περίπου το 80% της συνολικής επιφάνειας. Συγκρίνοντας για το παράδειγμά μας το κοστολόγιο των κουφωμάτων και των υαλοπινάκων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πληρώνουμε 40% περισσότερο στο κόστος του κουφώματος για να πετύχουμε θερμομόνωση στο 20% του ανοίγματός μας ενώ για το υπόλοιπο 80% αρκεί μια διαφορά 7% στην τιμή. Εκτός αυτού, έχει ενδιαφέρον να συγκρίνουμε και το πόσο μονώνει κάθε υλικό ενός κουφώματος. Παρατηρείται ότι ένας ενεργειακός υαλοπίνακας συμβάλλει περισσότερο στη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος σε σχέση με ένα πλαίσιο από θερμομονωτικό αλουμίνιο ή PVC. Σε κάθε περίπτωση το να προτιμήσει κανείς ειδικούς υαλοπίνακες είναι μια κίνηση που αποσβένεται το πολύ σε 2 χρόνια.

Είναι, επομένως, σαφές ότι οι θερμομονωτικοί υαλοπίνακες συνεισφέρουν στην θερμομόνωση περισσότερο από κάθε άλλο δομικό υλικό του κτιρίου και η χρήση τους έχει ως αποτέλεσμα λιγότερα έξοδα για ψύξη και θέρμανση. Υπάρχουν,

λοιπόν, σημαντικά οικονομικά κίνητρα για την χρήση θερμομονωτικών υαλοπινάκων στα κτίρια. Ιδιαίτερα σημαντικά είναι και τα πολιτικά και οικολογικά κίνητρα καθώς η χρήση θερμομονωτικών υαλοπινάκων συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, στην οικονομία φυσικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, την χρήση τους ενισχύουν και κίνητρα άνεσης καθώς με τους θερμομονωτικούς υαλοπίνακες δημιουργούνται λιγότερα ψυχρά ρεύματα και λιγότερο θάμπωμα των γυαλιών.

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα φωτοβολταϊκά (ή Φ/Β) συστήματα αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον για την Ελλάδα. Εκμεταλλευόμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, «κρύσταλλα») φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή «κυψελών», ή «κυττάρων»), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Δυο τύποι χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο στερεό και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε "μονοκρυσταλλικό" ή "πολυκρυσταλλικό". Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα, και κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ.) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία.

Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ – τα οποία είναι παρά πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους, επικαλυμμένα με ειδικές μεμβράνες και εγκιβωτισμένα σε γυαλί με πλαίσιο από αλουμίνιο – σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ 70-85 W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 200 W ή και παραπάνω.

Η κατασκευή μιας γεννήτριας κρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να γίνει και από ερασιτέχνες, μετά από την προμήθεια των στοιχείων. Το κόστος είναι απίθανο να είναι χαμηλότερο από την αγορά έτοιμης γεννήτριας, καθώς η προμήθεια ποιοτικών στοιχείων είναι πολύ δύσκολη. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο (CdTe) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές, η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, και

έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών. Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από 2 έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).

Ο "βαθμός απόδοσης" εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια "Bell Laboratories" δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη.

Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα πλεονεκτούν καθώς παρέχουν τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον αφού δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα. Έπειτα, με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής.

Η λειτουργία του συστήματος των φωτοβολταϊκών είναι ολοσχερώς αθόρυβη και έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής

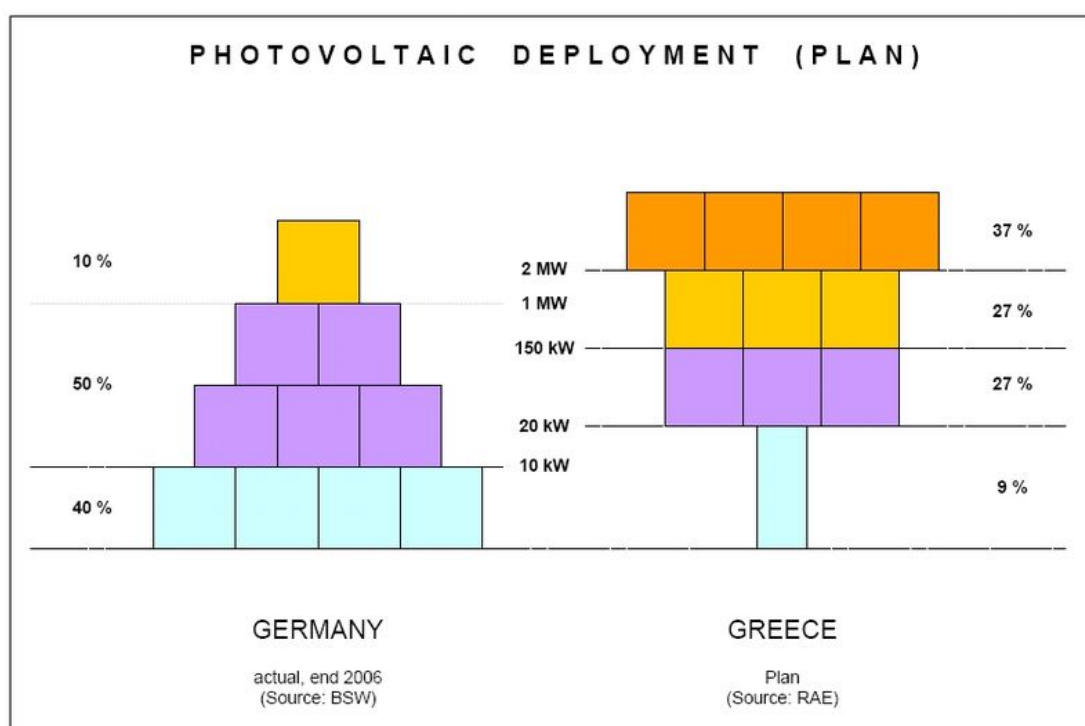
καθώς οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας. Τέλος, υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών και μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.

Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές καθώς τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου, όπως ήδη γίνεται στο Φράιμπουργκ της Γερμανίας.

Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 6000 ευρώ ανά εγκατεστημένο (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, ωστόσο, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα είναι πολλά, και το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα φωτοβολταϊκά ειδικότερα, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο της για το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως προς την ηλιοθερμική ενέργεια η Ελλάδα ήταν πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες, που συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Τώρα μένει να γίνει το ίδιο και ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προϋποθέσεις μάλιστα για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα είναι ακόμα καλύτερες, αφού τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν την μέγιστη παραγωγή ακριβώς εκείνες τις ώρες της ημέρας που και η κατανάλωση (ζήτηση) φτάνει στο μέγιστο και η ΔΕΗ ζητά από όλους τους καταναλωτές να περιορίσουν την ζήτηση ή αναγκάζεται να κάνει περικοπές (ελεγχόμενη συσκότιση).

Πλέον βλέπουμε τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πάρκων σε πολλές περιοχές της χώρας, και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καινούργια ή και παλιότερα σπίτια. Με την τρέχουσα νομοθεσία η Ελληνική πολιτεία στοχεύει στην δημιουργία μεγάλων ως πολύ μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, σε αντίθεση με άλλες χώρες, που όπως η Γερμανία στοχεύουν στην ανάπτυξη πολλών μικρών συστημάτων. Μία σχετική σύγκριση φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Τα στοιχεία του διαγράμματος προέρχονται από τον σύνδεσμο εταιρειών ηλιακής ενέργειας της Γερμανίας (BSW) και από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας.



### ΠΥΡΙΜΑΧΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ

Η συνεχής τάση να χρησιμοποιείται το γυαλί σε εσωτερικές και εξωτερικές εφαρμογές δημιουργεί μια διαφορετική εμφάνιση των κτιρίων λιγότερο έντονη λόγω των διάφανων στοιχείων. Εντούτοις, τα γυάλινα χωρίσματα πρέπει να ανταποκρίνονται στους κανονισμούς πυρόσβεσης σχετικά με τον περιορισμό της φωτιάς και την ασφαλή εκκένωση των κτιρίων. Αυτές οι απαιτήσεις πολύ συχνά καλύπτονται μέσω της χρήσης του πυρίμαχου γυαλιού. Προσφέρονται σε μονολιθικό ή πολυεπίπεδο υαλοπίνακα. Στον πολυεπίπεδο υαλοπίνακα η ουσία που βρίσκεται ανάμεσα, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 120°C, αλλάζει χρώμα και μορφή και αποτρέπει προσωρινά τη διάδοση πυρκαγιάς.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες πυρίμαχων υαλοπινάκων. Οι αλεξίπυροι (κατηγορία E), οι οποίοι αποτρέπουν τη διάδοση της πυρκαγιάς, καπνού και αερίων στους

γειτονικούς χώρους, που δεν καίγονται και οι αλεξίπυροι (κατηγορία EI), οι οποίοι να μην αποτρέπουν τη διάδοση της πυρκαγιάς, καπνού και αερίων στους γειτονικούς χώρους, που δεν καίγονται, αποτρέποντας τη διάδοση των υψηλών θερμοκρασιών, αλλά και εξασφαλίζουν την ασφαλή εκκένωση των ανθρώπων.

Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του υαλοπίνακα οφείλει να μη να αυξηθεί περισσότερο από 140 °C ώστε να παραμείνει ανεπηρέαστη η επιφάνεια. Για την ακρίβεια, η θερμοκρασία οφείλει να μη υπερβεί τους 180 °C.

Προκειμένου να διευκρινιστεί ο χρόνος στον οποίο το γυαλί εκπληρώνει τις ανωτέρω απαιτήσεις υπό την επήρεια φωτιάς, το γυαλί φέρει πάνω του έναν αριθμό που δείχνει το χρόνο (σε min), στον οποίο το πυρίμαχο γυαλί καλύπτει τις αλεξίπυρες απαιτήσεις.

Πλεονεκτούν καθώς παρέχουν υψηλό επίπεδο διαπερατότητας φωτός και πλήρης διαφάνεια. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνοι τους ή σε διπλό υαλοπίνακα και είναι κατάλληλοι για εσωτερικές και εξωτερικές εφαρμογές με την χρήση ενός πρόσθετου UV φίλτρου. Τέλος, χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποτροπής κλοπών και είναι ιδιαίτερα ηχομονωτικοί ενώ έχουν λάβει διάφορες τεχνικές εγκρίσεις.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου οι κανονισμοί των κτιρίων το απαιτούν και όπου ο φυσικός φωτισμός και η διαφάνεια είναι βασικοί παράγοντες όπως νοσοκομεία και εργαστήρια, σχολεία και γραφεία, ξενοδοχεία και εστιατόρια, θέατρα και μουσεία, εμπορικά κέντρα και υπόγειοι σταθμοί, τράπεζες, κ.λπ.

## U-GLASS

Είναι ημιδιαφανές και ανάγλυφο γυαλί το οποίο μοιάζει με επεκταμένο “U” σε διατομή και είναι διαθέσιμο είτε σε αρμέ είτε όχι.

Το αρμέ U-Glass έχει ενσωματωμένο πλέγμα από ανοξείδωτο ατσάλι το οποίο είναι προστατευμένο από διάβρωση επιτρέποντας να χρησιμοποιηθεί υπό συνθήκες υγρασίας.

Έχει πάχος 6 mm , μήκος 1000 έως 7000 mm και πλάτος 270 mm συνολικά. Παρέχει ακουστική απόδοση 20 έως 23dB με μονό περίβλημα και 30 dB με διπλό. Επίσης, η θερμική απόδοσή του είναι 5.5 W/m<sup>2</sup> K με μονό περίβλημα και 3 W/m<sup>2</sup>K με διπλό. Τέλος, παρέχει οπτική διαπεραση έως 75% με μονό περίβλημα και έως 60% με διπλό.

Το U-Glass μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως μονό είτε ως διπλό περίβλημα, με το δεύτερο να προσφέρει καλύτερες μονωτικές ιδιότητες.

Όσον αφορά την ακαμψία-σκληρότητα του, το U-Glass μπορεί να εγκατασταθεί σε μεγάλα ανοίγματα χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετη υποστήριξη. Συνεπώς, μπορεί να παρέχει υψηλά επίπεδα ισομερώς κατανεμημένου φωτός σε χώρους-δωμάτια. Το U-Glass είναι πρακτική λύση για εφαρμογές όπου η διαθεσιμότητα και η ποσότητα του φωτός είναι απαραίτητα: γραφεία, καταστήματα, σκάλες, στέγαστρα, εργοστάσια, αποθήκες, συνεργεία αυτοκινήτων γκαράζ, και υπόστεγα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για βασική πυροπροστασία.

## **ΥΑΛΟΤΟΥΒΛΑ**

Τα τελευταία χρόνια στις σύγχρονες κατασκευές τα υαλότουβλα αποτελούν ένα μοναδικής αισθητικής βασικό δομικό υλικό με αμέτρητες δυνατότητες. Και αυτό διότι προσφέρουν άπλετο φως μέχρι και 75%, θερμομόνωση και ηχομόνωση, ασφάλεια και αντοχή σε κρούσεις και δυνατότητα απομόνωσης ενός χώρου χωρίς να μειώνουν το φωτισμό. Επίσης, είναι εύκολα στην τοποθέτηση, αντικαθιστούν τα παράθυρα εκεί που απαγορεύονται και δεν χρειάζονται συντήρηση, σοβάντισμα, βάψιμο.

Τα υαλότουβλα μπορεί να είναι διαφανή, έγχρωμα, αμμοβολής, με διάφορες συνθέσεις, fusing, επίσης για εξαερισμό χώρων, σε πλαίσια για δημιουργία παράθυρων. Με τα καμπύλα και τα γωνιακά υαλότουβλα μπορούν να υλοποιηθούν και τα πιο περίπλοκα αρχιτεκτονικά σχέδια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν στοιχείο της όψης των κτιρίων, συμβάλλοντας καθοριστικά στο σχεδιασμό τους. Τέλος, παρέχουν δυνατότητα εξαερισμού στο χώρο σε συνδυασμό με ειδικά πλαίσια παραθύρου (ενός - δύο - τεσσάρων υαλότουβλων) και έχουν μεγάλη αντοχή σε κτυπήματα εξασφαλίζοντας ασφάλεια όταν τοποθετούνται στους εξωτερικούς τοίχους.

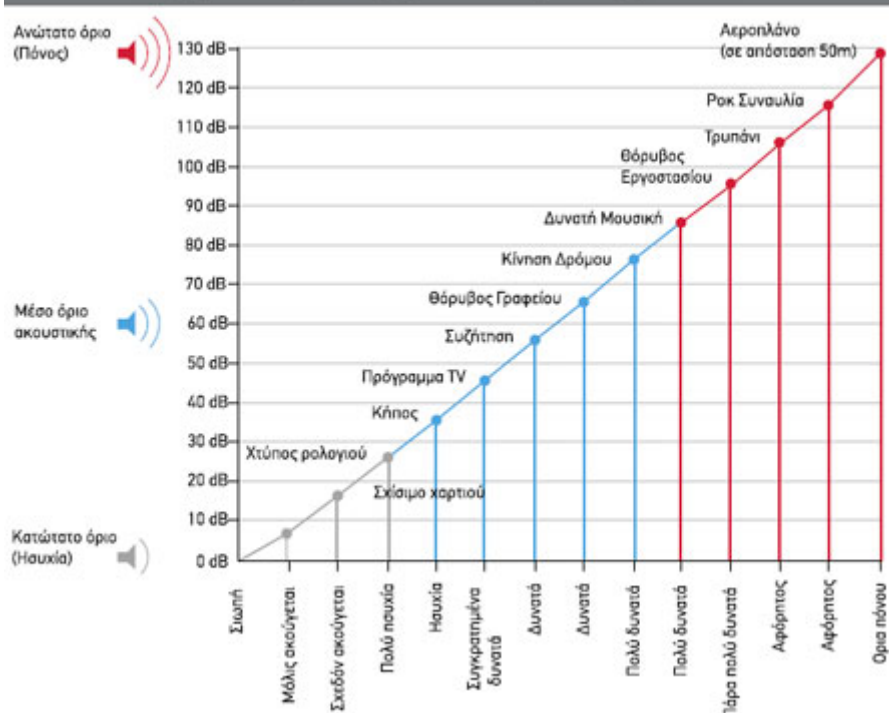
## **ΗΧΟΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ**

Η προστασία ενάντια στην ηχορύπανση είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα. Η αντίληψη μας για τον θόρυβο υπόκειται στην ακόλουθη αρχή: εάν το επίπεδο θορύβου σε ένα δωμάτιο μειώνεται κατά 1dB σε σχέση με μία εξωτερική πηγή θορύβου, είναι σαν η ένταση να μειώνεται στο μισό.

Η ηχομονωτική προστασία πρέπει να εφαρμόζεται παντού όπου ο θόρυβος δεν μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούμε πολυεπίπεδους υαλοπίνακες συνδυασμένους με διπλούς υαλοπίνακες.



## Σύγκριση Πηγών Θορύβου και Πώς Αντιλαμβάνονται



Στην περίπτωση των διπλών υαλοπινάκων η κατασκευή τους βασίζεται στην ασυμμετρία των υαλοπινάκων και στη χρήση των αερίων στο κενό μεταξύ τους. Οι υαλοπίνακες αυτοί δύναται να επιτύχουν συντελεστή ηχομόνωσης  $R_w = 30 - 53$  dB, ανάλογα με τον τύπο. Πριν επιλεγεί η κατάλληλη σύνθεση, η πηγή θορύβου πρέπει να διευκρινιστεί όπως πρέπει να προσδιοριστούν και άλλοι παράγοντες. Κατά τον καθορισμό της πηγής θορύβου χρησιμοποιείται ο αποκαλούμενος ακουστικός συντελεστής μόνωσης  $R_w$  και οι διορθωτικοί συντελεστές C και Ctr. Ο  $R_w$  δηλώνει τον αριθμό decibels που απομονώνει ο υαλοπίνακας χωρίς να περιγράφει τη ζώνη συχνοτήτων αλλά δίνει μια μέση τιμή μεταξύ 100 και 3150 Hz.

Συντελεστές ηχομόνωσης κατά EN 12354-3: 2002	Πάχος-Δομή [mm ]	Συντελεστές ηχομόνωσης στις μέσες συχνότητες [Hz ]						Συντελεστές ηχομόνωσης και προσαρμοσμένοι συντελεστές [dB]		
		125	250	500	1k	2k	4k	Rw	Ctr	C
Ο πίνακας παρουσιάζει τις τιμές του ακουστικού συντελεστή μόνωσης $R_w$ καθώς επίσης	Μονολιθικός υαλοπίνακας									
	3	14	19	25	29	33	25	28	-4	-1
	4	17	20	26	32	33	26	29	-3	-2
	5	19	22	29	33	29	31	30	-2	-1
	6	18	23	30	35	27	32	31	-3	-2
8	20	24	29	34	29	37	32	-3	-2	

και το συντελεστή R για τις διαφορηγητικές συχνότητες.	10	23	26	32	31	32	39	33	-3	-2
	12	27	29	31	32	38	47	34	-2	0
	Πολυεπίπεδος υαλοπίνακας <b>UV-LAM</b>									
<b>Rw</b> - ακουστικός συντελεστής μόνωσης (μέση τιμή)	6,4 ( <b>UV-LAM</b> 33.1)	20	23	29	34	32	38	32	-3	-1
	8,8 ( <b>UV-LAM</b> 44.2)	20	25	32	35	34	42	33	-3	-1
	9,5 ( <b>UV-LAM</b> 44.4)	24	26	33	33	35	44	34	-3	-1
Διπλός υαλοπίνακας										
<b>Ctr</b> - διορθωτικός συντελεστής για πηγές που περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό χαμηλών συχνοτήτων, π.χ κυκλοφοριακός θόρυβος	4 (6-16) /4	21	17	25	35	37	31	29	-4	-1
	6 (6-16) /4	21	20	26	38	37	39	32	-4	-2
	6 (6-16) /6	20	18	28	38	34	38	31	-4	-1
	8 (6-16) /6	20	21	33	40	36	48	35	-6	-2
	10 (6-16) /4	24	21	32	37	42	43	35	-5	-2
	10 (6-16) /6	24	24	32	37	37	44	35	-3	-1
	6,4 ( <b>UV-LAM</b> 33.1) / (6-16) /6	20	19	30	39	37	46	33	-5	-2
<b>C</b> - διορθωτικός συντελεστής για πηγές που περιέχουν μικρό αριθμό χαμηλών συχνοτήτων π.χ λεωφόρους, τρένα, παιδικές χαρές.	6,4 ( <b>UV-LAM</b> 33.1) / (6-16) /10	24	25	33	39	40	49	37	-5	-1

### ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Με τη μέθοδο της θερμικής καταψύξεως είναι εφικτή η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υαλοπίνακα και πιο συγκεκριμένα παρατηρείται αύξηση της αντοχής αυτού σε κρούση, καθώς και αύξηση της αντοχής σε φορτία. Επίσης σημαντική είναι η βελτίωση της θερμικής αντίστασης που δύναται να παρουσιάσει ο υαλοπίνακας, γεγονός το οποίο συνεπάγεται αυξημένη αντοχή στις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό των υαλοπινάκων ασφαλείας είναι η ασφαλής θραύση τους. Πιο συγκεκριμένα, καθώς ο υαλοπίνακας βρίσκεται υπό υψηλή επιφανειακή τάση, κατά τη θραύση του απελευθερώνει όλη τη συσσωρευμένη σε αυτόν ενέργεια, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών και ακίνδυνων πρακτικά θραυσμάτων. Τέλος πρέπει να σημειωθεί, ότι η όποια επιθυμητή κατεργασία –κοπή, διάνοιξη οπών, κλπ- είναι απαραίτητο να

πραγματοποιηθεί πριν τη διαδικασία θερμικής σκλήρυνσης, καθώς σε συνέχεια αυτής δεν είναι εφικτή.

### **ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟΙ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ**

Επίσης ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η χρήση των αποκαλούμενων συγκολλημένων υαλοπινάκων, οι οποίοι προκύπτουν από τη συγκόλληση δύο ή περισσότερων υαλοπινάκων –απλών ή ασφαλείας-, συνήθως μέσω πολυβινυλοβουτυρικών μεμβρανών –PVB. Η συγκόλληση των υαλοπινάκων πραγματοποιείται με θέρμανση και μετέπειτα πίεση. Οι εν λόγω υαλοπίνακες παρουσιάζουν γενικά ικανοποιητική αντοχή στις κρούσεις, η οποία εξαρτάται όμως πέρα από τον αριθμό και το πάχος, τόσο των υαλοπινάκων, όσο και των μεμβρανών, από τη σχέση συνάφειας την οποία παρουσιάζει ο υαλοπίνακας με τη μεμβράνη. Αναλυτικότερα, υπάρχει απαίτηση για δυνατότητα αποκόλλησης της μεμβράνης από τον υαλοπίνακα, καθώς το γεγονός αυτό συνεπάγεται τη δυνατότητα παραμόρφωσης της μεμβράνης και κατ' ουσία τη δυνατότητα απορρόφησης της δημιουργούμενης από την κρούση κινητικής ενέργειας από αυτή κυρίως και όχι από τον υαλοπίνακα. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι το εν λόγω σύστημα υαλοπινάκων διακρίνεται για την παροχή ασφάλειας κατά τη χρήση, καθώς σε περίπτωση θραύσης τα κομμάτια γυαλιού συγκρατούνται στη θέση τους με τη βοήθεια των ενδιάμεσων μεμβρανών.

### **ΆΛΛΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΩΝ**

Το θέμα της τεχνολογίας των σύγχρονων υαλοπινάκων είναι ιδιαίτερα ευρύ και δεν είναι εφικτό να καλυφθεί με κάθε λεπτομέρεια. Αναφέρονται λοιπόν με συντομία και άλλοι τύποι υαλοπινάκων, οι οποίοι εφαρμόζονται προκειμένης της κάλυψης των προαναφερθέντων αναγκών –βιολογική άνεση του χρήστη, εξοικονόμηση ενέργειας- και όχι μόνο. Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες λοιπόν, φέρουν διαφανές φιλμ, το οποίο όταν αποκτήσει θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του εσωτερικού χώρου μετατρέπεται σε αδιαφανές, αντανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μόνο όταν η θερμοκρασία αποκτήσει το δέον επίπεδο. Αντίστοιχης φιλοσοφίας είναι και οι φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες, με τη διαφορά ότι η όποια μεταβολή πραγματοποιείται στο βαθμό διαφάνειάς τους, σχετίζεται με την ένταση του φυσικού φωτός. Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες με τη σειρά τους μετατρέπονται και αυτοί από αδιαφανείς σε διαφανείς και αντίστροφα, μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικής τάσης. Αναλυτικότερα, εμπεριέχουν ένα φιλμ υγρών κρυστάλλων, οι οποίοι όντας σε άτακτη διάταξη, επιτρέπουν με τη δίοδο του φωτός, προκαλούν δε διάχυση του τελευταίου, με αποτέλεσμα ο υαλοπίνακας να καθίσταται αδιαφανής. Η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης συνεπάγεται τον προσανατολισμό των κρυστάλλων και κατ' επέκταση τη διαφάνεια του υαλοπίνακα. Μία ακόμη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των υαλοπινάκων, είναι η εφαρμογή των ολογραφικών φιλμ. Τα συγκεκριμένα, μέσω των ανακλαστικών ιδιοτήτων τους, έχουν τη δυνατότητα να φωτίζουν, αλλά και να θερμαίνουν, ακόμη και τα πλέον απομακρυσμένα σημεία ενός χώρου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΘΡΑΥΣΗ ΚΑΙ ΦΘΟΡΑ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ**

Οι παράγοντες φθοράς του γυαλιού διακρίνονται σε χημικούς, βιολογικούς και μηχανικούς.

### **ΧΗΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

#### **Η επίδραση του νερού**

Το νερό είναι ο σημαντικότερος παράγοντας φθοράς του γυαλιού. Αρχικά, η διάβρωση του γυαλιού από το νερό θεωρήθηκε σαν μια απλή ιοντοεναλλαγή μεταξύ των αλκαλίων του γυαλιού και των πρωτονίων (H<sup>+</sup>) του νερού. Ο Newton εξέτασε το ενδεχόμενο της τροποποίησης της θεωρίας της απλής ανταλλαγής μεταξύ μονοσθενών ιόντων και την αντικατάστασή της με αυτή της εσωτερικής διάλυσης μορίων νερού. Διαπιστώνεται επίσης ότι για τη διαδικασία αυτή καθοριστικό ρόλο παίζουν η διάχυση του διαβρωτικού διαλύματος και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του γυαλιού.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του γυαλιού από το νερό είναι το βάρος των κόκκων του γυαλιού που χρησιμοποιείται και η γυάλινη επιφάνεια που έχει εκτεθεί, η αναλογία του βάρους του γυαλιού προς το διαβρωτικό διάλυμα, η φύση του διαβρωτικού διαλύματος και η συχνότητα αντικατάστασής του και η θερμοκρασία της διαδικασίας διάβρωσης.

#### **Η επίδραση του pH του διαλύματος**

Κατά την επίδραση του νερού πάνω σε μια γυάλινη επιφάνεια συμβαίνουν αλλαγές στην επιφάνεια του γυαλιού, όπως ακριβώς και στο νερό, το οποίο μετατρέπεται σε ελαφρά όξινο ή αλκαλικό διάλυμα, κάτι που εξαρτάται από τα αλκάλια και από το διοξείδιο του πυριτίου που εκπλένονται από το γυαλί και από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το pH του διαλύματος εξαρτάται από την συγκέντρωση των αλκαλίων, καθώς επίσης και από την αναλογία οξειδίων των αλκαλίων προς το διοξείδιο του πυριτίου. Οι δύο αυτοί παράγοντες αλλάζουν με το πέρασμα του χρόνου και επομένως αλλάζει και το pH του διαλύματος.

Η μικρή διαλυτότητα του διοξειδίου του πυριτίου, που περιέχει το γυαλί, στο νερό είναι ένας από τους κύριους παράγοντες διάβρωσης του γυαλιού. Σε κανονικές θερμοκρασίες η διαλυτότητα για τον χαλαζία είναι της τάξης των 6ppm αλλά

παράλληλα η πολύ αργή ενυδάτωσή του δημιουργεί μια μεγάλη ανθεκτικότητα στην επίδραση του νερού.

Η έκπλυση διοξειδίου του πυριτίου από το γυαλί στο διάλυμα είναι πολύ μικρή και συνεχής για τιμές pH μικρότερες από 9, ενώ αυξάνει με περαιτέρω αύξηση του pH. Όταν το pH του διαλύματος πλησιάζει την τιμή 9, τότε το πλέγμα του διοξειδίου του πυριτίου του γυαλιού καταρρέει καθώς σπάζουν οι δεσμοί που το συγκρατούν. Ειδικότερα, η διαλυτότητα του διοξειδίου του πυριτίου παρουσιάζει διαφορές σε τρεις περιοχές του pH. Στην πρώτη ζώνη, με  $\text{pH} < 10$ , η διαλυτότητα φθάνει περίπου τα  $6.31 \cdot 10^{-6}$  moles/lit. Στην δεύτερη ζώνη, με pH μεταξύ 10 και 12, παρουσιάζεται σχετικά μεγάλη διαλυτότητα. Στην τρίτη ζώνη, με  $\text{pH} > 12$  παρουσιάζεται ακόμη μεγαλύτερη διαλυτότητα.

Η έκπλυση αλκαλίου, για τιμές pH μικρότερες του 9, βρέθηκε ότι είναι γραμμική και ανεξάρτητη από το pH του διαλύματος. Για τιμές μεγαλύτερες του 9, ο ρυθμός επιβραδύνεται με την αύξηση του pH.

#### **Επίδραση της περιοχής του γυαλιού που δέχεται προσβολή**

Τα ποσά των διαφόρων συστατικών ενός γυαλιού που εκπλένονται είναι ανάλογα με τη περιοχή του γυαλιού που εκτίθεται στη διάβρωση.

#### **Επίδραση του λόγου της περιοχής της επιφάνειας που δέχεται προσβολή προς τον όγκο του διαβρωτικού διαλύματος**

Έχει αποδειχθεί ότι η ποσότητα του υλικού που εκπλένεται από το γυαλί είναι ανάλογη με το λόγο της επιφάνειας του γυαλιού προς τον όγκο του διαβρωτικού διαλύματος.

#### **Επίδραση της θερμοκρασίας**

Η ποσότητα του αλκαλίου που εκπλένεται σε ορισμένη χρονική περίοδο, αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Περίπου διπλασιάζεται σε κάθε  $8-15^{\circ}\text{C}$  ανάλογα με την σύσταση του γυαλιού και το είδος του αλκαλίου.

#### **Επίδραση της συχνότητας αντικατάστασης του διαβρωτικού διαλύματος**

Έχει μελετηθεί η επίδραση της αντικατάστασης του διαβρωτικού διαλύματος και βρέθηκε μια σημαντική αύξηση της έκπλυσης του διοξειδίου του πυριτίου καθώς ο αριθμός των αντικαταστάσεων του διαλύματος μειωνόταν. Βρέθηκε επίσης, ότι η έκπλυση του αλκαλίου δεν παρουσιάζει καθορισμένη συμπεριφορά.

## **Επίδραση των συμπλόκων**

Στο έδαφος υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός χημικών ή συμπλόκων ουσιών, π.χ. αμίνες, νιτρικά άλατα, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της διάβρωσης επομένως και στη σταθερότητα του γυαλιού.

## **Υγρασία**

Η επίδραση του νερού στο γυαλί γίνεται είτε μέσω της υγρής φάσης είτε μέσω της αέριας (υγρασίας). Όταν το νερό βρίσκεται σε αέρια φάση, ένας σημαντικός αριθμός μορίων απορροφούνται από την επιφάνεια του γυαλιού, ανάλογα με τη τιμή της σχετικής υγρασίας. Έχει αποδειχθεί, με τη βοήθεια της υπέρυθρης φασματοσκοπίας, ότι η απορρόφηση αυτή αυξάνει με τις αντίστοιχες αυξήσεις του χρόνου και της τιμής της σχετικής υγρασίας. Το παραπάνω φαινόμενο συμβαίνει σε υγιή αλλά και σε διαβρωμένα γυαλιά, των οποίων η επιφάνεια έχει πλέον τη μορφή άμορφου διοξειδίου του πυριτίου.

Η επίδραση της υγρασίας, με τιμή σχετικής υγρασίας 100%, έχει το ίδιο αποτέλεσμα σχηματισμού ενυδατωμένου επιφανειακού στρώματος που παρατηρείται κατά τη διάβρωση του γυαλιού από το νερό. Παρ' όλα αυτά μία τιμή της σχετικής υγρασίας 85% δεν έχει το ίδιο αποτέλεσμα.

Ο Adlerborn παρουσίασε μία συστηματική μελέτη της διάβρωσης του γυαλιού με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Χρησιμοποίησε γυαλιά διαφόρων συστάσεων σε ξηρές και υγρές συνθήκες. Κατά τη μελέτη του τα γυαλιά ήταν αφυγρασμένα. Έδειξε ότι, οι υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας δημιουργούν κέντρα διάβρωσης στο γυαλί και ευνοούν τη συσσώρευση των προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του γυαλιού ή την ανάπτυξη της διαβρωτικής ικανότητας των ουσιών αυτών ή ευνοούν και τα δύο μαζί.

## **Συμπύκνωση**

Στη συμπύκνωση διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη, ο βαθμός συμπύκνωσης επιτρέπει την απομάκρυνση προϊόντων διάβρωσης από την επιφάνεια του γυαλιού, ενώ στη δεύτερη τα προϊόντα διάβρωσης μένουν στην επιφάνεια του γυαλιού.

Έχει αποδειχθεί ότι η συμπύκνωση της πρώτης μορφής είναι λιγότερο καταστροφική από την έκθεση σε συνθήκες 100% σχετικής υγρασίας και ότι η τοποθέτηση ενός γυαλιού σε συνθήκες υγρασίας είναι λιγότερο καταστροφική από τη συνεχιζόμενη κυκλική συμπύκνωση σε χρονικό διάστημα δύο μηνών.

Η συμπύκνωση της δεύτερης μορφής, είναι δυνατόν να επιτρέψει τον τοπικό σχηματισμό διαλυμάτων υψηλών τιμών του pH τα οποία μπορούν να ευνοήσουν τη διάβρωση του γυαλιού στις συγκεκριμένες περιοχές.

### **ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

Μικροοργανισμοί όπως βρύα, λειχήνες και φύκη δεν προσβάλλουν το καθαρό γυαλί διότι δεν τρέφονται από κάποιο συστατικό του. Για να μπορέσουν να κρατηθούν στην επιφάνεια του γυαλιού, πρέπει να υπάρχει σε αυτή κάποια ακαθαρσία, λίπος ή κρατήρας. Η ανάπτυξη των λειχήνων επίσης δεν διαβρώνει άμεσα το γυαλί αλλά έμμεσα λόγω της κατακράτησης νερού στην επιφάνειά του.

Επίσης, οι μικροοργανισμοί κατακρατούν την υγρασία του περιβάλλοντος, ακόμη και σε σχετικά ξηρό περιβάλλον, την οποία δεσμεύουν με αποτέλεσμα το γυαλί να έρχεται σε συχνότερη επαφή με το νερό και να διαβρώνεται ευκολότερα. Οι μύκητες εξάλλου, σαν μέρος της φυσικής τους λειτουργίας, εκκρίνουν νερό και μπορούν να μεταφέρουν το νερό από το ένα σημείο της επιφάνειας στο άλλο με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Στις διάφορες συμβιώσεις μικροοργανισμών έχουμε εκκρίσεις διαφόρων οργανικών οξέων με αποτέλεσμα την ελάττωση του pH της επιφάνειας σε τιμές μεταξύ 2 και 4. Σε άλλες περιπτώσεις έχουμε εκκρίσεις αμμωνίας με αποτέλεσμα την αύξηση του pH της επιφάνειας σε τιμές μεγαλύτερες του 10.

Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι με την παρουσία των μικροοργανισμών σχηματίζονται βιοστρώματα, που προκαλούν μεταβολές στη διάχυση, στην αγωγιμότητα και στην φυσική συμπεριφορά των επιφανειών σχετικά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Επίσης προκαλείται επιλεκτική οξείδωση ή σταδιακή έκπλυση διαφόρων στοιχείων.

### **ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

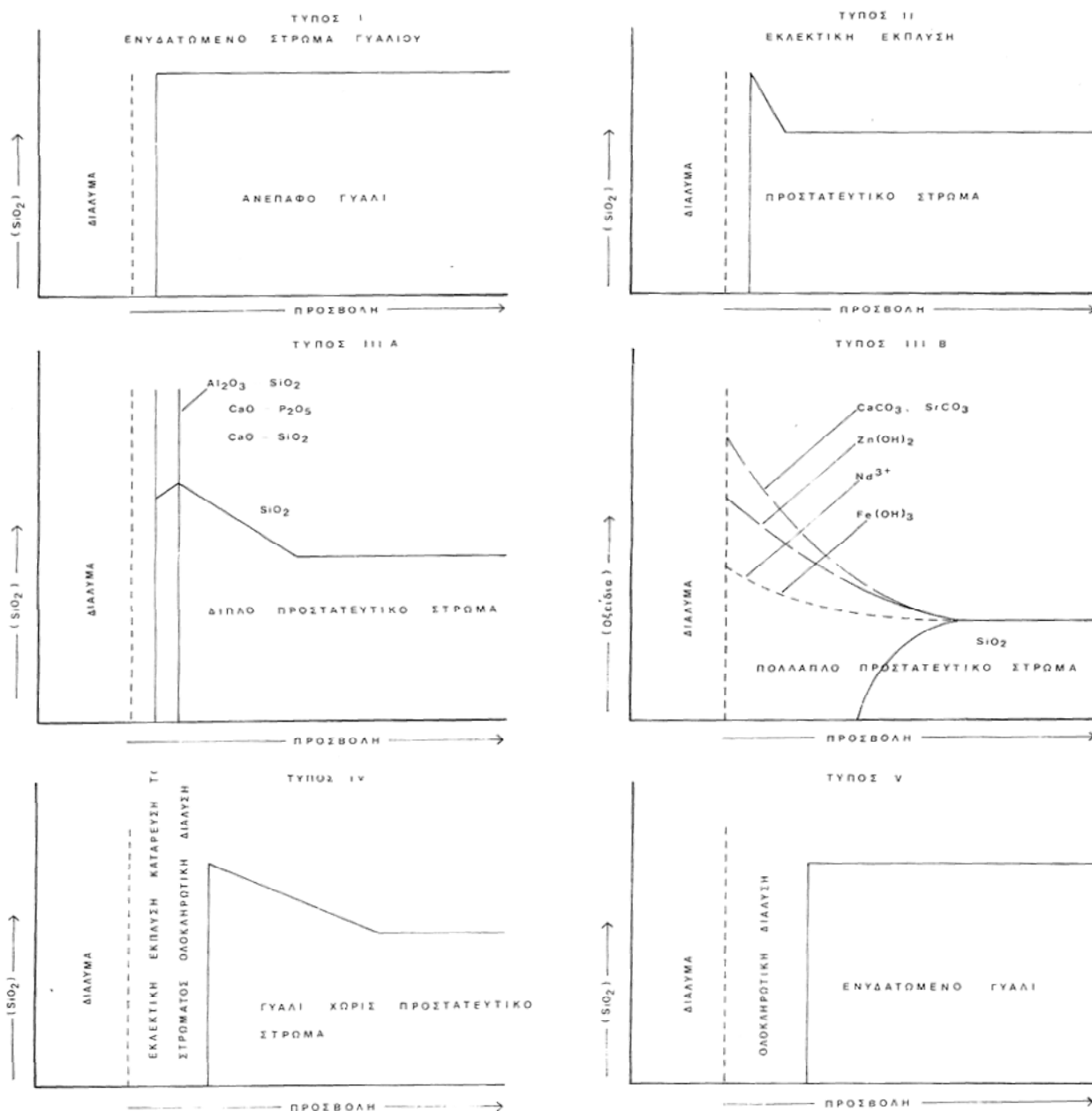
Η ενέργεια της θραύσης της επιφάνεια του γυαλιού, εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και από την σύσταση του γυαλιού. Το γυαλί παραμορφώνεται μηχανικά σύμφωνα με τον μηχανισμό ροής ιξώδους. Ο ρυθμός παραμόρφωσης του γυαλιού, εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της πίεσης, καθώς επίσης από την δομή και την σύσταση του γυαλιού. Η πίεση που απαιτείται για να προκληθεί η παραμόρφωση είναι μικρότερη στις υψηλές θερμοκρασίες διότι οι δεσμοί είναι ήδη πιεσμένοι εξαιτίας της θερμότητας.

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός γυαλιού επηρεάζονται όχι μόνο από την σύστασή του αλλά και από την θερμική κατεργασία που αυτό έχει υποστεί.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ

### Ταξινόμηση κατά Hench και Clark

Οι Hench και Clark μελέτησαν και κατέγραψαν τους διαφορετικούς τύπους επιφανειών του γυαλιού, σαν το αποτέλεσμα της διάβρωσής του από το νερό. Οι έξι αυτοί τύποι παρουσιάζονται διαγραμματικά και αναλύονται παρακάτω:



1.Ο πρώτος τύπος επιφάνειας, παρουσιάζει πολύ λεπτό και μικρότερο από 5 mm ενυδατωμένο στρώμα, το οποίο δεν παρουσιάζει κάποια αλλαγή στη σύσταση με



την έκπλυση αλκαλίου ή διοξειδίου του πυριτίου. Έτσι παρουσιάζεται ένα υπερβολικά σταθερό γυαλί που έχει εκτεθεί σε διάλυμα ουδέτερου pH (pH=7).

2.Ο δεύτερος τύπος επιφάνειας, παρουσιάζει προστατευτικό στρώμα πλούσιο σε διοξείδιο του πυριτίου, από το οποίο το αλκάλι έχει εκπλυθεί, αλλά το δίκτυο του γυαλιού δεν έχει καταστραφεί. Το γυαλί που περιγράφεται είναι πολύ σταθερό με ένα διάλυμα του οποίου το pH είναι μικρότερο του 9.

3.Ο τρίτος τύπος επιφάνειας διαχωρίζεται σε δύο περιπτώσεις :

α) στην πρώτη περίπτωση έχει προστεθεί στο γυαλί αλουμίνα (οξείδιο του αλουμινίου) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ένα διπλό προστατευτικό στρώμα. Η προσβολή του γυαλιού από ένα υδατικό διάλυμα οδηγεί στο σχηματισμό ενός στρώματος πλούσιου σε πυριτικό αργίλιο το οποίο βρίσκεται πάνω σε ένα πλούσιο σε διοξείδιο του πυριτίου στρώμα. Τέτοιου είδους γυαλιά παρουσιάζουν εξαιρετική σταθερότητα σε όξινα και αλκαλικά διαλύματα.

Τα γυαλιά των τύπων 2. και 3α. εμφανίζονται σχετικά διαυγή και χωρίς στίγματα, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να θεωρηθούν σαν μη διαβρωμένα. Παρόλα αυτά η εκτεταμένη έκπλυση του αλκαλίου θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενυδατωμένου γυαλιού.

β) στην δεύτερη περίπτωση αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται πολλαπλά προστατευτικά στρώματα που περιέχουν οξείδια, υδροξείδια μετάλλων και ενυδατωμένο διοξείδιο του πυριτίου. Τα στρώματα αυτά σχηματίζονται σε σύνθετους τύπους γυαλιών που έχουν χάσει τον πυρήνα τους.

4. ο τέταρτος τύπος επιφάνειας, παρουσιάζει επίσης ένα στρώμα πλούσιο σε διοξείδιο του πυριτίου, του οποίου όμως η συγκέντρωση δεν επαρκεί για να προστατεύσει το γυαλί από την έκπλυση του αλκαλίου ή την καταστροφή του πλέγματος.

5. ο πέμπτος τύπος, είναι διαλυτός στο διαβρωτικό διάλυμα, ακόμη κι αν κάτι τέτοιο συμβαίνει πολύ αργά. Επειδή η προσβολή συμβαίνει ομοιόμορφα, η σύσταση της επιφάνειας είναι η ίδια με αυτή της μάζας του γυαλιού. Ο τύπος αυτός του γυαλιού μπορεί εύκολα να εμφανίσει εγχαράξεις και εκδορές. Όταν αυτά είναι βαθύτερα από 0.2μ οι γρατζουνιές σχηματίζουν μικρές κοιλότητες όπου το εκπλυμένο αλκάλι μπορεί να συγκεντρωθεί και να προκαλέσει μια σταδιακή τοπική προσβολή στην επιφάνεια του γυαλιού.

## ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ

### **Θόλωμα**

Αποτελεί την πιο απλή μορφή διάβρωσης, σύμφωνα με την οποία ένα γυαλί χάνει την αρχική του διαύγεια και διαφάνεια και γίνεται σταδιακά αδιαφανές. Αυτός ο τύπος διάβρωσης είναι εύκολο να διαχωριστεί από το θόλωμα που προέρχεται εξαιτίας γρατζουνιών ή λεκέδων.

### **Εφίδρωση**

Το φαινόμενο αυτό διάβρωσης εμφανίζεται σε γυαλιά με μικρό ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου στη σύστασή τους, μικρότερο του επιθυμητού, και περίσσεια αλκαλίου. Τα γυαλιά αυτά παρουσιάζουν ολισθηρότητα στην επιφάνεια ή σταγόνες υγρασίας αν εκτεθούν σε υγρή ατμόσφαιρα. Κατά την εφίδρωση συμβαίνει έκπλυση του αλκαλίου από την μάζα του γυαλιού.

### **Μικρορηγμάτωση**

Τα γυαλιά που παρουσιάζουν μικρορηγμάτωση της επιφάνειάς τους, έχουν μειωμένη διαφάνεια και μη διαυγή εμφάνιση, εξαιτίας της παρουσίας πολλών μικρών επιφανειακών ρωγμών. Σε εξέταση κάτω από το μικροσκόπιο, το δίκτυο των μικρορηγματώσεων μπορεί να γίνει εμφανές. Σε έντονα διαβρωτικές συνθήκες τμήματα γυαλιού μπορούν να απολεπιστούν, ενώ παρουσιάζουν προβλήματα και από την έκπλυση αλκαλικών ιόντων. Τα γυαλιά που παρουσιάζουν μικρορηγμάτωση ή εφίδρωση χαρακτηρίζονται σαν «άρρωστα γυαλιά».

Ο Brill ανέλυσε την σύσταση των «άρρωστων γυαλιών» και βρήκε ότι αυτά περιέχουν μικρή ποσότητα οξειδίου του ασβεστίου και μεγάλες ποσότητες αλκαλίων. Τα γυαλιά αυτά αναπτύσσουν την επιφάνεια τύπου 5. Αποδείχθηκε ότι τα γυαλιά αυτού του τύπου πρέπει να διατηρούνται σε περιβάλλον με σχετική υγρασία χαμηλότερη του 42% ώστε να εμποδίζεται η μετακίνηση των αλκαλικών ιόντων στην επιφάνειά τους.

### **Αρχόμενη μικρορηγμάτωση**

Αυτός ο τύπος διάβρωσης αναφέρεται σε γυαλιά που βρίσκονται στο πρώτο στάδιο μικρορηγμάτωσης. Εμφανίζεται σε γυαλιά που ανήκουν σε επιφάνεια του τύπου 4 μιας και τα γυαλιά αυτά έχουν μεγάλου πάχους ενυδατωμένη επιφάνεια, η οποία φαίνεται λαμπερή και υγιής, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι. Γυαλιά στα οποία το φαινόμενο είναι πιο έντονο, ανήκουν στην επιφάνεια τύπου 5.

Τέτοιου είδους γυαλιά μπορούν να αναπτύξουν τη μορφή αυτή της διάβρωσης αν εκτεθούν σε σχετική υγρασία χαμηλότερη του 20% ή θερμανθούν από κάποια λάμπα.

### **Ρηγμάτωση**

Η ρηγμάτωση ενός γυαλιού μπορεί να οφείλεται είτε στην εφαρμογή πίεσης στην επιφάνειά του είτε στην αυθόρμητη ρηγμάτωση αυτής. Τα αίτια της αυθόρμητης ρηγμάτωσης θεωρούνται ότι είναι:

α. αρχικά, ο σχηματισμός ενός επιφανειακού ενυδατωμένου στρώματος γυαλιού και κατόπιν η αφύγρυσή του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε συρρίκνωση του στρώματος αυτού. Οι πιέσεις που δημιουργούνται κατά την συρρίκνωσή του, μπορούν να σχηματίσουν ρωγμές στην επιφάνεια ή κάθετα στο επιφανειακό στρώμα, κάτι που πολλές φορές οδηγεί σε ολική καταστροφή από τον αλλεπάλληλο θρυμματισμό του (φαινόμενο ζαχάρωσης). Η αφυδάτωση της ενυδατωμένης επιφάνειας τύπου 4 αποτελεί φαινόμενο διάβρωσης το οποίο έχει χαρακτηριστεί σαν πάγωμα, εξαιτίας της μορφολογικής ομοιότητάς του με την εντύπωση που προκαλεί η πάχνη στα τζάμια των παραθύρων.

β. μια αμυδρή εκδορά της επιφάνειας που μπορεί να οδηγήσει σε κοχλιωτή ρηγμάτωση της μιας πλευράς της. Αυτές οι χαρακτηριστικές ρωγμές μεγαλώνουν με ένα σπειροειδή τρόπο φτάνοντας ξανά στην επιφάνεια του γυαλιού, σχηματίζοντας χαρακτηριστικές ρωγμές.

γ. εκδορά σε μια επιφάνεια τύπου 5 που διαπερνά σε βάθος το επιφανειακό στρώμα και οδηγεί σε μια επιταχυνόμενη διάβρωση κάτω από τη ρωγμή. Αυτό είναι ένα σπάνιο φαινόμενο, έχει όμως επιβεβαιωθεί πειραματικά.

Με τον όρο ρηγμάτωση λόγω καταπόνησης, περιγράφεται ένα δίκτυο ενός ατελείωτου αριθμού ρωγμών που καλύπτουν την επιφάνεια ενός γυάλινου αντικειμένου δίνοντάς της ζαχαρώδη μορφή. Το φαινόμενο θεωρήθηκε είτε σαν το αποτέλεσμα της αφυάλωσης που προκλήθηκε από γρήγορη ανόπτηση του αντικειμένου, είτε σαν αποτέλεσμα της αφύγρυνσης της ενυδατωμένης επιφάνειας του γυαλιού.

### **Απώλεια υαλώδους φάσης**

Η έσχατη μορφή διάβρωσης είναι αυτή της απώλειας της υαλώδους φάσης. Το γυαλί μετατρέπεται σε μια άμορφη μάζα ζελέ διοξειδίου του πυριτίου, η οποία είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί.

## **Δημιουργία αλλεπάλληλων στρωμάτων ή φυλλώδης διάβρωση**

Τα αδιαφανή γυαλιά με ιριδισμούς, συνήθως παρουσιάζουν επιφανειακά στρώματα που απολεπίζονται. Η εξέταση των στρωμάτων αυτών, δείχνει ότι αποτελούνται από λεπτότερα αλλεπάλληλα στρώματα τα οποία συχνά σκεπάζουν το ένα το άλλο στις άκρες τους. Τα στρώματα αυτά έχουν σχηματιστεί πάνω από κοιλότητες μικρού μεγέθους. Οι επιφάνειές τους δεν είναι επίπεδες αλλά έχουν κυματιστή μορφή. Τα αλλεπάλληλα στρώματα μπορούν με την βοήθεια αιχμηρού εργαλείου να χωριστούν μεταξύ τους. Καθώς τα στρώματα αυτά είναι συνήθως ενυδατωμένα σε μεγάλο βαθμό, τυχαία διακύμανση της υγρασίας, θα μπορούσε να οδηγήσει σε συρρίκνωση ή διαστολή των στρωμάτων η οποία με την σειρά της θα μπορούσε να οδηγήσει σε απολέπιση της επιφάνειας του γυαλιού.

### **Ιριδισμοί**

Ο όρος χαρακτηρίζει το φαινόμενο όπου υπάρχουν αλλεπάλληλα στρώματα διάβρωσης στην επιφάνεια του γυαλιού, που εμφανίζουν μια ποικιλία χρωμάτων (ιριδισμοί), τόσο σε ανακλώμενο, όσο και σε διερχόμενο φωτισμό.

Οι γυάλινες επιφάνειες που παρουσιάζουν ιριδισμούς, αποτελούνται στην πραγματικότητα από ένα μεγάλο αριθμό λεπτών στρωμάτων διαβρωμένου γυαλιού (φυλλώδης διάβρωση) και η διαφανής διάβρωση στην επιφάνεια ενός γυαλιού παρουσιάζει ιριδισμούς αν έχει πάχος μικρότερο από 0.9μ.

### **Γαλακτώδης αλλοίωση ή διάβρωση**

Αναφέρεται σε κηλίδες κυρίως αδιαφανείς, που εμφανίζονται στην επιφάνεια και σταδιακά προχωρούν προς το εσωτερικό του γυαλιού. Στη χειρότερη περίπτωση μπορεί να έχουν μαύρο ή καφέ χρώμα ή μια πολύχρωμη εμφάνιση. Στο αρχικό στάδιο της εξέλιξης του φαινομένου, εμφανίζονται λευκές μικρές κηλίδες που σταδιακά μετατρέπονται σε γαλακτώδη διάβρωση, που μερικές φορές έχει τη μορφή πέτρας, εφόσον η διάβρωση εξελιχθεί σε βάθος και το γυαλί αρχίζει να απολεπίζεται. Η πιο ακραία μορφή του τύπου αυτού διάβρωσης εμφανίζεται σαν ένα παχύ στρώμα, διαφόρων χρωματισμών το οποίο εκτείνεται σε μεγάλο βάθος προς το εσωτερικό του γυαλιού. Το στρώμα αυτό έχει επίσης την τάση να θρυμματίζεται σχηματίζοντας λεπτά αλλεπάλληλα στρώματα. Σε περίπτωση που η διάβρωση συνεχιστεί η επιφάνεια θα θρυμματιστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε θα δίνει την εικόνα ενός μωσαϊκού.

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Στα εύθραυστα υλικά η βλάβη λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες εφελκυστικές τάσεις από ότι σε θλιπτικές. Καταρχήν η πιο απλή μέθοδος είναι τραβώντας μία ράβδο βάζοντας την σε ομοιόμορφη εφελκυστική τάση. Πρακτικά, υπάρχουν δυσκολίες στην λείανση του δείγματος και πρέπει το κεντρικό μήκος της ράβδου να είναι μικρότερο σε διάμετρο ώστε να εξασφαλισθεί ότι η βλάβη δεν θα συμβεί στις λαβές. Η δημιουργία τέτοιων δειγμάτων είναι δύσκολο και ακριβό με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι όπου η κατανομή της τάσης δεν είναι τόσο απλή όπως σε αυτή την μέθοδο. Για τύπους γυαλιού με μακρές ίνες η απευθείας εφελκυστική δοκιμή είναι πιο απλή και πιο συχνά εφαρμοσθείσα αφού τα προβλήματα λείανσης μπορούν να ξεπεραστούν με πολλούς τρόπους.

Οι πιο κοινές μέθοδοι είναι αυτές τις κάμψης με τρία ή τέσσερα σημεία εφαρμογής της έντασης. Οι ράβδοι είναι προτιμότερες από άλλου τύπου δείγματα καθώς δεν υπάρχουν γωνίες που μπορούν απευθείας να σπάσουν. Κατά την διάρκεια κάμψης μίας ράβδου σε τέσσερα σημεία η εφελκυστική τάση που είναι παράλληλη στον άξονα του δείγματος είναι μέγιστη στην ευθεία ανάμεσα στα εσωτερικά σημεία. Η ένταση  $S$  πάνω σε αυτή την ευθεία δίνεται για μικρά στελέχη ως:

$$S=8P/\pi D^3$$

Όπου:

P: είναι η δύναμη σε κάθε σημείο επαφής

D: είναι η διάμετρος του δείγματος

Στις μεθόδους αυτές η βλάβη ξεκινά από την επιφάνεια του δείγματος όπου και η εφελκυστική τάση είναι μεγαλύτερη. Η μέθοδος με τα τέσσερα σημεία εφαρμογής είναι προτιμότερη από αυτή με τα τρία σημεία εφαρμογής επειδή είναι λιγότερο επιρρεπής η βλάβη στα σημεία επαφής.

Η μέθοδος της εγκάρσιας συμπίεσης παρέχει μία ελκυστική εναλλακτική λύση στις μεθόδους κάμψης για κάποια υλικά. Σε αυτή την μέθοδο ένας κύλινδρος συμπιέζεται κατά μήκος της περιμέτρου του από δύο επίπεδα δίνοντας μία μέγιστη εφελκυστική τάση κάθετη στην κατεύθυνση της φόρτισης σε ολόκληρη την φορτιζόμενη διάμετρο όπως επίσης και από την μία όψη του κυλίνδρου προς την άλλη έτσι ώστε και η έκταση και η ένταση της βλάβης να είναι πιθανές. Ένα κομμάτι υλικού μαλακότερο από αυτά τα επίπεδα πρέπει να παρεμβάλλεται μεταξύ του δείγματος και των επιπέδων ώστε να προληφθεί η βλάβη των επιπέδων.

Οι μέθοδοι συμπίεσης χρησιμοποιούνται μερικές φορές στο γυαλί αλλά συνήθως η βλάβη λαμβάνει χώρα στην γωνία επαφής του δείγματος με τα επίπεδα συμπίεσης. Πιθανώς, αυτό προκαλείται από την εφελκυστική τάση η οποία είναι δύσκολο να

υπολογισθεί και για αυτό αυτές οι μέθοδοι δίνουν διάσπαρτα και αναξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι μονάδες της έντασης είναι ιδιαίτερα προβληματικές. Σε παλαιότερες εργασίες η ένταση μετριέται σε pounds προς inch<sup>2</sup> (psi) ενώ οι μονάδες στο SI είναι τα Pascal. Η αντιστοιχία είναι η εξής :

$$1.45 * 10^{-4} \text{ psi} = 1 \text{ Pa}$$

### ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Όταν η επιφάνεια του γυαλιού είναι «φαγωμένη» ή «βομβαρδισμένη» με σωματίδια, η αντοχή του γυαλιού μειώνεται. Διαφορετικές επεξεργασίες δίνουν διαφορετικές αντοχές.

Αν τα δείγματα γυαλιού προετοιμάζονται σωστά και διατηρούνται «καθαρά» τότε έχουν υψηλές αντοχές. Έχουν αναφερθεί αποτελέσματα για αντοχή μέχρι και  $10^{10}$  Pa. Ο Hillig μέτρησε αντοχές μέχρι και  $1.5 * 10^{10}$  Pa σε θερμοκρασία  $-196^{\circ}$  C για ράβδο γυαλιού από λιωμένο πυρίτιο 1 mm σε διάμετρο. Αυτά τα δείγματα λήφθηκαν από μεγαλύτερες ράβδους και προστατεύθηκαν από την επαφή με στερεά σώματα.

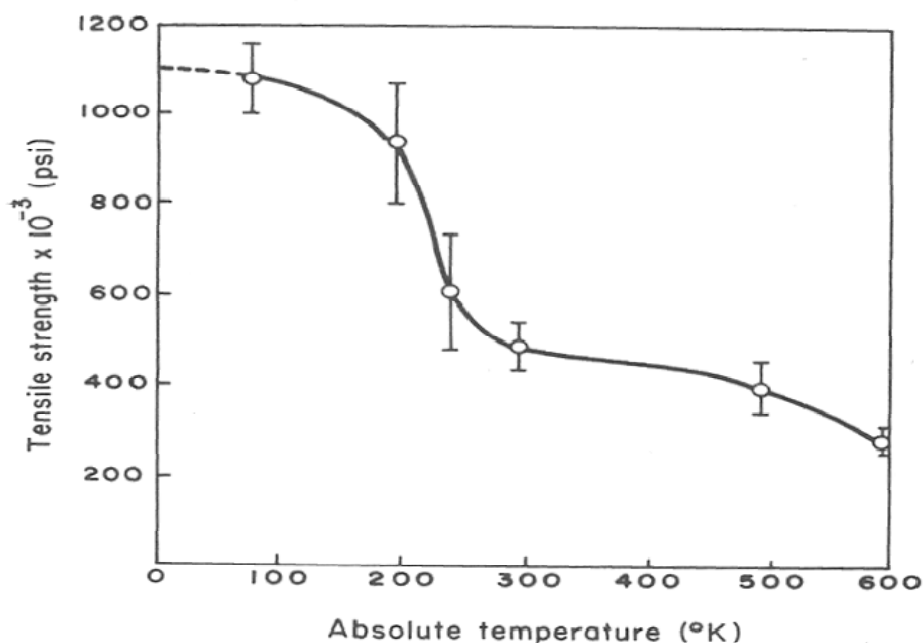
Η αντοχή ενός συνηθισμένου ή «φαγωμένου» γυαλιού μπορεί ουσιαστικά να αυξηθεί μέσω χάραξης με υδροφθορικό οξύ. Η χάραξη οδηγεί τα δείγματα σε πολύ μεγάλες αντοχές ωστόσο τα κάνει ευαίσθητα σε φθορές λόγω χειρισμού, ενώ σε μερικά δείγματα παρατηρείται μικρότερη αντοχή από ότι πριν την χάραξη. Το αποτέλεσμα εξαρτάται από τις ικανότητες του πειραματιστή.

Ένα νατράσβεστο γυαλί που μένει στο νερό για μερικές ώρες αφού έχει υποστεί τρίψιμο έχει μέχρι και 1.5 φορές μεγαλύτερη αντοχή από ότι αν εξεταστεί κατευθείαν μετά το τρίψιμο. Η βύθιση στο νερό για ένα μικρό διάστημα αυξάνει την αντοχή σημαντικά. Αν το γυαλί εξεταστεί σε διαφορετικά οργανικά διαλύματα μετά την τριβή θα δώσει διαφορετικές αντοχές που εξαρτώνται από το διάλυμα ( όσο πιο πολικό είναι το διάλυμα τόσο μικρότερη είναι και η αντοχή ). Όλες αυτές οι σημειώσεις δείχνουν ότι η αντοχή του γυαλιού εξαρτάται σχεδόν απόλυτα από την κατάσταση της επιφάνειάς του.

## Επίδραση της θερμοκρασίας και της σύστασης του γυαλιού στην αντοχή του

Η αντοχή ενός νατράσβεστου γυαλιού σε σχέση με την θερμοκρασία προσδιορίσθηκε από τον Ernsberger λόγω της ύπαρξης πεπλατυσμένων φυσαλίδων μέσα στο γυαλί. Η αντοχή και άλλων ανθεκτικών γυαλιών έχει παρόμοια σχέση με την θερμοκρασία. Ωστόσο, γυαλιά χαμηλής αντοχής συχνά δείχνουν μικρή θερμοκρασιακή εξάρτηση της αντοχής θραύσης. Αυτές οι επιδράσεις της θερμοκρασίας προκαλούνται πιθανών από τον ίδιο μηχανισμό της βλάβης. Ο Hillig δεν βρήκε καμία διαφορά στην αντοχή του γυαλιού μεταξύ των  $-196^{\circ}\text{C}$  και  $268^{\circ}\text{C}$  ενώ σε αυτό το διάστημα η βλάβη ήταν ανύπαρκτη.

Η σύνθεση του γυαλιού μπορεί να επηρεάσει έμμεσα την αντοχή του μέσω των επιφανειακών χημικών αντιδράσεων, της εφαρμογής επιφανειακών τάσεων και άλλων δευτερευόντων παραγόντων. Ωστόσο, δεν υπάρχει απόδειξη ότι η σύσταση του γυαλιού επιδρά άμεσα στην αντοχή του.



Θερμοκρασιακή εξάρτηση της αντοχής σε θραύση

## ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ

### Παρατηρήσεις στις επιφάνειες θραύσης και την προέλευσή τους

Τα σημάδια στις επιφάνειες θραύσης μπορούν να δώσουν πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την διεύθυνση της διάδοσης της θραύσης όπως επίσης σχετικά με την ανομοιογένεια του υλικού και των τοπικών επιπτώσεων της έντασης.

Η επιφάνεια θραύσης στο γυαλί αναδεικνύει μία λεία περιοχή που ονομάζεται καθρέφτης, μία θολή περιοχή εκτός του καθρέφτη και μία περιοχή τραχιιάς επιφάνειας.

Η απόσταση R από την αρχή της θραύσης μέχρι το όριο των δύο πρώτων περιοχών που αναφέρονται παραπάνω σχετίζεται με την ένταση της θραύσης S μέσω της εμπειρικής σχέσης:

$$S\sqrt{r}=A$$

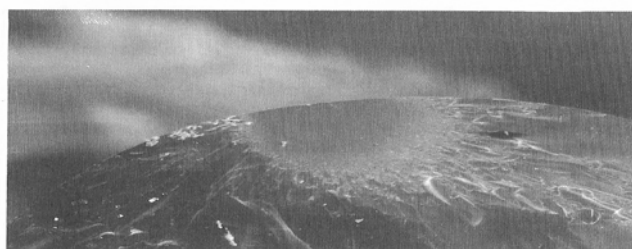
Όπου:

A: μία σταθερά για συγκεκριμένα εύθραυστα υλικά και θερμοκρασία

Για το γυαλί σε θερμοκρασία δωματίου έχει βρεθεί η τιμή για τον συντελεστή A γύρω στο  $2 \cdot 10^6 \text{N/m}^{3/2}$ . Προφανώς, η τιμή του A δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία ή την σύσταση του γυαλιού, ωστόσο μπορεί να εξαρτάται από την ιστορία του δείγματος.

Η παραπάνω σχέση έχει πρακτική αξία καθώς επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση της έντασης της θραύσης χωρίς να μετρηθεί άμεσα. Έτσι, για δείγματα πολύπλοκου σχήματος όπου η ανάλυση της έντασης είναι δύσκολη ή οι μετρήσεις της φόρτισης είναι αδύνατες η παραπάνω σχέση είναι πολύ χρήσιμη.

Μία μεγάλη ποικιλία από στοιχεία μπορούν να αναπτυχθούν στην επιφάνεια θραύσης ανάλογα με την αρχική κατάσταση της έντασης. Για παράδειγμα, πλέγματα συνεχούς πάχους ξεκινούν από μία συγκεκριμένη απόσταση στο μέτωπο του κατάγματος σε ένα δείγμα που υπέστη εφελκυσμό και στρέψη. Στις γραμμές που χωρίζουν τα πλέγματα μικρές «λόγχες» ξεχωρίζουν από την γυάλινη επιφάνεια.



Επιφάνεια θραύσης γυαλιού μετά από κάμψη στους 25°C



## Παρατηρήσεις στις επιφανειακές φθορές

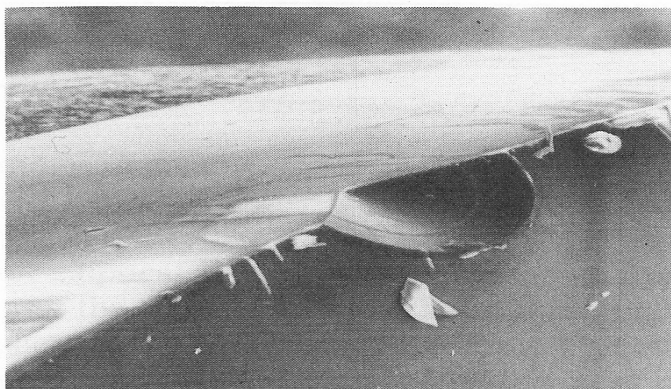
Διαφορετικές χημικές επιδράσεις όπως ατμοί νατρίου ή τηγμένο άλας λιθίου μπορούν να δώσουν ορατές ρωγμές στην γυάλινη επιφάνεια. Αυτές οι ρωγμές προέρχονται από την χημική επίδραση και δεν αντιπροσωπεύουν προηγούμενη φθορά στο γυαλί. Αν η επιφάνεια του γυαλιού χαραχθεί με υδροφθορικό οξύ δημιουργούνται σε αυτή επιμήκη κοιλώματα που προέρχονται από τις ρωγμές της επιφάνειας.

Αν μία σκληρή σφαίρα πιέσει την γυάλινη επιφάνεια τότε θα δημιουργηθεί μία ρωγμή γύρω από την περιοχή επαφής η οποία έπειτα μεγαλώνει στο εσωτερικό του γυαλιού σε κωνικό σχήμα. Αυτές οι ρωγμές ονομάζονται ρωγμές του Hertzian επειδή η κατανομή της ελαστικής τάσης από την επαφή της σκληρής σφαίρας στο επίπεδο υπολογίσθηκε από τον Hertz.

Αν ο «εισβολέας» αντί για σφαιρικός είναι κοφτερός, το σχήμα της ρωγμής θα είναι τελείως διαφορετικό. Μία «οπή» διαδίδεται μέσα στο γυαλί κατά την διάρκεια της φόρτισης. Όταν το φορτίο απομακρύνεται πλευρικές ρωγμές διαδίδονται από την περιοχή της επαφής.

Η σύγκρουση με ένα σκληρό σφαιρικό πρόβολο προκαλεί βλάβη με χαρακτηριστικά και από τον σφαιρικό και από τον κοφτερό «εισβολέα». Σε συγκρούσεις με μικρές ταχύτητες σχηματίζεται η κωνική ρωγμή του Hertzian. Σε συγκρούσεις με μεγάλες ταχύτητες η κωνική ρωγμή εμφανίζει στο τέλος της ακτινωτά ραγίσματα ενώ επίσης μεσαίου μεγέθους ρωγμές διαδίδονται μέσα στο γυαλί. Η παρουσία διαλύματος προκαλεί αύξηση των ρωγμών και διακλαδώσεις αυτών.

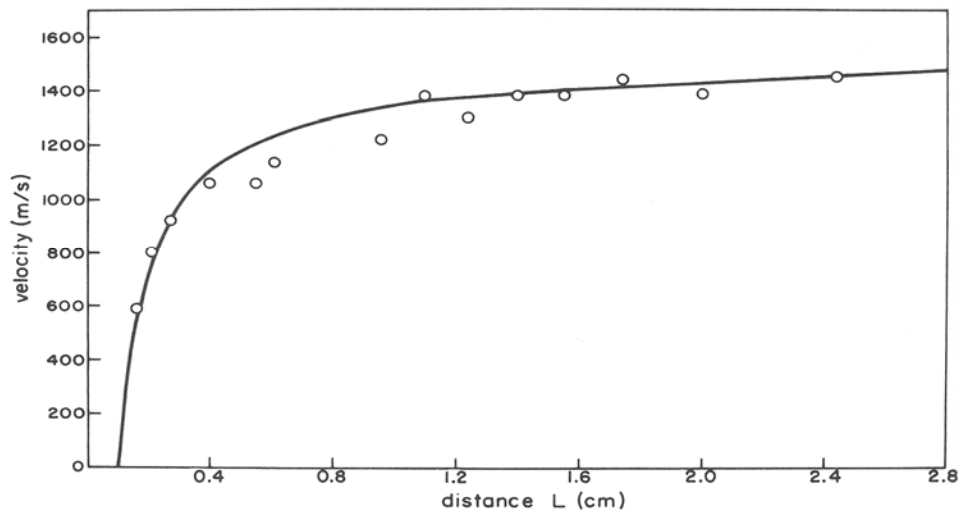
Αν ένα σκληρό αντικείμενο όπως ένα διαμάντι συρθεί πάνω στην γυάλινη επιφάνεια πλευρικές ρωγμές εμφανίζονται κατά μήκος της τροχιάς του «εισβολέα». Τέτοια αποτελέσματα εμφανίζονται και όταν το γυαλί τριφτεί με μία σκληρή επιφάνεια.



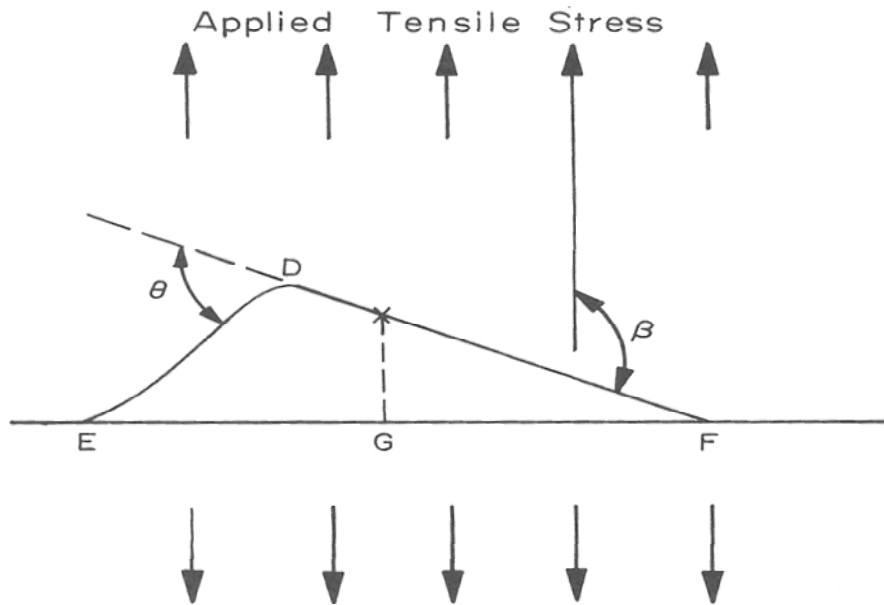
*Προέλευση της θραύσης. Η πάνω επιφάνεια είναι το αρχικό γυαλί, ενώ η κάτω είναι η επιφάνεια της θραύσης*

## ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Η ταχύτητα της διάδοσης της ρωγμής μέσα στο γυαλί έχει μετρηθεί με πολλές μεθόδους. Η ταχύτητα μετριέται από τα ευθεία ραγίσματα στην επιφάνεια του καθρέφτη που είναι γνωστές ως ευθείες Wallner. Η ταχύτητα της θραύσης μπορεί επίσης να μετρηθεί από τα κυματιστά σημάδια της επιφάνειας της ρωγμής που προέρχονται από υπερηχητικά κύματα τα οποία εισάγονται κάθετα στο μέτωπο της ρωγμής. Μία άλλη μέθοδος είναι η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των μεταλλικών λωρίδων που είναι βαμμένες πάνω στο γυαλί καθώς αυτές προοδευτικά σπάνε από το μέτωπο του κατάγματος.



*Ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με το μήκος της*



Σχηματική απεικόνιση της θραύσης DF και η διάδοσή της

Μία μακριά ευθεία ρωγμή DF διεισδύει στην γυάλινη επιφάνεια σε βάθος  $c$  αρκετά μικρότερο από το μήκος της ρωγμής και είναι κεκλιμένη κατά γωνία  $\beta$  προς την επιβληθείσα τάση. Η υψηλότερη εφελκυστική τάση στην άκρη της ρωγμής θα προκύψει κάπου στο μήκος της, συνήθως όχι στο τέλος της, αλλά στο σημείο X. Αφού ξεκινήσει να μεγαλώνει στο σημείο X, το νέο μέτωπο της ρωγμής κινείται κατά μήκος του κάτω μέρους της αρχικής ρωγμής DF και μέσα στο γυαλί. Στο σημείο D η ρωγμή γυρνά κατά μήκος της γραμμής DF. Μία πιθανή επεξήγηση του κυκλικού ίχνους της αρχικής διάδοσης με το τελικό επίπεδο της θραύσης είναι ότι το επίπεδο είναι κάθετο στην εφαρμοσθείσα τάση και ορίζεται από τα ίσα τμήματα XE και XF στην γυάλινη επιφάνεια, όπως επίσης το καμπυλωτό τμήμα XG μέσα στο γυαλί. Αν η ρωγμή διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα σε όλες τις διευθύνσεις, το μέτωπό της θα είναι κυκλικό όταν φτάσει το τελικό μέτωπο θραύσης EGF. Μία απλή εξίσωση της ταχύτητας της ρωγμής  $u$  σε σχέση με το βάθος της  $c$  είναι :

$$u = u_m(1 - c_0/c)$$

όπου:

$c_0$ : το αρχικό μήκος της ρωγμής

$u_m$ : η μέγιστη ταχύτητα  $u_m = m\sqrt{E}/\rho$

E: το μέτρο Young

$\rho$ : η πυκνότητα

m: σταθερά με τιμή 0.4-0.5

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ**

### **ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ**

Σε περίπτωση φθοράς του γυαλιού ακολουθείται μια διαδικασία συντήρησης αυτού. Έτσι, το γυαλί καθαρίζεται με, όχι ζεστό, απιονισμένο νερό σε δοχείο από πολυαιθυλένιο για να αποφευχθούν σπασίματα από πιθανό γλίστρημα του αντικειμένου. Μερικές φορές προστίθεται ένα ουδέτερο απορρυπαντικό στο νερό του καθαρισμού, όχι όμως σε μεγάλη ποσότητα, γιατί το γυαλί δεν διακρίνεται σε πολλές σαπουνάδες. Για τον καθαρισμό μπαίνει μόνο ένα αντικείμενο σε κάθε δοχείο.

Γενικά αποφεύγονται μεγάλες πιέσεις κατά τον καθαρισμό, ειδικά σε εύθραυστες περιοχές.

Μετά τον καθαρισμό, το γυαλί αφήνεται σε χαρτί για να στεγνώσει και τα σπασμένα κομμάτια τοποθετούνται έτσι ώστε να μην πιέζονται. Μερικές φορές αντί του χαρτιού χρησιμοποιείται και μαλακό πανί χωρίς να ασκείται πίεση και το αντικείμενο παραμένει σε πάγκο στρωμένο με ύφασμα για να μην γλιστρήσει.

Όταν το γυαλί «ιδρώνει» ή «κλαίει» αρχικά υφίσταται πλύσιμο με απιονισμένο νερό και σταδιακά λουτρά και αφήνεται να στεγνώσει. Αυτή η περιποίηση καθυστερεί την αποσύνθεση του γυαλιού και βελτιώνει την εμφάνισή του, επειδή απομακρύνονται από την επιφάνεια τα διαλύματα που προκύπτουν από το «ίδρωμα» του γυαλιού και οι διάφορες επικαθήσεις που προσροφώνται από αυτά.

Αυτή η μέθοδος συντήρησης δεν είναι βέβαια μακροπρόθεσμη, ειδικά αν το γυαλί εκτεθεί πάλι σε υγρή ατμόσφαιρα. Η διάβρωση αναστέλλεται μόνο αν το γυαλί αποθηκευθεί σε περιβάλλον με RH περίπου 42%.

Τελικά τονίζεται, ότι μετά το τέλος κάθε διαδικασίας καθαρισμού πρέπει να μετριέται η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH των εκπλυμάτων για να διαπιστωθεί ότι απομακρύνθηκαν όλες οι διαβρωτικές επικαθήσεις και τα παραπροϊόντα που τυχόν δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία καθαρισμού.

### **ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ**

Οι κόλλες, τα στερεωτικά και οι λάκκες που χρησιμοποιούνται στην συντήρηση του γυαλιού είναι συνθετικά πολυμερή, και πλεονεκτούν έναντι των παλαιότερων υλικών (φυσικά κεριά, φυσικές ρητίνες, γύψος κτλ) που χρησιμοποιούνταν για να συγκρατούν τα κομμάτια του γυαλιού επειδή αυτά παρουσίαζαν συρρίκνωση της

κόλλας, λιώσιμο και απομάκρυνση του κεριού, συγκέντρωση επικαθίσεων, ευθραυστότητα των φυσικών ρητινών και αδιαφάνεια της γύψου.

Μετά την ανάπτυξη της χημείας των πολυμερών, βρέθηκαν νέα υλικά τα οποία δεν παρουσίαζαν τα μειονεκτήματα των φυσικών αλλά είναι αρκετά τοξικά, επικίνδυνα για το δέρμα και παρουσιάζουν δυσκολίες στην επιλογή τους.

Αρχικά είναι καθοριστικό για τις κόλλες, τα στερεωτικά και τα υλικά συμπλήρωσης, να επιλεγεί εκείνο το υλικό που δεν επηρεάζεται από το νερό και είναι ανθεκτικό στις υπεριώδεις ακτίνες και την θερμοκρασία για αρκετά μεγάλο διάστημα.

Το γυαλί όταν είναι καθαρό έχει επιφάνεια ενεργειακά αναβαθμισμένη και επομένως διαβρέχεται άμεσα από μία κόλλα. Επειδή όμως η επιφάνεια του γυαλιού είναι πολύ υγροσκοπική και απορροφά νερό, τα οργανικά υγρά χωρίς δεσμούς υδρογόνου στα μόριά τους δύσκολα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.

Επομένως με την ελάττωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος, απομακρύνεται μια ποσότητα νερού μέσα από τους πόρους που διευκολύνει την κόλλα στην διαδικασία συγκόλλησης, όμως η μεγάλη απομάκρυνση νερού μέσα από τους πόρους προκαλεί προβλήματα στην διαβρωμένη επιφάνεια.

Όλα τα πολυμερή είναι περατά από το νερό και από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια του γυαλιού, οπότε σχηματίζεται ένα αλκαλικό διάλυμα στους πόρους του υλικού που απορροφά πιο πολύ νερό με το φαινόμενο της ώσμωσης. Η ώσμωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο διαλύματα, όταν χωρίζονται από μία ημιπεράτη μεμβράνη τότε το νερό θα περάσει και θα κινηθεί από το αραιότερο διάλυμα (πιο καθαρό) προς το πυκνότερο διάλυμα (βεβαρημένο), ώστε το τελευταίο να αραιωθεί τελικά και να γίνει και αυτό το ίδιο καθαρό. Το νερό αυτό ασκεί υδροστατική πίεση στην κόλλα, στο στερεωτικό υλικό και στο υλικό συμπλήρωσης προκαλώντας μηχανικές τάσεις στο πολυμερές με αποτέλεσμα την εξασθένηση και την απώλειά του. Οι αντιδράσεις υδρόλυσης στο πολυμερές πραγματοποιούνται περισσότερο σε υψηλά αλκαλικά γυαλιά.

Τα οργανικά πολυμερή είναι συνολικά εκτεθειμένα στη διάβρωση και την οξείδωση από το φως, το οξυγόνο, το νερό αλλά και την θερμότητα. Οι μηχανισμοί διάβρωσης είναι χαρακτηριστικοί για κάθε πολυμερές. Συχνά είναι δύσκολο να αποσαφηνιστούν και μόνο γενικές διαπιστώσεις μπορούν να γίνουν.

Οι επιδράσεις από το φως, το οξυγόνο και το νερό μπορούν να προκαλέσουν σπάσιμο της αλυσίδας του πολυμερούς και σχηματισμό ομάδων που απορροφούν το φως (χρωμοφόρα), με αποτέλεσμα το κιτρίνισμα.

Εκείνα τα πολυμερή που περιέχουν εστερικές ομάδες κατά μήκος της αλυσίδας, όπως οι πολυεστερικές ρητίνες, μπορούν να υδρολυθούν και επομένως εξασθενούν αργά με τομές στην αλυσίδα όταν έρχονται σε επαφή με το νερό.

Το κιτρίνισμα στις ρητίνες προκύπτει με απορρόφηση του μπλε ή του υπεριώδους φωτός από τα χρωμοφόρα. Αυτές οι χρωμοφόρες ομάδες είναι πολύ δραστικές και απορροφούν όλο και περισσότερη ενέργεια από το φως, προκαλώντας και παραπέρα διάβρωση. Η ενέργεια που περιέχεται στο φως και ειδικότερα στην υπεριώδη ακτινοβολία είναι πολύ ικανή να σπάσει τους χημικούς δεσμούς στα πολυμερή με αποτέλεσμα να ξεκινά η διάβρωση για την παραπέρα αποδιοργάνωσή τους.

Η αντιμετώπιση της δράσης της υπεριώδους ακτινοβολίας στα πολυμερή γίνεται με την κατάλληλη ανάμιξή τους με ειδικές συνθετικές ουσίες που ονομάζονται απορροφητές υπεριωδών ακτινών.

Όλες οι παραπάνω μορφές διάβρωσης είναι χημικής φύσης, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπεράσει την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ή  $T_g$  του πολυμερούς. Τότε με φυσική διαδικασία, οι διάφορες δονήσεις των μορίων γύρω από την θέση ισορροπίας είναι ανεξέλεγκτες με αποτέλεσμα το πολυμερές να βρίσκεται σε άμορφη κατάσταση. Αυτό ισχύει περισσότερο στα θερμοπλαστικά πολυμερή, στα οποία επιπλέον όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ξεπεράσει την  $T_g$  του πολυμερούς, αυτά έλκουν και κατακρατούν την σκόνη και διάφορα σωματίδια.

Είναι βασική προϋπόθεση να μην χρησιμοποιούνται υλικά άγνωστης σύστασης. Πρέπει να τονισθεί ότι οι κατασκευαστές αποκαλύπτουν την χημική σύσταση των κύριων συστατικών του υλικού αλλά δεν αποκαλύπτουν την χημική σύσταση των διαφόρων ουσιών που έχουν προστεθεί σε ποσοστό μικρότερο από το 10% του υλικού. Αυτό γίνεται επειδή αυτά τα προσθετικά υλικά διαχωρίζουν το προϊόν τους από τα υπόλοιπα παρόμοια προϊόντα.

Η διαπίστωση της χημικής σύστασης των διαφόρων πολυμερών είναι αρκετά πολύπλοκο θέμα και πολλές φορές είναι αδύνατο να ταυτοποιηθούν όλα τα συστατικά του υλικού, ακόμα και αν υπάρχει ο κατάλληλος αναλυτικός εξοπλισμός, όπως φασματοφωτόμετρο ορατού και υπεριώδους, αέριος χρωματογράφος και φασματογράφος μάζας.

Εκτός από τις παραπάνω αναλύσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σειρά από απλά τεστ για να διαπιστωθεί αν το υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί είναι κατάλληλο για τη συντήρηση. Στις απλές αυτές δοκιμές πρέπει να προσδιοριστεί η αντοχή στην γήρανση, η συρρίκνωση κατά την πήξη και με την πάροδο του χρόνου, η θερμική διαστολή και συστολή, οι μηχανικές αντοχές, η ελαστικότητα και τα

διαβρωτικά αποτελέσματα επάνω στο υλικό του προς συντήρηση αντικειμένου. Επίσης πρέπει να προσδιοριστεί το pH του πολυμερούς. Σχετικά με την αντοχή του πολυμερούς υλικού πρέπει να προσδιοριστούν η αντοχή σε σχίσιμο, το όριο ελαστικότητας και η αντοχή σε εγκάρσιο σπάσιμο.

Η κατασκευή και στερεοποίηση της ρητίνης γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, αν και πολλές φορές αυτή είναι ελαφρά διαφορετική ανάλογα και με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα δοκίμια, τα οποία περνούν από διαδικασία σκλήρυνσης, χρησιμοποιούνται για τις διάφορες δοκιμές που αναφέρθηκαν και σε όλες τις περιπτώσεις κάποια από τα δοκίμια φυλάσσονται για να υποβληθούν σε μακροπρόθεσμη φυσική γήρανση.

Είναι πολύ σημαντικό τα αποτελέσματα των διαφόρων δοκιμών αντοχής, για να συγκριθούν, να περιλαμβάνουν δείγματα με ομοιογένεια, σταθερή διατομή κατά μήκος και σταθερό μήκος.

Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι ο υπολογισμός στο pH του πολυμερούς είναι περισσότερο ουσιώδης και ακριβής όταν πραγματοποιηθεί στο διάλυμα ή στο γαλάκτωμα ενός πολυμερούς.

### **ΣΤΕΡΕΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ**

Η στερέωση της σαθρής επιφάνειας του γυαλιού γίνεται με μια ρητίνη που πρέπει να έχει χαμηλό ιξώδες, δηλαδή υψηλή ρευστότητα, για μεγάλη εισχώρηση στους πόρους του υλικού. Η αύξηση της ρευστότητας επιτυγχάνεται με αλλαγές στις συγκεντρώσεις του στερεωτικού διαλύματος και με θερμοκρασία εφαρμογής της μεθόδου περίπου 60°C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες εφαρμογής της μεθόδου πιθανόν να δημιουργηθεί πρόβλημα στο γυαλί. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τάση ατμών και το σημείο εξάτμισης του διαλυτή του στερεωτικού.

Τα οργανικά στερεωτικά έχουν, σε γενικές γραμμές, στερεωτικές αλλά και συγκολλητικές ικανότητες, αφού μπορούν να εφαρμοστούν σε υγρή μορφή και να εμποτίσουν έτσι τις επιφάνειες και τους πόρους του υλικού, με αποτέλεσμα την συγκόλληση ή την στερέωσή του.

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ υγρού και στερεού και επομένως επηρεάζουν την συγκολλητική και στερεωτική ικανότητα της ρητίνης είναι κυρίως δυνάμεις Van der Waals, δεσμοί υδρογόνου και δυνάμεις που οφείλονται στην παρουσία διπόλων. Σύμφωνα με τις δυνάμεις αυτές, καθορίζεται η φυσική και χημική απορρόφηση ανάμεσα στο συγκολλητικό και στο στερεό, στο οποίο εφαρμόζεται και πραγματοποιείται η σύνδεση ανάμεσα στις δύο επιφάνειες του

στερεού με το πέρασμα των μορίων του συγκολλητικού. Η δύναμη συγκόλλησης ή στερέωσης είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η συνοχή ανάμεσα στα μόρια του συγκολλητικού ή στερεωτικού.

Από όλα αυτά προκύπτει ότι οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες έχουν καλύτερη συγκολλητική ή στερεωτική ικανότητα.

Πριν από την στερέωση γίνεται σταδιακή αφυδάτωση του αντικειμένου, δηλαδή άμεση αντικατάσταση του νερού με τον διαλύτη του στερεωτικού διαλύματος, διότι αν παραμείνουν οι πόροι του διαβρωμένου γυαλιού χωρίς νερό χάνει την διαφάνειά του και ξεφλουδίζει.

Είναι κατάλληλοι διάφοροι υδρόφιλοι διαλύτες όπως αιθανόλη, ακετόνη και βουτανόνη. Το γυαλί χωρίς να στεγνώσει, βυθίζεται σε υγρό που περιέχει νερό και διαλύτη σε αναλογία 1/1 και μετά από μία ώρα αλλάζει το λουτρό με αυξανόμενη την περιεκτικότητα του διαλύτη, σε σχέση με το νερό, μέχρι την τοποθέτηση πια καθαρού διαλύτη.

### **Μέθοδοι στερέωσης**

Η εφαρμογή του στερεωτικού γίνεται με ψεκασμό, επάλειψη ή κομπρέσα, χρήση σύριγγας σε περιοχές που είναι δύσκολο να εισχωρήσει διαφορετικά και στην περίπτωση που το αντικείμενο δεν είναι πολύ σαθρό εφαρμόζεται και στερέωση σε συσκευή κενού. Η τελευταία μέθοδος εφαρμόζεται ειδικά όταν το αντικείμενο δεν είναι πολύ βρεγμένο και περιέχει αέρα ανάμεσα από τα στρώματα των ιριδισμών. Εδώ η ελάττωση πίεσης απομακρύνει τον αέρα από τους πόρους και τα τριχοειδή του υλικού, στη συνέχεια τροφοδοτείται το στερεωτικό διάλυμα και με την επαναφορά στην ατμοσφαιρική πίεση εισχωρεί στους πόρους του υλικού με την ταυτόχρονη εξάτμιση του διαλύτη. Η απότομη ελάττωση της πίεσης μπορεί να προκαλέσει θραύση στο υλικό επειδή δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα πολύ γρήγορα και η πίεση στην συσκευή κενού δεν πρέπει να γίνει πολύ χαμηλή.

Αναλυτικότερα οι μέθοδοι στερέωσης είναι:

1. Εμβάπτιση του αντικειμένου στο διάλυμα του στερεωτικού υλικού. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια του γυαλιού είναι σε σχετικά καλή κατάσταση. Το αντικείμενο εμβαπτίζεται ολόκληρο σε ειδική δεξαμενή που περιέχει το διάλυμα του στερεωτικού υλικού, σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε περίπτωση που θέλουμε να εφαρμοστεί η μέθοδος σε αντικείμενο με σαθρή επιφάνεια, εφαρμόζουμε γύρω από την επιφάνειά του λεπτό φύλλο ουδέτερου χαρτιού.



2. Εφαρμογή του στερεωτικού διαλύματος με επικάλυψη στην επιφάνεια του γυαλιού. Χρησιμοποιούνται ειδικά μαλακά πινέλα και το αντικείμενο τοποθετείται μέσα σε ειδικό δοχείο για την συλλογή και την ανακύκλωση του στερεωτικού διαλύματος που περισσεύει. Η μέθοδος αποφεύγεται σε περιπτώσεις που το αντικείμενο έχει πολύ σαθρή επιφάνεια διότι υπάρχει κίνδυνος να απομακρυνθούν φύλλα του αποφλοιωμένου γυαλιού.
3. Εφαρμογή του στερεωτικού διαλύματος με κομπρέσα που έχει εμποτιστεί με το διάλυμα του στερεωτικού υλικού. Για την κατασκευή της κομπρέσας χρησιμοποιείται ουδέτερο χαρτί σε μικρά κομμάτια και όταν αυτή εφαρμοστεί στην επιφάνεια καλύπτεται με φύλλο κάποιου πολυμερούς, που είναι αδρανές στο διαλυτή του στερεωτικού, για να αποφεύγεται η γρήγορη εξάτμιση του διαλύτη από την κομπρέσα. Η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως σε αντικείμενα με λίγο έως πολύ σαθρή επιφάνεια, όπου αποφεύγεται η απομάκρυνση των διαφόρων αποφλοιώσεων και επιτυγχάνεται η στερέωσή τους. Μία βελτίωση της μεθόδου περιλαμβάνει την εφαρμογή της κομπρέσας επάνω στην επιφάνεια και στην συνέχεια την τροφοδοσία, με αργή ροή, του διαλύματος του στερεωτικού υλικού.
4. Εφαρμογή του στερεωτικού διαλύματος με ψεκασμό. Εδώ ψεκάζεται η επιφάνεια του αντικειμένου με το στερεωτικό διάλυμα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε επιτόπου στερεώσεις και στο εργαστήριο και χαρακτηρίζεται από την σημαντική εισχώρηση του στερεωτικού στους πόρους του υλικού του αντικειμένου. Ο ψεκασμός γίνεται με ειδική συσκευή πεπιεσμένου αέρα, όπου τροφοδοτείται το στερεωτικό διάλυμα σε διάφορες συγκεντρώσεις. Η πίεση και η ροή του στερεωτικού διαλύματος ρυθμίζονται κατάλληλα και συνήθως σε μια σαθρή γυάλινη επιφάνεια εφαρμόζονται χαμηλές πιέσεις, ενώ ο ψεκασμός γίνεται σε κλειστή συσκευή αφενός για να μην εκτινάσσεται το στερεωτικό διάλυμα στην γύρω περιοχή και τον χρήστη και αφετέρου για να συλλέγεται και να ανακυκλώνεται το στερεωτικό διάλυμα.
5. Εφαρμογή του στερεωτικού διαλύματος στην επιφάνεια του αντικειμένου σε κενό αέρα. Είναι μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται καλύτερη εισχώρηση του στερεωτικού μέσα στους πόρους του υλικού. Για την μέθοδο απαιτείται να υπάρχει, στο χώρο του εργαστηρίου, θάλαμος κενού αέρα με δύο εισόδους, την μία για την απομάκρυνση του αέρα και την άλλη για την είσοδο του διαλύματος του στερεωτικού. Αρχικά, το γυαλί τοποθετείται μέσα στο θάλαμο κενού και αν μειωθεί η πίεση στα 500 mmHg περίπου τότε ένα μεγάλο μέρος του αέρα, που υπάρχει στους πόρους και ανάμεσα στα διαδοχικά στρώματα της διάβρωσης του γυαλιού, απομακρύνεται. Επομένως διευκολύνεται ο καλύτερος εμποτισμός με το διάλυμα του στερεωτικού, διότι όταν η πίεση αποκατασταθεί λόγω του κενού που έχει δημιουργηθεί μέσα στους πόρους του υλικού θα έχει αναπτυχθεί πίεση από

έξω προς τα μέσα, που ωθεί το διάλυμα του στερεωτικού στο εσωτερικό των πόρων και αυτό συνεχίζεται μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία ανάμεσα στην ασκούμενη από μέσα και από έξω πίεση. Συνολικά, για επαρκή εμποτισμό, απαιτείται το αντικείμενο να αφεθεί για τουλάχιστον 24 ώρες μέσα στο διάλυμα του στερεωτικού. Κατά την διαδικασία ελάττωσης της πίεσης απαιτείται αυτό να γίνει με αργό ρυθμό και ο χώρος του κενού να μην φθάνει σε πολύ χαμηλή πίεση, διότι και στις δύο περιπτώσεις μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα σε σαθρό υλικό. Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης καθώς και η στιγμιαία τιμή της παρακολουθούνται με την τοποθέτηση μανομέτρου στη συσκευή κενού.

Τονίζεται ότι η καλύτερη στερέωση επιτυγχάνεται όταν εφαρμοστεί πριν στην επιφάνεια και τους πόρους μόνο ο διαλύτης του στερεωτικού και στη συνέχεια εφαρμόζονται διαδοχικά διαλύματα με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε στερεωτικό. Ο διαλύτης που υπάρχει μέσα στους πόρους του υλικού βοηθά τα μόρια της ρητίνης να αποκτήσουν μεγαλύτερη κινητικότητα και διεισδυτικότητα και επί πλέον επιτυγχάνεται μία ομοιόμορφη κατανομή του στερεωτικού μέσα στη μάζα του υλικού. Επίσης η χρήση διαλυμάτων με αυξανόμενη συγκέντρωση ή μια ελαφρά θέρμανση του στερεωτικού διαλύματος πριν από την χρήση, διευκολύνουν την διάχυση του διαλύματος του στερεωτικού.

Μετά από την διαδικασία στερέωσης, το γυαλί τοποθετείται σε χαρτί σιλικόνης όπου αφήνεται να στεγνώσει, δηλαδή να εξατμιστεί ο διαλύτης και να παραμείνει η ρητίνη στην επιφάνεια και στους πόρους και η διαδικασία υποβοηθείται με κομμάτια βαμβάκι ή λεπτό ύφασμα. Με τοποθέτηση καλύμματος στο αντικείμενο αποφεύγεται η επικάλυψη σκόνης στο στερεωτικό υλικό. Γενικά κατά την στερέωση πρέπει να αποφεύγονται ιριδισμοί ή γυαλίσματα που οφείλονται στην ρητίνη, ώστε να παραμείνει η διαφάνεια του γυαλιού.

## ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΟΥ

Αναφέρονται τρεις τρόποι συγκόλλησης του γυαλιού και η επιλογή εξαρτάται από το μέγεθος των θραυσμάτων, το πλάτος τους, το είδος καθώς και την κατάσταση του γυαλιού κλπ.

α) ανάταξη των γυάλινων κομματιών και συναρμολόγησή τους με κόλλα νιτρικής κυτταρίνης. Τα κομμάτια συγκολλούνται ένα –ένα με κόλλα νιτρικής κυτταρίνης και τα συγκολλημένα κομμάτια υποστηρίζονται με αυτοκόλλητη ταινία ή μέσα σε αμμοδόχο, τοποθετώντας χαρτοβάμβακα ανάμεσα στο γυαλί και την άμμο. Όταν υπάρχει στην επιφάνεια απολέπιση ή ανάγλυφη επιφάνεια δεν χρησιμοποιείται αυτοκόλλητη ταινία παρά μόνο η αμμοδόχος.

β) ανάταξη και ταυτόχρονη συγκράτηση των κομματιών μεταξύ τους με λωρίδες «magic tape», προσωρινά. Ακολουθεί η συγκόλληση με μια κατάλληλα επιλεγμένη ρητίνη. Τα κομμάτια συναρμολογούνται με λεπτές ταινίες αυτοκόλλητες, τοποθετημένες εναλλάξ στις δύο επιφάνειες του γυαλιού κατά μήκος της ρωγμής και κάθετα σε αυτήν. Όταν ολοκληρωθεί η συναρμολόγηση τοποθετείται στις ρωγμές μια ρευστή εποξειδική (ευπροσάρμοστη και με μεγάλη αντοχή πρόσφυσης) ή άλλου είδους κόλλα με την βοήθεια ενός αιχμηρού εργαλείου και αφήνεται να ρέει μέσα στην ρωγμή με τριχοειδή εισχώρηση. Η κόλλα που περισσεύει απομακρύνεται μετά από 24 ώρες, όταν θα έχει σταθεροποιηθεί αρκετά, με βαμβάκι που έχει μόλις υγρανθεί σε ασετόν. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διαφανές άχρωμο γυαλί με υγιή επιφάνεια και σε λεπτά γυαλιά που συναρμολογούνται από πολλά κομμάτια.

γ) ανάταξη και προσωρινή συγκράτηση των κομματιών με σταγόνες κυανοακρυλικής ρητίνης. Ακολουθεί η συγκόλληση με μια κατάλληλα επιλεγμένη ρητίνη. Η μέθοδος εφαρμόζεται όταν το αντικείμενο δεν μπορεί να συναρμολογηθεί με αυτοκόλλητη ταινία και χρησιμοποιούνται σταγόνες κυανοακρυλικής κόλλας στην άκρη κάθε ρωγμής για να το συγκρατήσουν κατά την τοποθέτηση της εποξειδικής ή άλλου είδους κόλλας.

### Ταξινόμηση με βάση της τεχνολογία της κόλλας

α) θερμοκρασία συγκόλλησης. Έτσι ορίζεται η θερμοκρασία που απαιτείται για να δημιουργηθεί συγκόλληση και αυτή μπορεί να είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ίσως και μεγαλύτερη. Σύμφωνα με την θερμοκρασία συγκόλλησης τα συγκολλητικά κατατάσσονται στις κόλλες που συγκολλούν σε ψυχρό περιβάλλον, με θερμοκρασίες μικρότερες από 20°C, στις κόλλες που συγκολλούν σε θερμοκρασία δωματίου, με θερμοκρασίες μεταξύ 20 και 30°C, σε κόλλες που συγκολλούν σε

ενδιάμεσες θερμοκρασίες, μεταξύ 31 και 100°C, στις κόλλες που συγκολλούν σε θερμό περιβάλλον, με θερμοκρασίες πάνω από 100°C .

β) προέλευση. Σύμφωνα με την προέλευσή τους οι κόλλες μπορούν να καταταγούν σε φυσικές και σε συνθετικές.

γ) μέθοδος συγκόλλησης. Οι κατηγορίες που προκύπτουν από την φυσική κατάσταση που επικρατεί κατά την συγκόλληση είναι οι κόλλες που ενεργοποιούνται με πίεση, οι κόλλες που ενεργοποιούνται με τήξη λόγω θερμοκρασίας, οι κόλλες που ενεργοποιούνται με χημική διαδικασία, οι κόλλες που ενεργοποιούνται με την εξάτμιση του διαλύτη κλπ.

δ) δομικές και μη δομικές κόλλες. Η κατάταξη σύμφωνα με αυτές τις έννοιες είναι λίγο έως πολύ αυθαίρετη, διότι δεν υπάρχει ακριβής ορισμός του «δομικού» σύμφωνα με την ορολογία αντοχών του συγκολλητικού υλικού. Απλά μια κόλλα ονομάζεται δομική όταν χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεγάλων συγκεντρώσεων βάρους με αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων μηχανικών τάσεων. Αντίθετα μια κόλλα χαρακτηρίζεται ως μη δομική όταν δεν μπορεί να αντέξει μεγάλα βάρη και χρησιμοποιείται περισσότερο για να συνδέσει τα κομμάτια ενός αντικειμένου ή όταν απαιτείται μια προσωρινή συγκόλληση. Ειδικότερα όταν μια κόλλα αντέχει σε μηχανικές τάσεις μεγαλύτερες από 10MPa σε θερμοκρασία δωματίου, τότε αυτή η κόλλα μπορεί να χαρακτηριστεί σαν δομική.

ε) δεκτικότητα. Σύμφωνα με την δεκτικότητα οι διάφορες κόλλες κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε διάφορους παράγοντες του περιβάλλοντος όπως θερμοκρασία, υγρασία, υπεριώδεις ακτίνες και μικροοργανισμούς.

Τελικά η κύρια ταξινόμηση κατατάσσει τις κόλλες σύμφωνα με τον χημικό τύπο του κύριου συστατικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η κόλλα. Επίσης στην προηγούμενη κατάταξη λαμβάνονται υπόψη και διάφοροι συντελεστές που αφορούν και ενδιαφέρουν τον χρήστη. Τέτοιοι συντελεστές είναι ο τύπος του υλικού, συνθήκες περιβάλλοντος, διάφορα χαρακτηριστικά της διαδικασίας συγκόλλησης και τελικά η συνολική απόδοση που προσδίδει στην χρήση της κόλλας οικονομικό πλεονέκτημα.

### **Τα συστατικά μιας κόλλας**

Οι περισσότερες από τις κόλλες βασίζονται σε μίγματα από σύνθετα υλικά, που μπορεί να είναι οργανικά, ανόργανα ή και συνδυασμοί τους. Η επιλογή των υλικών αυτών γίνεται έτσι ώστε τα συγκολλητικά να αποκτήσουν τις, κατά το δυνατόν, καλύτερες ιδιότητες συγκόλλησης. Το βασικό όμως συστατικό, που προκαλεί την συγκόλληση και δημιουργεί τις μηχανικές αντοχές στο σημείο σύνδεσης είναι συνήθως μια οργανική ρητίνη, αλλά μπορεί να είναι επίσης ένα ελαστικό, μια

ανόργανη ένωση ή ένα φυσικό προϊόν. Τα άλλα συστατικά που περιέχονται στην κόλλα εξυπηρετούν συνήθως κάποιους άλλους σκοπούς και αυτά μπορεί να είναι:

α) διαλύτες. Αυτοί αποτελούν το διαλυτικό συστατικό για τα άλλα συγκολλητικά συστατικά και παράλληλα δημιουργούν την επιθυμητή ρευστότητα στην κόλλα, η οποία εξασφαλίζει μια ενιαία διασπορά του συγκολλητικού επάνω στις προς συγκόλληση επιφάνειες. Παράλληλα βέβαια διάφορες υγρές ρητίνες προστίθενται στο μίγμα για να επιτευχθεί η επιθυμητή ρευστότητα.

β) καταλύτες και σκληρυντές. Αυτοί είναι συστατικά που βοηθούν την διαδικασία της συγκόλλησης. Οι σκληρυντές επιδρούν με χημική σύνδεση με το συγκολλητικό υλικό και βασίζονται σε μια ποικιλία υλικών, όπως πολυμερή καθώς και μίγματά τους. Η αναλογία του συγκολλητικού με τον σκληρυντή εξαρτάται άμεσα από τις φυσικές ιδιότητες τις κόλλας και μπορεί να ποικίλει σε ένα μικρό φάσμα τιμών. Οι καταλύτες, που κατά την διάρκεια της διαδικασίας παραμένουν αναλλοίωτοι, λειτουργούν βοηθώντας τις θερμοπλαστικές ρητίνες (βασίζονται στην θερμότητα κατά την εφαρμογή τους) για την μείωση του χρόνου συγκόλλησης και την αύξηση των διασταυρώσεων μέσα στο μόριο του συνθετικού πολυμερούς. Σαν καταλύτες χρησιμοποιούνται διάφορα οξέα, βάσεις, άλατα, ενώσεις του θείου και υπεροξείδια και αντίθετα με τους σκληρυντές απαιτούνται μικρές ποσότητες για την επίδραση στην διαδικασία της συγκόλλησης.

γ) επιταχυντές, σταθεροποιητές και επιβραδυντές. Αυτές οι ουσίες ελέγχουν την ταχύτητα της διαδικασίας συγκόλλησης. Ο επιταχυντής είναι ένα συστατικό που επιταχύνει την διαδικασία συγκόλλησης με την καταλυτική ένωσή του με το συγκολλητικό υλικό. Ο σταθεροποιητής σταματά την διαδικασία συγκόλλησης, μετά την επιβράδυνση που προκαλεί ο επιβραδυντής και παράλληλα παρατείνει την αποθήκευση και την εργάσιμη ζωή μιας κόλλας.

δ) μετατροπείς. Οι μετατροπείς είναι ουσίες που προστίθενται στο συγκολλητικό μίγμα για να αλλάξουν τις ιδιότητες του συγκολλητικού, που έχει στερεοποιηθεί, σε σχέση με εκείνες που δίνει ο κατασκευαστής. Οι μετατροπείς περιλαμβάνουν fillers, extenders, αραιωτικά, πλαστικοποιητές, σταθεροποιητές ή υγραντικά αντιδραστήρια και το κάθε υλικό από τα προηγούμενα χρησιμοποιείται για ειδική χρήση.

Τα fillers (πληρωτικά υλικά) είναι μη συγκολλητικά υλικά που βελτιώνουν τις συνθήκες συγκόλλησης, την σταθερότητα του συγκολλητικού, την αντοχή καθώς και άλλες ιδιότητες του συγκολλητικού υλικού. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως, σκόνη ξύλου, διοξείδιο του πυριτίου, σκόνης μετάλλων, αργίλων και ίνες γυαλιού. Μερικά fillers λειτουργούν και σαν extenders.

Τα extenders (βελτιωτικά της καλυπτικότητας του πολυμερούς) είναι υλικά τα οποία έχουν συνήθως συγκολλητικές ιδιότητες και προστίθενται στο συγκολλητικό μίγμα για να μειώσουν την συγκέντρωση των άλλων συγκολλητικών και επομένως το κόστος της κόλλας. Τα extenders έχουν συχνά θετικό χαρακτήρα στις μετατροπές των φυσικών χαρακτηριστικών της κόλλας με την δημιουργία σπλισμού στην ρητίνη, η οποία σε άλλες περιπτώσεις έχει μικρές μηχανικές αντοχές. Κοινά extenders είναι τα άλευρα και οι κονιοποιημένες συνθετικές ρητίνες.

Τα αραιωτικά είναι γενικά διάφορα πτητικά υγρά, τα οποία προστίθενται σε ένα συγκολλητικό για να μετατρέψουν την συνοχή και τις ιδιότητες συγκόλλησης του συγκολλητικού.

Οι πλαστικοποιητές προστίθενται στο συγκολλητικό μίγμα για να δημιουργήσουν στην σύνδεση μια ελαστικότητα. Επίσης οι πλαστικοποιητές μπορούν να ελαττώσουν την ρευστότητα κατά την τήξη σε διάφορες κόλλες που ενεργοποιούνται με την θερμοκρασία ή να χαμηλώσουν την ελαστικότητα μιας στερεοποιημένης κόλλας.

Οι σταθεροποιητές προστίθενται σε ένα συγκολλητικό για να αυξήσουν την ανθεκτικότητά του ενάντια σε διάφορες συνθήκες όπως φως, θερμότητα, ακτινοβολία κλπ.

Τα υγραντικά μέσα δημιουργούν διεπιφανειακή επαφή μεταξύ κόλλας και επιφανειών συγκόλλησης με την αύξηση της ύγρανσης και των επεκτατικών ιδιοτήτων του συγκολλητικού υλικού.

Για να χρησιμοποιηθεί η κάθε κόλλα πρέπει να γίνει καταγραφή και έλεγχος του τρόπου παρασκευής, του τρόπου εφαρμογής, στο χρώμα μετά από την στερεοποίηση, στο ιξώδες, του χρόνου σκλήρυνσης, της αποτελεσματικότητας συναρτήσεως του χρόνου, στην πρόσφυση στο γυαλί, στην επίδραση των υπεριωδών ακτινών, της θερμοκρασίας και της υγρασίας καθώς και στον δείκτη διάθλασης σχετικά με το γυαλί.

Για την συγκόλληση του γυαλιού προτιμότερη είναι εκείνη η κόλλα που έχει δείκτη διάθλασης του φωτός παραπλήσιο με το δείκτη διάθλασης που έχει το προς συγκόλληση γυαλί.

## **ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΙΑΣ ΚΑΛΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ**

### **Γυαλί με ρωγμές**

Η αντοχή των συγκολλητικών ουσιών, που απαιτείται για την σύνδεση των ρωγμών, είναι μικρότερη από εκείνη που απαιτείται για την συνένωση σπασμένων

κομματιών. Έτσι η κλίμακα των κατάλληλων πολυμερών μπορεί να επεκταθεί και να συμπεριλάβει κατηγορίες, όπως αυτή των ακρυλικών, οι οποίες δεν είναι κατάλληλα συγκολλητικά για το γυαλί. Είναι επίσης δυνατό, όταν πρόκειται για πολύ λεπτές ρωγμές, να χρησιμοποιηθούν κόλλες με μικρή αντίσταση στο κιτρίνισμα.

Όταν ο δείκτης διάθλασης μιας ρωγμής διαφέρει σε μεγάλο βαθμό, της τάξης του 0.235, από εκείνον του σώματος του γυαλιού, είναι προτιμότερο να επαναπροσδιοριστεί η τιμή του δείκτη διάθλασης της ρωγμής καθορίζοντας, για παράδειγμα, τις σειρές των υγρών εμβάπτισης, όπου η εισχώρηση γίνεται με τριχοειδή αναρρίχηση, ώστε η ρωγμή να είναι λιγότερο ορατή.

Από την στιγμή κατά την οποία έχει επιλεγεί μια συγκολλητική ουσία κατάλληλου δείκτη διάθλασης, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ταχύτητα εισχώρησής της στη ρωγμή με τριχοειδή αναρρίχηση με θέρμανση της ρητίνης, για την μείωση του ιξώδους της. Ο κίνδυνος βέβαια της εξάπλωσης της ρωγμής κατά την θέρμανση του γυαλιού, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς επίσης και το κιτρίνισμα της συγκολλητικής ουσίας.

### **Σπασμένο γυαλί**

Η ακριβής ανάταξη των σπασμένων κομματιών θεωρείται πάρα πολύ σημαντική. Μερικές φορές τα κομμάτια μετακινούνται ελαφρά κατά την διάρκεια της στερεοποίησης ή ξήρανσης της συγκολλητικής ουσίας. Μια χρήσιμη τεχνική, είναι η εφαρμογή μιας μικρής σταγόνας κυανοακρυλικής κόλλας, προσωρινά, πριν από την εφαρμογή της κόλλας που έχει επιλεγεί για την συγκόλληση. Οι κυανοακρυλικές κόλλες δεν συνιστώνται για την τελική συγκόλληση ενός γυαλιού, διότι μια τέτοια σύνδεση δεν αντέχει στον χρόνο.

Όταν πρόκειται για κομμάτια επίπεδου γυαλιού ή ελαφρά κυρτά κομμάτια, είναι σκόπιμο να επιβεβαιώνεται η καλή εφαρμογή τους. Η εξέταση γίνεται με την μέθοδο της ανάκλασης φθορισμού, όπου όταν τα γυάλινα κομμάτια είναι τοποθετημένα σωστά, το αντικείμενο εμφανίζεται λείο και ακέραιο.

### **Γυαλί με ρωγμές ή σπασίματα**

Συνήθως, μετά την συγκόλληση, παρατηρείται μια πολύ μικρή γραμμή στην ρωγμή ή στις άκρες των θραυσμάτων, η οποία παραμένει στην γυάλινη επιφάνεια μετά την συγκόλληση και οφείλεται στην δημιουργία μιας τραχείας επιφάνειας ρητίνης πάνω στο γυαλί. Η γραμμή αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με απομάκρυνση και της πιο μικρής ποσότητας περίσσειας ρητίνης κατά μήκος της ακμής της ρωγμής ή του σπασίματος με ένα film οξέος πάχους 12μ, το οποίο απομακρύνεται από την επιφάνεια όταν η ρητίνη έχει στερεοποιηθεί πλήρως.

Η τεχνική αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις, διότι υπάρχουν συγκολλητικές ουσίες που σχηματίζουν πολύ ισχυρούς δεσμούς με το οξύ αυτό.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Β. Κασελούρη-Ρηγοπούλου, “Χημεία και Τεχνολογία Πυρίμαχων και Γυαλιού”, Αθήνα, 1990, σελ. 1-2, 10-13.
2. Α.Βατάλης, Επιστήμη & Τεχνολογία Υλικών, 2η εκδ, εκδ. Ζήτη, Θεσ/κη 2009.
3. Α.Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, 8η εκδ, Πάτρα, 2008.
4. Γυαλί τεχνολογία, διάβρωση και συντήρηση ΕΛΕΝΗ Κ. ΚΟΝΤΟΥ, ΑΘΗΝΑ 1995
5. Glass science, ROBERT H. DOREMUS
6. High-performance glasses, M. Cable & J. M. Parker