



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΔΕΜΕΡΤΖΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ : Β. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ, Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2009

ΑΘΗΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε μετά από την ανάθεση που έγινε από τον τομέα Θαλασσίων Κατασκευών και σκοπός ήταν η βαθύτερη διερεύνηση των οπτικών ινών στα πλοία. Όσον αφορά το θεωρητικό μέρος, έγινε εκτεταμένη έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, η οποία καλύπτει τις κυριότερες εφαρμογές του θέματος. Στο πειραματικό μέρος, εκτελέστηκαν δύο πειράματα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για τη σύγκριση των αισθητήρων οπτικών ινών, σε σχέση με τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., κ. Ν. Τσούβαλη και κ. Β. Παπάζογλου, για τη συμβολή τους στη διπλωματική εργασία. Χωρίς τη βοήθεια, την καθοδήγηση και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας. Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία μου στάθηκε σε όλο το χρονικό διάστημα που διήρκεσε η συγγραφή της διπλωματικής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελίδα
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	
2.1 Επιθεώρηση Μεταλλικών Κατασκευών	4
2.2 Συστήματα Παρακολούθησης Ακεραιότητας Κατασκευών	7
2.3 Ολοκληρωμένα Συστήματα Διαχείρισης του Πλοίου	9
2.4 Ανίχνευση και Εκτίμηση Ζημιάς με τη Χρήση Ενσωματωμένων Αισθητήρων Οπτικών Ινών	12
3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	
3.1 Γενικά	14
3.2 Οπτικοί Αισθητήρες	22
4. ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ FIBER BRAGG GRATINGS	
4.1 Εισαγωγή	31
4.2 Βασικές Αρχές Ανίχνευσης των FBG	36
5. ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ	
5.1 Εισαγωγή	42
5.2 Κάμψη	42
5.3 Θεωρητικό Μοντέλο	44
5.4 Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων	54
5.5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	65
6. ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΟΠΩΣΗΣ	
6.1 Εισαγωγή	66
6.2 Κόπωση	66
6.3 Θεωρητικό Μοντέλο	69
6.4 Ανάλυση Πειραματικών Δεδομένων	79
6.5 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	89
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

1. Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή οπτικών ινών στα πλοία. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε άλλες επιστημονικές εφαρμογές, όπως η οπτική και οι τηλεπικοινωνίες. Τα τελευταία χρόνια όμως, έχει αρχίσει να γίνεται χρήση των οπτικών ινών και σε περιοχές της μηχανικής όπως πλοία, αεροπλάνα, γέφυρες, κτίρια κ.τ.λ. Οι οπτικές ίνες έγιναν πιο δημοφιλείς, κυρίως λόγω των αισθητήρων οπτικών ινών και των πολλών εφαρμογών που έχουν.

Στα πλοία οι οπτικές ίνες δε χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, αλλά σε συστήματα παρακολούθησης των κατασκευών. Τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται παράλληλα με τις γνωστές μεθόδους επιθεώρησης (inspection) και δίνουν πληροφορίες για τη συνολικότερη εικόνα του πλοίου. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στις μεθόδους επιθεώρησης και και υπόλοιπα συστήματα διαχείρισης του πλοίου.

Ακολουθώντας στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των οπτικών ινών και του τρόπου λειτουργίας τους. Εξετάζονται τα διάφορα είδη οπτικών ινών και στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των οπτικών αισθητήρων και των διαφορών που έχουν σε σχέση με άλλους αισθητήρες.

Στο κεφάλαιο 4 συνεχίζεται η περιγραφή των οπτικών αισθητήρων και παρουσιάζεται ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος αισθητήρας οπτικών ινών, το Fiber Bragg Grating (FBG). Περιγράφεται αναλυτικά η δομή του και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί και μετράει την παραμόρφωση και τη θερμοκρασία.

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αισθητήρων FBG στα πλαίσια της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση τους με τους κλασικούς αισθητήρες (ηλεκτρομηκυσίόμετρα – strain gauges). Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται το πρώτο πείραμα, το οποίο ήταν κάμψη τριών σημείων ενός δοκιμίου με οπή, ενώ στο κεφάλαιο 6, αναλύεται το πείραμα κόπωσης σε δοκίμιο με τεχνητή ρωγμή. Στα δύο πειράματα τοποθετήθηκαν αισθητήρες σε πολλές διαφορετικές θέσεις, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η συμπεριφορά των αισθητήρων σε καταστάσεις εφελκυσμού, θλίψης, πλαστικών παρομορφώσεων και εναλλασσόμενης φόρτισης. Τέλος στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα για τους οπτικούς αισθητήρες, τα οποία προέκυψαν από τα πειράματα.

2. Συστήματα Παρακολούθησης Κατασκευών

2.1

Επιθεώρηση μεταλλικών κατασκευών

Εισαγωγή

Όταν ένα πλοίο σχεδιάζεται, το πάχος των ελασμάτων της γάστρας υπολογίζεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα και αντοχή του σκάφους σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του. Καθώς ο χρόνος περνά τα ελάσματα διαβρώνονται και το πάχος μπορεί να μειωθεί επικίνδυνα. Η κατάσταση του πλοίου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μπορεί να χειροτερέψει. Για να παρακολουθείται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου, ελέγχεται συχνά από το νηογνώμονα σύμφωνα με συγκεκριμένες επιθεωρήσεις, οι οποίες απαιτούν οπτικό έλεγχο και παχυμετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, σε επιθεωρήσεις που γίνονται περιοδικά, λαμβάνονται μετρήσεις του πάχους σε χιλιάδες σημεία σε όλη την κατασκευή του πλοίου. Ελέγχεται, επίσης, το σκάφος για ύπαρξη ρωγμών, καθώς και η κατάσταση των προστατευτικών βαφών.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων γίνεται με μη αυτόματο τρόπο και απαιτείται μεγάλη σπατάλη χρόνου και ανθρωποωρών για να ελεγχθεί η κατάσταση σύμφωνα με τα πρότυπα που θέτουν οι νηογνώμονες. Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων αφορούν ένα δείγμα της κατασκευής (π.χ. μερικούς νομείς, και σημεία του καταστρώματος ή του πυθμένα) έτσι ώστε να μην είναι εύκολο να παρακολουθηθεί όλη η κατασκευή. Τέλος, δεν μπορεί να παρακολουθηθεί η εξέλιξη με το πέρασμα του χρόνου, αφού οι μετρήσεις δεν λαμβάνονται στα ίδια σημεία.

Επιθεώρηση (inspection)

Επιθεώρηση, νοείται η διαδικασία της μέτρησης, της εξέτασης, της δοκιμής, ή οποιασδήποτε άλλης μεθόδου για την ανεύρεση ορισμένων χαρακτηριστικών ενός προϊόντος, συνδυαζόμενη με την αποτίμηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις προδιαγραμμένες τιμές των χαρακτηριστικών αυτών. Το τελικό αποτέλεσμα μιας επιθεώρησης είναι η αποδοχή ή απόρριψη του προϊόντος.

Οι συμβατικές μέθοδοι επιθεώρησης βασίζονται είτε σε οπτική επιθεώρηση είτε σε μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου (nondestructive testing - NDT). Οι NDT είναι όλες εκείνες οι μέθοδοι που, χρησιμοποιώντας τεχνικά μέσα, δίνουν τη δυνατότητα να διερευνηθεί η ακεραιότητα, η φύση ή σύνθεση των υλικών και τα αποτελέσματα μερικών κατεργασιών χωρίς να μεταβάλλουν ή καταστρέψουν τη φυσική τους κατάσταση. Οι πιο πολλές μέθοδοι NDT αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Πρόσφατες εξελίξεις στη φυσική, τους υπολογιστές και την επεξεργασία σήματος έχουν οδηγήσει στη βελτίωση της αξιοπιστίας των ήδη υπάρχουσών NDT, καθώς και σε νέες τεχνικές.[2] Τα πιο κοινά μέσα ανίχνευσης στις NDT είναι :

Οπτικός Έλεγχος

Η οπτική επιθεώρηση είναι η πιο απλή μορφή εκτίμησης της ακεραιότητας της κατασκευής. Η μέθοδος είναι αποτελεσματική για τον εντοπισμό προβλημάτων πάνω στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια. Ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό μπορεί να γίνει έλεγχος είτε με το μάτι είτε με τη χρήση μικροσκοπίου. Η επιθεώρηση με το μάτι δίνει λίγες πληροφορίες για τη μορφή της ζημιάς ή για την έκτασή της, ειδικότερα σε σύνθετα υλικά στα οποία μπορεί να υπάρχει πρόβλημα μεταξύ των στρώσεων και να μην είναι εμφανές. Η δεύτερη μέθοδος, ενώ μπορεί να προσφέρει περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά στην ανάπτυξη ρωγμών σε μεταλλικά υλικά, ή την αποκόλληση στρώσεων σε σύνθετα υλικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα σε συνθήκες εργαστηρίου [1].

Έλεγχος με υπερήχους

Οι υπέρηχοι είναι ελαστικοί κυματισμοί όπως και οι ακουστικοί, μόνο που η συχνότητά τους είναι μεγαλύτερη από αυτή που οι ανθρώπινες ακουστικές αισθήσεις μπορούν να συλλάβουν. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στο βιομηχανικό υπερηχητικό έλεγχο έχουν εύρος από 0.5 MHz έως 5 MHz. Οι υπέρηχοι μεταδίδονται στα μεταλλικά υλικά με καθορισμένη ταχύτητα η οποία εξαρτάται τόσο από το συγκεκριμένο μέσο όσο και από τον τύπο κυματισμού, και ανακλώνται όταν συναντήσουν στο υλικό που μεταδίδονται εμπόδια διαφορετικών ακουστικών ιδιοτήτων. Μπορούμε να έχουμε διαφόρους τύπους παλμών στα υλικά :

- Διαμήκεις κυματισμούς
- Εγκάρσιους κυματισμούς
- Επιφανειακούς κυματισμούς
- Κυματισμούς του Lamb

Οι υπέρηχοι παράγονται από ειδικά πιεζοηλεκτρικά πλακίδια (πομποδέκτες) με ηλεκτρική διέγερση. Ο υπερηχητικός πομποδέκτης συμπεριφέρεται ως ένα χαλύβδινο έλασμα που μετά τη μετατόπισή του από τη θέση ισορροπίας αφήνεται ελεύθερο να ταλαντωθεί. Η ελεύθερη συχνότητα ταλάντωσης του πομποδέκτη (F), εξαρτάται από τη φύση του ιδίου και το πάχος του.

$$F = c \frac{k}{2s}$$

όπου :

k = 1, 2, 3...

s = πάχος

c = σταθερή ταχύτητα ήχου στο πιεζοηλεκτρικό υλικό

Από την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το πάχος του πομποδέκτη.

Μέθοδος με Παρασιτικά Ρεύματα

Η συγκεκριμένη μέθοδος λειτουργεί με το να ανιχνεύει αλλαγές στην ηλεκτρομαγνητική αντίσταση (εμπέδηση) λόγω παραμόρφωσης του υλικού. Ένα πηνίο διεγείρεται με εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα για να προκαλέσει κλειστούς βρόχους ρεύματος στο υλικό το οποίο εξετάζεται. Αυτοί οι κλειστοί βρόγχοι, οι οποίοι ονομάζονται παρασιτικά ρεύματα, αλλοιώνονται λόγω ελαττώματων στο υλικό. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για να ανιχνεύει παραμορφώσεις και ρωγμές σε μικρά δείγματα και γύρω από οπές με τους κατάλληλους αισθητήρες, καθώς και τη διάβρωση, εξαιτίας της ικανότητας της μεθόδου να μετράει το πάχος. Η μέθοδος με παρασιτικά ρεύματα χρησιμοποιείται συχνά επειδή είναι εύκολη στην εφαρμογή και δεν χρειάζεται ακριβό εξοπλισμό. Τα μειονεκτήματά της όμως είναι ότι χρειάζεται μεγάλο ποσό ισχύος και ότι τα δεδομένα που παράγονται είναι πολύ πολύπλοκα στην ερμηνεία τους, πράγμα που κάνει την ανίχνευση του ελαττώματος δύσκολη.

Ακουστικές Εκπομπές

Όλα τα μεταλλικά στερεά σώματα εμφανίζουν ελαστική και πλαστική συμπεριφορά πριν τη θραύση όταν υπόκεινται σε εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο. Η γρήγορη απελευθέρωση της ελαστικής ενέργειας είναι γνωστή ως Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ). Η συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί για παράδειγμα να απελευθερωθεί λόγω κίνησης διαταραχών, μικροσκοπικών αποκολλήσεων, τριβής, διάδοσης ρωγμής κ.ά. Υπάρχουν πολλοί άλλοι λόγοι ΑΕ σε διάφορα υλικά. Η ενέργεια που εκπέμπεται από τη ζημιά μπορεί να είναι με τη μορφή συνεχών ή διακριτών ακουστικών σημάτων. Ένας αριθμός από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του σήματος χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ελαττώματων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι, διάρκεια σήματος, μέγιστο πλάτος, ενέργεια σήματος, χρόνος απόκρισης. Το εύρος συχνότητας των ακουστικών εκπομπών είναι από 10 kHz έως 1 MHz. Η απελευθέρωση των ΑΕ μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλους αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, πιεζοηλεκτρικά ή μικρόφωνα. Οι ΑΕ έχουν επιτυχημένα εφαρμοστεί σε πολλές επιστημονικές περιοχές για την ανίχνευση ασυνεχειών, αστοχίες λόγω κόπωσης, σφάλματα συγκολλήσεων κ.λ.π. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου με χρήση των ΑΕ είναι ότι είναι εύκολες στη χρήση και δεν επηρεάζονται από σώματα με έντονες αλλαγές στη γεωμετρία.

Ραδιογραφικός Έλεγχος

Ο έλεγχος αυτός γίνεται με ακτίνες X ή γ που παράγονται από ειδικές ραδιογενείς συσκευές ή ραδιενεργά ισότοπα, όπως το Ir192, το Co60, το Cs137 κ.λ.π. Οι ακτίνες που χρησιμοποιούνται στον ραδιογραφικό έλεγχο είναι της ίδιας φύσεως με εκείνες των φωτεινών, μικρότερου όμως μήκους κύματος και μεγαλύτερης ενέργειας. Οι ακτίνες αυτές από την ιδιότητα που έχουν να ιονίζουν τα άτομα των αερίων που διασχίζουν λέγονται ιονίζουσες ακτίνες. Ο έλεγχος αυτός είναι δυνατός από τη στιγμή που οι ιονίζουσες ακτίνες μπορούν να διαπεράσουν, βάσει της ενέργειάς τους, και τα μη διαφανή σώματα στο κοινό φως. Φυσικά, στην πορεία τους μέσα από τα διάφορα σώματα απορροφούνται ολικά ή μερικά.

Διεισδυτικά Υγρά

Η μέθοδος ελέγχου με διεισδυτικά υγρά(ΔΥ) επιτρέπει την εξερεύνηση και εντοπισμό των επιφανειακών βλαβών στα μη πορώδη υλικά. Μετά από προσεκτικό καθαρισμό της εξεταζόμενης επιφάνειας διανέμεται σε αυτή το υγρό και του δίνεται ο χρόνος να διεισδύσει. Μετά από τη διείσδυση καθαρίζεται και πάλι η επιφάνεια από τα πλεονάσματα του ΔΥ και διανέμεται ένα απορροφητικό μέσο. Η παρατήρηση των σχηματιζόμενων σημείων αρχίζει αμέσως μετά την εφαρμογή της απορροφητικής ουσίας. Η επιτυχία και ευαισθησία της μεθόδου συνδέεται με τη δυνατότητα εντοπισμού της βλάβης.

Μαγνητοσκοπικός Έλεγχος

Ο μαγνητοσκοπικός έλεγχος συνίσταται στη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου στο υπό έλεγχο μέταλλο. Ως εκ τούτου είναι δυνατός μόνο στα μαγνητιζόμενα μέταλλα και για ελαττώματα επιφάνειας αμέσως κάτω από την επιφάνεια (2-3 mm), τουλάχιστο στους παραδοσιακούς τρόπους εφαρμογής του. Ο μαγνητοσκοπικός έλεγχος είναι δυνατός διότι στο σημείο ασυνέχειας του υλικού οι γραμμές της μαγνητικής ροής υφίστανται μια παρέκκλιση. Δηλαδή οι γραμμές της μαγνητικής ροής ξεπερνούν το εμπόδιο υπερπηδώντας το, γι' αυτό δημιουργούν στο σημείο εξόδου και επανεισόδου ένα μαγνητικό δίπολο. Το μέσο που συχνά χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των βλαβών είναι οι μαγνητικές σκόνες.

2.2

Συστήματα Παρακολούθησης Ακεραιότητας Κατασκευών (Health Monitoring)

Πολλά ατυχήματα με μεγάλα δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην, τα οποία προκάλεσαν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προκλήθηκαν από αστοχία στη γάστρα λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών και κακή κατάσταση του σκάφους.

Για τον έλεγχο των ζημιών από κόπωση, καθώς και για την ανίχνευση ρωγμών που προκύπτουν από μεγάλα φορτία σε άσχημες καιρικές συνθήκες, εκτός των τεχνικών NDT χρησιμοποιούνται και συστήματα για την παρακολούθηση της κατάστασης της γάστρας του πλοίου [1].

Σε πολλές περιοχές της μηχανικής για να εξασφαλιστεί κατασκευαστική ακεραιότητα και ασφάλεια, χρησιμοποιούνται τεχνικές παρακολούθησης (health monitoring). Η κατασκευαστική ακεραιότητα σχετίζεται άμεσα με την απόδοση της κατασκευής. Επομένως, είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους όσον αφορά στην ασφάλεια της λειτουργίας, ειδικότερα όταν πρόκειται για μεταφορικά μέσα όπου κατασκευαστικές αστοχίες μπορεί να οδηγήσουν σε ανθρώπινες απώλειες, απώλειες φορτίου καθώς και σε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η εντατική έρευνα στις περιοχές της κόπωσης και της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών, καθώς και οι τεχνικές ελέγχου (inspection techniques) έχουν βοηθήσει έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα πολύ υψηλό επίπεδο κατασκευαστικής αξιοπιστίας. Αυτό έχει επιτευχθεί με την κατανόηση της αντοχής των υλικών, τη γνώση των συνθηκών φόρτισης από το περιβάλλον, σε συνδυασμό με αναπτυγμένες παραγωγικές διαδικασίες και, φυσικά, αξιόπιστες τεχνικές ελέγχου και συντήρησης. Ακόμη και σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ψαθυρά υλικά ή υπάρχουν περιοχές που ο έλεγχος είναι δύσκολος, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση γνώσεις από αριθμητικά μοντέλα, τα οποία καθορίζουν πλήρως πώς γίνεται η ανάπτυξη των ρωγμών, ώστε να είναι ασφαλής η κατασκευή. Άρα λοιπόν το ενδιαφέρον για αυτόματα συστήματα ολοκληρωμένου ελέγχου θα μπορούσε να είναι η ανάγκη για ακόμα περισσότερη αξιοπιστία και ασφάλεια. Αυτό συμβαίνει διότι η ασφάλεια της κατασκευής εξαρτάται πάρα πολύ από την επιθεώρηση και τον έλεγχο ο οποίος είναι ο πιο αδύναμος κρίκος της αλυσίδας. Βέβαια μόνο σε ειδικές περιπτώσεις ένα σύστημα αισθητήρων είναι πιο αξιόπιστο από τις τεχνικές επιθεώρησης. Αν όμως εξεταστεί υπό το πρίσμα της συνεχώς αυξανόμενης μεταφοράς προϊόντων και ανθρώπων, η οποία εκφράζεται σε εκατομμύρια τόνων και επιβατών, η μείωση κατασκευαστικών αστοχιών και η μεγαλύτερη ασφάλεια επιβάλλουν τη χρήση των συστημάτων παρακολούθησης της ακεραιότητας της κατασκευής (health monitoring).

Η κατάσταση της κατασκευής μπορεί να εκτιμηθεί είτε με άμεσους είτε με έμμεσους τρόπους. Με την πρώτη προσέγγιση ελέγχεται ο τύπος της ζημιάς (ρωγμές, διάβρωση, αποκόλληση στρώσεων σε σύνθετα υλικά κ.λ.π.) με εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών επιθεώρησης. Οι τεχνικές αυτές, βασιζόμενες σε φυσικά φαινόμενα, αφορούν την πραγματοποίηση μετρήσεων και έχουν το μειονέκτημα ότι οι μετρήσεις έχουν τοπικό χαρακτήρα και δεν αφορούν όλη την κατασκευή. Οι ήδη υπάρχουσες τεχνικές ελέγχου ποικίλουν από την οπτική επιθεώρηση με γυμνό μάτι έως τη σάρωση όλης της επιφάνειας με αυτοματοποιημένες μεθόδους. Με τις έμμεσες μεθόδους, η κατάσταση της κατασκευής μετρείται και συγκρίνεται με κάποια γνωστά χαρακτηριστικά τα οποία είχε πριν τη βλάβη. Προφανώς και στις δύο μεθόδους η ευαισθησία και η αξιοπιστία της επιθεώρησης επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει διότι, ενώ βασίζονται στους νόμους της φυσικής, εξαρτώνται από τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό και ,φυσικότητα, από τον ίδιο τον επιθεωρητή. Έτσι, ο ανθρώπινος παράγοντας υπεισέρχεται ιδιαίτερα όταν γίνονται επαναλαμβανόμενες και πάρα πολλές μετρήσεις, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται λανθασμένα συμπεράσματα.

Κόστος

Η συνεχόμενη και εν λειτουργία παρακολούθηση της κατάστασης της κατασκευής προσφέρει τη δυνατότητα να μειωθεί ο αριθμός της προγραμματισμένης και μη συντήρησης. Παρακολούθηση της ζημιάς και των φορτίων οδηγεί στην εκτίμηση της κατάστασης όλων των μερών από τα οποία αποτελείται η κατασκευή.

Οι επισκευές που προκύπτουν από κατασκευαστικά σφάλματα αυξάνουν το κόστος λειτουργίας με δύο τρόπους. Αφενός ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της επισκευής προκαλούν άμεσα κόστη, αφετέρου το μεταφορικό μέσο θα μείνει εκτός λειτουργίας κατά το διάστημα της επισκευής, επομένως προκύπτουν έμμεσα κόστη λόγω της

έλλειψης του όγκου παραγωγής ή της ανάγκης μίσθωσης άλλου μέσου. Για να μειωθούν τα κόστη της επισκευής και της συντήρησης γίνεται προσπάθεια επισκευής της βλάβης σε πρώιμο στάδιο, μειώνοντας έτσι τα άμεσα κόστη. Μια άλλη λύση θα ήταν να αναβληθούν όλες οι επισκευές έως ότου το μεταφορικό μέσο βρεθεί εκτός λειτουργίας για προγραμματισμένη συντήρηση, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τα έμμεσα κόστη.

Έξυπνες Κατασκευές (Smart structures)

Ονομάζουμε «έξυπνες» κατασκευές (smart structures) εκείνες οι οποίες είναι ικανές να αποκρίνονται και να προσαρμόζονται σε αλλαγές του περιβάλλοντός τους. Οι έξυπνες κατασκευές και τα έξυπνα υλικά έχουν προσφέρει νέες ευκαιρίες για την παρακολούθηση των κατασκευών (health monitoring). Ο σχεδιασμός έξυπνων κατασκευών περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων, επεξεργαστών σήματος, διαχειριστών κ.λ.π. Εφαρμογές των έξυπνων κατασκευών σε συστήματα παρακολούθησης κατασκευών περιλαμβάνουν αισθητήρες για αναγνώριση σφαλμάτων, παράλληλα με τη χρήση συστημάτων επεξεργασίας σήματος και παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Κύρια χαρακτηριστικά των τεχνολογιών των έξυπνων κατασκευών είναι η ευαισθησία και η αξιοπιστία τους, παράλληλα με τη μείωση του κόστους επιθεώρησης και αύξησης της ασφάλειας. Σε σύγκριση με τις συμβατικές λύσεις, οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ευαισθησία, υπό την προϋπόθεση ότι έχουν εγκατασταθεί σωστά. Αυτή η επιλογή σχετίζεται καθαρά με τη στρατηγική παρακολούθησης η οποία αφορά ελέγχους σε περιοχές που η πρόσβαση είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Ένα άλλο πλεονέκτημα των συστημάτων με έξυπνους αισθητήρες είναι η ικανότητά τους να ελέγχουν μεγάλες περιοχές και συγκεκριμένα να μετρούν τις ζημιές από κόπωση που έχουν γίνει στην κατασκευή. Τα συστήματα αυτά, που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν συνέχεια, είναι πρακτικά ικανά να μηδενίζουν το χρόνο μεταξύ των επιθεωρήσεων

2.3

Ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης του πλοίου

Η ανάπτυξη τεχνικών που επιτρέπουν ακριβείς μετρήσεις όσον αφορά τις κινήσεις του πλοίου, της κατάστασης θάλασσας και των φορτίων στη γάστρα, συμβάλλει στη δημιουργία προηγμένων συστημάτων για την παρακολούθηση και καταγραφή της κατάστασης του σκάφους με βάση επιλεγμένα επιχειρησιακά κριτήρια. Ο συνδυασμός όλων αυτών των τεχνικών σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

Τα συστατικά αυτού του ολοκληρωμένου συστήματος είναι :

- Παραδοσιακά συστήματα πλοήγησης
- Συστήματα πορείας καιρού
- Ενεργή επιχειρησιακή καθοδήγηση
- Συστήματα παρακολούθησης της γάστρας του πλοίου (health monitoring)

Συστήματα πορείας καιρού

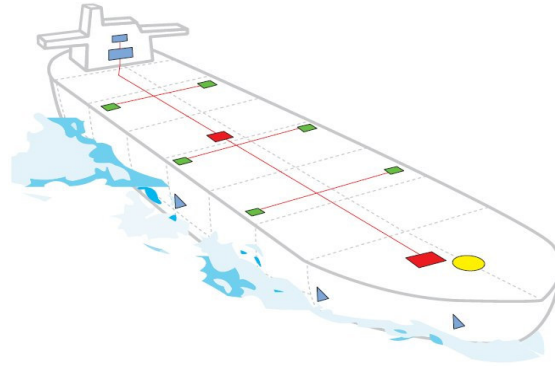
Τα συστήματα πορείας καιρού χρησιμοποιούνται για την εύρεση της συντομότερης και πιο οικονομικής διαδρομής από το σημείο αναχώρησης έως το σημείο άφιξης με την εφαρμογή πληροφοριών για την κατάσταση του καιρού (κυματισμός, άνεμος, θαλάσσια ρεύματα). Επιπλέον, πληροφορίες για την απώλεια της ταχύτητας του πλοίου λόγω των ανωτέρω παραγόντων ορίζονται με τη βοήθεια του συστήματος. Η πρόβλεψη του καιρού πραγματοποιείται βάσει πληροφοριών από δορυφόρους και από μετεωρολογικές υπηρεσίες. Εν συνεχεία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισαγωγής στο σύστημα το οποίο μοντελοποιεί τις καιρικές συνθήκες για τις επόμενες μέρες. Οι υπολογισμοί της βέλτιστης πορείας επαναλαμβάνονται κάθε μέρα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού με την ενημέρωση των μετεωρολογικών προγνώσεων. Άλλες εφαρμογές βελτιστοποίησης της διαδρομής περιλαμβάνουν κριτήρια όπως άνεση των επιβατών, φορτία στη γάστρα και ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου.

Συστήματα επιχειρησιακής καθοδήγησης

Τα εν λόγω συστήματα παρέχουν συνεχή καθοδήγηση στον χειριστή του σκάφους ή επιλογή βέλτιστου τρόπου χειρισμού του πλοίου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ασφάλεια στο φορτίο, το πλήρωμα και το σκάφος. Σκοπός του συστήματος είναι ότι το πλοίο θα πρέπει να λειτουργεί μέσα σε συγκεκριμένα όρια τα οποία είναι καθορισμένα εκ των προτέρων βάσει του επιχειρησιακού βιβλίου οδηγιών. Το σύστημα προειδοποιεί όταν κάποια τιμή υπερβεί τα όρια. Τα επιχειρησιακά βιβλία οδηγιών είναι μεγάλα σε όγκο και γι' αυτό το λόγο είναι δύσχρηστα, ειδικά σε επείγουσες καταστάσεις. Η φιλοσοφία του συστήματος είναι ότι πρέπει να παρακολουθεί τις κινήσεις του πλοίου και τα φορτία συνεχώς και να συγκρίνει τις τιμές τους με τα όρια που έχουν επιλεγεί και να πληροφορεί τον χειριστή του πλοίου για το τρέχον επίπεδο των τιμών των αποκρίσεων του πλοίου σε σχέση με τις οριακές τιμές. Επιπλέον, πρέπει να συμβουλεύει τον χειριστή πώς θα αποφύγει την υπέρβαση των ορίων με το να προτείνει είτε μείωση της ταχύτητας είτε αλλαγή πορείας.

Παρακολούθηση της κατάστασης της γάστρας του πλοίου

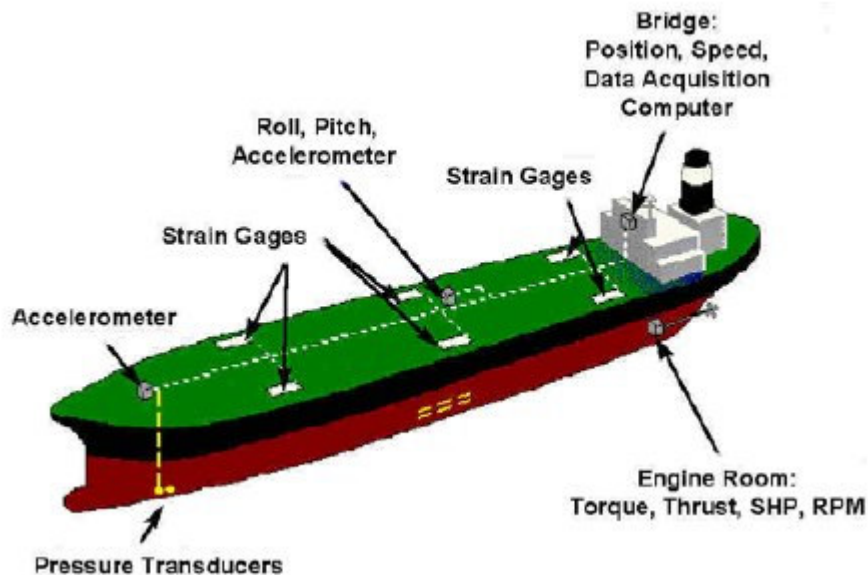
Τα συστήματα παρακολούθησης της γάστρας χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κόπωσης της κατασκευής καθώς και των κρουστικών φορτίων. Τα συστήματα βασίζονται σε μετρήσεις των τοπικών τάσεων σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων. Οι μετρήσεις λαμβάνονται κατά τακτά χρονικά διαστήματα από ένα σύστημα δεδομένων και παρουσιάζονται συνήθως με γραφική αναπαράσταση στη γέφυρα του πλοίου (βλ. σχήμα 2.1).



σχήμα 2.1

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκεύονται σε βάσεις δεδομένων και χρησιμοποιούνται για τη μακροπρόθεσμη κοπωτική ανάλυση της μεταλλικής κατασκευής. Οι μετρήσεις γίνονται με αισθητήρες παραμόρφωσης και έτσι υπολογίζονται οι τάσεις στην κατασκευή. Δύο σημαντικά προβλήματα της μεθόδου αυτής είναι, πρώτον η αξιόπιστη μεταφορά των αποτελεσμάτων από τους αισθητήρες στο σύστημα πληροφοριών και, δεύτερον, ο ακριβής εντοπισμός των σημείων που πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Το πρώτο πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση του σωστού εξοπλισμού, ενώ το δεύτερο με τη χρήση αποτελεσμάτων από εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των σημείων.

Για συστήματα που μετρούν παραμορφώσεις είναι κοινή πρακτική να συνδυάζονται με συστήματα κινήσεων του πλοίου καθώς και με επιταχυνσιόμετρα στην πλώρη (βλ. σχήμα 2.2). Αυτός ο συνδυασμός βοηθάει στη λειτουργικότητα του συστήματος αφού εκτός από την παρακολούθηση των τάσεων υπάρχουν ενδείξεις για φορτία σφυρόκρουσης και το σύστημα έχει περισσότερες πληροφορίες για τη συσχέτιση της κατάστασης της θάλασσας με τις κινήσεις του πλοίου και των φορτίων στη γάστρα.



σχήμα 2.2

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ολοκληρωμένων συστημάτων σε πλοία είναι :

Ασφάλεια

- Προστασία πληρώματος, σκάφους, φορτίου
- Αυξημένη άνεση επιβατών (σε επιβατηγά πλοία)
- Μειωμένες πιθανότητες αστοχίας λόγω έγκαιρης προειδοποίησης
- Η γάστρα δε φορτίζεται υπερβολικά
- Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών ζημιών

Μείωση κόστους

- Βέλτιστη επιθεώρηση και συντήρηση χωρίς περιττά έξοδα
- Μείωση του χρόνου που το πλοίο μένει ανεκμετάλλευτο
- Αύξηση της αξίας μεταπώλησης του σκάφους
- Πιθανή μείωση στο κόστος των ασφαλίσεων

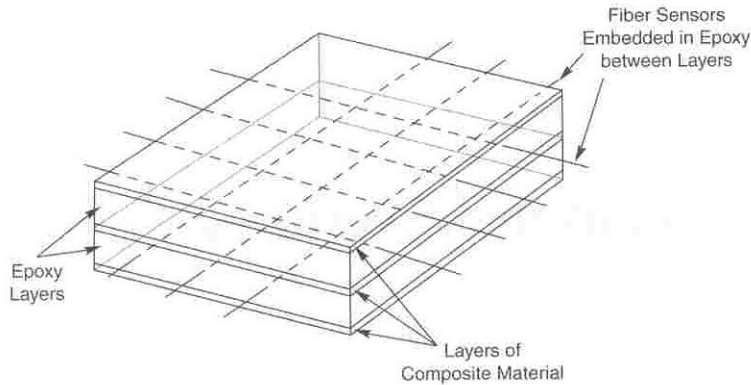
Ανταγωνιστικότητα

- Πλοίο πιο αξιόπλοο
- Ακριβής γνώση της καταπόνησης και της κόπωσης
- Επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του πλοίου

2.4

Ανίχνευση και εκτίμηση ζημιάς με τη χρήση ενσωματωμένων (embedded) αισθητήρων οπτικών ινών

Αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να τοποθετηθούν σε σύνθετα υλικά ή σε υλικά όπως οπλισμένο σκυρόδεμα για να φτιάξουν αυτό που ονομάζουμε έξυπνες κατασκευές (smart structures) ή έξυπνα περιβλήματα (smart skins). Ο στόχος είναι να παραχθεί ένα κατασκευαστικό στοιχείο το οποίο να παρακολουθεί την εσωτερική κατάσταση της κατασκευής (βλ. σχήμα 2.3) [5]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίδεται στο να πιστοποιηθεί ότι τα στοιχεία πληρούν όλα τα κριτήρια της μελέτης και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Οι αισθητήρες βέβαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε όλη τη διάρκεια ζωής του υλικού. Οι αισθητήρες οπτικών ινών αναλύονται διεξοδικά στο κεφάλαιο 3.



σχήμα 2.3

Ακόμη μία χρήση των ενσωματωμένων αισθητήρων οπτικών ινών είναι να παρακολουθούν τη διαδικασία της παρασκευής και σκλήρυνσης (curing) του σύνθετου υλικού. Οι αισθητήρες παρακολουθούν τη θερμοκρασία για να εξασφαλιστεί ότι οι συνθήκες σκλήρυνσης πληρούν όλες τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και προϋποθέσεις. Επιπλέον, μπορεί να παρακολουθηθούν οι παραμορφώσεις έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι τάσεις κυμαίνονται σε χαμηλές τιμές και δεν δημιουργούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Η ανίχνευση οπτικών ινών που έχουν υποστεί θραύση, δηλώνει ότι υπάρχουν σοβαρά προβλήματα με τοπικές ανωμαλίες στο υλικό. Κατά τη διάρκεια της χρήσης του υλικού οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν δεδομένα για τις τάσεις όταν αυτό φορτίζεται. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται και για τη μελέτη των ιδιοτήτων της κατασκευής.

Εφόσον η κατασκευή με τις ενσωματωμένες οπτικές ίνες είναι σε λειτουργία, οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιούν τους αισθητήρες για περιοδικούς ελέγχους της απόδοσης και της κατασκευαστικής ακεραιότητας (structural integrity). Εφαρμογές που ήδη χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες επιτυχώς είναι γέφυρες και φράγματα.

Η υπέρτατη χρησιμοποίηση των αισθητήρων οπτικών ινών θα μπορούσε να είναι ένα σύστημα το οποίο θα ελέγχει την κατασκευή σε πραγματικό χρόνο (real time control system) και θα μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση της κατασκευής. Παραδείγματος χάριν σε πολλές κατασκευές που δεν είναι πλήρως γνωστά τα όρια απόδοσης των υλικών της κατασκευής, γίνεται συντηρητική χρήση έτσι ώστε να είναι πάντα ασφαλής η κατασκευή. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο θα μπορούσε να δώσει ενδείξεις για το πόσο τα στοιχεία της κατασκευής αντέχουν στα αναπτυσσόμενα φορτία.

3. Οπτικές Ύνες και Οπτικοί Αισθητήρες

3.1

Οπτικές ίνες (γενικά)

Εισαγωγή

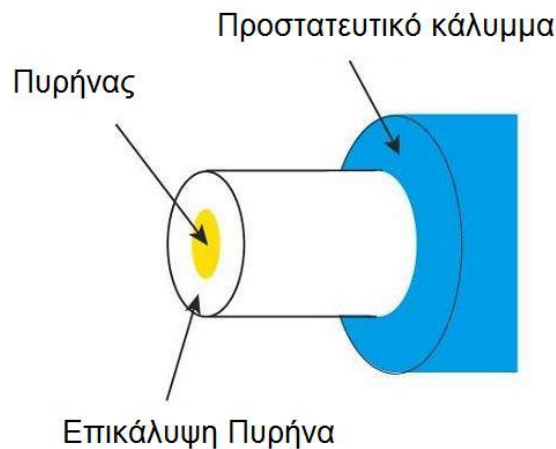


σχήμα 3.1

Η βασική αρχή της διάδοσης του φωτός που υπάρχει στις οπτικές ίνες (βλ. σχήμα 3.1) οφείλεται στους Daniel Collodon και Jaques Babinet στη δεκαετία του 1840. Μέσα στην επόμενη δεκαετία ο ιρλανδός εφευρέτης John Tyndall έκανε δημόσιες επιδείξεις σε σιντριβάνια. Πρακτικές εφαρμογές, όπως ο εσωτερικός φωτισμός στην οδοντιατρική, άρχισαν να εφαρμόζονται στις αρχές του εικοστού αιώνα. Οι μοντέρνες οπτικές ίνες, στις οποίες η ίνα γυαλιού περιβάλλεται από μια διαφανή επικάλυψη (cladding) με πιο ικανοποιητικό δείκτη διάθλασης, εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1950. Οι οπτικές ίνες άρχισαν να χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες στα τέλη της δεκαετίας του 1970, οπότε και είχε μειωθεί επαρκώς η εξασθένιση του σήματος. Από τότε μεγάλη πρόοδος έγινε για να βελτιωθούν οι ιδιότητες της ίνας που έχουν να κάνουν με την εξασθένιση του σήματος και το σκεδασμό του φωτός (επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τα σήματα να ταξιδεύουν μεγαλύτερες αποστάσεις και να μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες), καθώς και με το κόστος παραγωγής των οπτικών ινών. Το 1952 ο φυσικός Narinder Singh Kapany, βασισμένος στην εργασία του Tyndall, έκανε πειράματα που οδήγησαν στην ανακάλυψη της οπτικής ίνας. Αργότερα άλλες ανακαλύψεις έστρεψαν το ενδιαφέρον τους σε ίνες για τη μετάδοση εικόνας με κυρίαρχη εφαρμογή το ιατρικό γαστροσκόπιο. Μια ποικιλία από άλλες εφαρμογές εικόνας ακολούθησαν αργότερα.

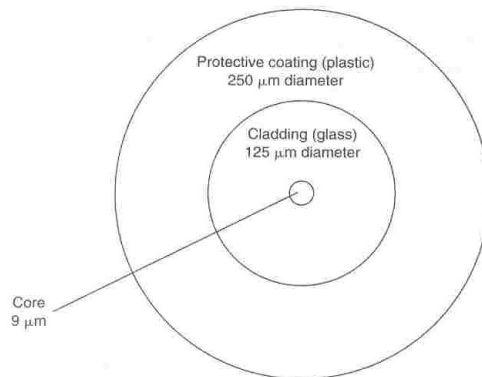
Δομή

Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας είναι αρκετά απλή (βλ. σχήμα 3.2). Ο πυρήνας (core) της ίνας ο οποίος οδηγεί το φως είναι από υλικό το οποίο έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επικάλυψή του (cladding). Η διαφορά στο δείκτη διάθλασης προκαλεί την ολική εσωτερική ανάκλαση και με αυτό τον τρόπο το φως οδηγείται μέσω του πυρήνα.



σχήμα 3.2

Τα μεγέθη του πυρήνα και της επικάλυψης έχουν μεγάλο εύρος ανάλογα με τον τύπο της ίνας. Τα σύνορα μεταξύ τους μπορεί να είναι σαφώς διαχωρισμένα ή να μεταβάλλονται προοδευτικά και ο δείκτης διάθλασης να αλλάζει απότομα (step – index) ή σταδιακά (graded – index). Μερικές ίνες υψηλής απόδοσης έχουν πολλαπλά στρώματα στα σύνορα πυρήνα – επικάλυψης.



σχήμα 3.3

Η τυπική διάμετρος της επικάλυψης για συνήθεις ίνες τηλεπικοινωνιών είναι 125 μm. Ένα πλαστικό κάλυμμα (protective coating) αυξάνει τη διάμετρο περίπου σε 250 μm διευκολύνοντας το χειρισμό και προστατεύοντας την επιφάνεια του γυαλιού από γρατσουνιές και άλλες μηχανικές ζημιές (βλ. σχήμα 3.3).

Υλικά κατασκευής

Οι περισσότερες ίνες κατασκευάζονται από πολύ καθαρό γυαλί με πάρα πολύ μικρά ποσοστά ατελειών για να μη μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης. Από χημικής άποψης οι καθαρότερες οπτικές ίνες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες και αποτελούνται από καθαρό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στην ιατρική καθώς και στο φωτισμό κατασκευάζονται από λιγότερο καθαρό γυαλί. Όπως όλα τα γυαλιά, έτσι και εκείνα από τα οποία κατασκευάζονται οι

ίνες έχουν δείκτη διάθλασης περίπου 1.5. Συνήθως η διαφορά στο δείκτη διάθλασης ανάμεσα στον πυρήνα και την επικάλυψη είναι μικρότερη του 1%. Μερικές ίνες παρασκευάζονται από πλαστικό το οποίο όμως δεν είναι τόσο καθαρό όσο το γυαλί, αλλά είναι πιο εύκαμπτο και ευκολότερο στο χειρισμό. Οι πλαστικές οπτικές ίνες είναι συνήθως step-index multimode ίνες, με διάμετρο πυρήνα 1 mm ή μεγαλύτερο. Αυτού του τύπου οι ίνες έχουν συνήθως μεγαλύτερη μείωση των ιδιοτήτων σε σχέση με τις ίνες γυαλιού. Δηλαδή το πλάτος του σήματος μειώνεται πιο γρήγορα κατά μήκος της ίνας. Συνήθως το πλαστικό χρησιμοποιείται ως εξωτερικό κάλυμμα για προστασία.

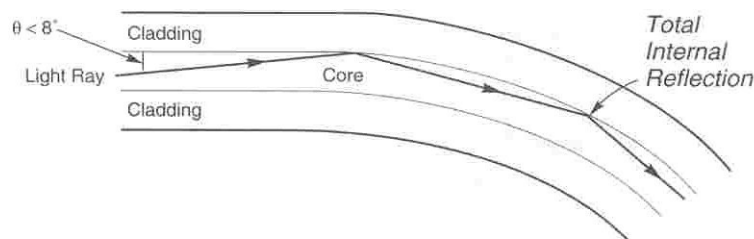
Οπτικές ίνες ειδικών εφαρμογών μπορούν να κατασκευάζονται και από άλλα υλικά. Για παράδειγμα, οι ενώσεις του φθορίου είναι διαφανείς σε μήκη κύματος μεγαλύτερα του υπέρυθρου, επομένως χρησιμοποιούνται σε υπέρυθρες εφαρμογές. Αυτές οι ίνες μπορούν να καλούνται ίνες γυαλιού γιατί οι ενώσεις αυτές είναι υαλώδους μορφής ή μη κρυσταλλικές, αλλά τυπικά προσδιορίζονται από το υλικό που είναι κατασκευασμένες.

Ιδιότητες

Μηχανικά οι ίνες έχουν μεγάλη αντοχή αλλά είναι ταυτόχρονα και εύκαμπτες. Οι λεπτές είναι πολύ πιο εύκαμπτες από εκείνες με μεγαλύτερη διάμετρο. Σε αντίθεση με τα καλώδια οι ίνες επανέρχονται στην αρχική κατάστασή τους (ευθεία) αφότου σταματήσουν να κάμπτονται. Οι ίνες από γυαλί είναι εξαιρετικά δυνατές αλλά μπορούν να αστοχήσουν εάν επιφανειακές ρωγμές διαδοθούν μέσω της ίνας. Τα πλαστικά καλύμματα προστατεύουν από αυτό το πρόβλημα.

Βασικές αρχές λειτουργίας

Ο τρόπος λειτουργίας των ινών περιγράφεται με βασικές αρχές της οπτικής και της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη. Το φως μπορεί να έχει τη μορφή είτε ηλεκτρομαγνητικού κύματος είτε φωτονίων (κβαντισμένης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας). Αυτή είναι η γνωστή διττή φύση του φωτός (κύματος/σωματιδίων). Η πιο απλή άποψη είναι να θεωρήσουμε το φως ως ακτίνες που ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές ανάμεσα ή διαμέσου οπτικών στοιχείων, τα οποία μπορούν να ανακλούν ή να διαθλούν τις ακτίνες στις επιφάνειες τους.



σχήμα 3.4

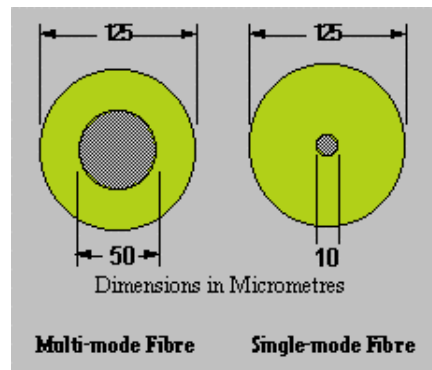
Δύο βασικά στοιχεία σε μία οπτική ίνα είναι ο πυρήνας και η επικάλυψη. Ο πυρήνας είναι το εσωτερικό κομμάτι της ίνας το οποίο οδηγεί το φως. Η επικάλυψη περιβάλλει τον πυρήνα εντελώς. Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι μεγαλύτερος από εκείνον

της επικάλυψης και έτσι το φως στον πυρήνα, όταν χτυπάει το σύνορο με την επικάλυψη υπό συγκεκριμένη γωνία, περιορίζεται στον πυρήνα μέσω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Η διαφορά στο δείκτη διάθλασης δε χρειάζεται να είναι μεγάλη. Πρακτικά είναι μόλις 1%. Αυτό επιτρέπει τη διάδοση του φωτός στις ίνες. Για λόγο των δεικτών διάθλασης ίσο με 0.99, η κριτική γωνία πρόσπτωσης είναι $\theta_c = 82^\circ$. Για αυτό το λόγο το φως περιορίζεται στον πυρήνα εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι 8° ή λιγότερο σε σχέση με την επιφάνεια (βλ. σχήμα 3.4).

Καταστάσεις (modes) της ίνας

Οι οπτικές ίνες οδηγούν τα κύματα σε συγκεκριμένες καταστάσεις (modes) οι οποίες περιγράφουν την κατανομή της ενέργειας του φωτός κατά μήκος του οδηγού (waveguide). Η ακριβής μορφή εξαρτάται από το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου φωτός και την αλλαγή του δείκτη διάθλασης που διαμορφώνει τον πυρήνα ο οποίος μπορεί να είναι πολύ πιο πολύπλοκος από τον απλό πυρήνα που περιγράφηκε προηγουμένως. Στην πραγματικότητα οι αλλαγές αυτές στο δείκτη διάθλασης δημιουργούν οριακές συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν το πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν μέσω του οδηγού (waveguide), όπως οι τοίχοι ενός τούνελ επηρεάζουν την ηχώ [5].

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ο αριθμός των καταστάσεων που μπορεί να υποστηρίξει η οπτική ίνα. Ίνες με μικρούς πυρήνες μπορούν να μεταδίδουν φως μόνο με μία κατάσταση (single-mode). Μπορεί να είναι πολύ δύσκολο το φως να εισέλθει στην ίνα, αλλά μόλις μπει, συμπεριφέρεται ομοιόμορφα. Είναι ευκολότερο να εισέλθει το φως σε ίνες με μεγαλύτερους πυρήνες, οι οποίοι μπορούν να υποστηρίξουν πολλές καταστάσεις (multi-mode), αλλά δε συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις καταστάσεις, καθιστώντας τη μετάδοση του φωτός πιο περίπλοκη (βλ. σχήμα 3.5).



σχήμα 3.5

Δύο πολλοί σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες της ίνας είναι η δομή του πυρήνα-επικάλυψης και η σύνθεση του γυαλιού. Το μέγεθος του πυρήνα και της επικάλυψης και η φύση της επιφάνειας μεταξύ τους, καθορίζουν τις ιδιότητες τις ίνας και πώς μεταδίδεται το φως σε διαφορετικά μήκη κύματος. Οι απλοί τύποι που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι οι :

- step – index
- graded – index

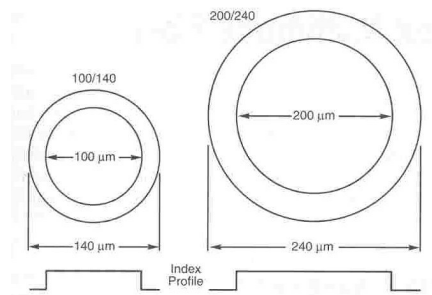
Στην πρώτη περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης αλλάζει απότομα στο σύνορο ανάμεσα στον πυρήνα (με τον υψηλό δείκτη διάθλασης) και την επικάλυψη (του χαμηλού δείκτη διάθλασης).

Στη δεύτερη περίπτωση, η αλλαγή αυτή είναι σταδιακή και υπάρχουν πολλά στρώματα (αλλάζουν οι ιδιότητες της ίνας).

Οι μορφές (modes) είναι σταθερά πρότυπα τα οποία μπορούν να ταξιδέψουν μέσα σε ένα οδηγό κύματος (waveguide).

Ίνες πολλών καταστάσεων (multi-mode fibers)

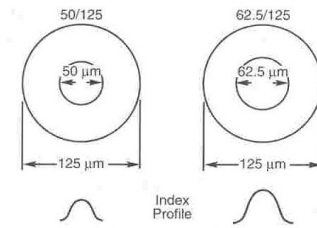
Ένα με μεγάλη διάμετρο πυρήνα (μεγαλύτερη των 10 μm) μπορεί να αναλυθεί με τη θεωρία της γεωμετρικής οπτικής. Σε μία τέτοια ίνα που ο δείκτης διάθλασης αλλάζει απότομα (step-index), οι ακτίνες του φωτός οδηγούνται κατά μήκος της ίνας βάσει της ολικής εσωτερικής ανάκλασης (βλ. σχήμα 3.6). Οι ακτίνες που συναντούν το σύνορο πυρήνα – επικάλυψης σε μεγάλη γωνία (μετρούμενη σχετικά με μια γραμμή παράλληλη στο σύνορο), μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία για το όριο, ανακλούνται εντελώς. Η κρίσιμη γωνία (η μικρότερη δυνατή για την ολική εσωτερική ανάκλαση) καθορίζεται από τη διαφορά του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στον πυρήνα και την επικάλυψη. Οι ακτίνες που συναντούν το όριο με μικρή γωνία εκτρέπονται από τον πυρήνα, αλλάζουν κατεύθυνση και κατευθύνονται στην επικάλυψη.



σχήμα 3.6

Έτσι δε μεταδίδεται το φως και οι πληροφορίες κατά μήκος της ίνας. Η κρίσιμη γωνία καθορίζει την επιτρεπόμενη γωνία της ίνας, που συχνά καλείται «αριθμητικό άνοιγμα» (numerical aperture). Ένα υψηλό αριθμητικό άνοιγμα επιτρέπει στο φως να διαδίδεται κατά μήκος της ίνας σε ακτίνες κοντά στον άξονα και σε διάφορες γωνίες, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αποτελεσματική ένωση του φωτός στην ίνα. Όμως με αυτό τον τρόπο αυξάνεται το ποσό της σκέδασης, καθώς ακτίνες σε διαφορετικές γωνίες έχουν διαφορετικές διαδρομές και χρειάζονται διαφορετικό χρόνο για να διασχίσουν την ίνα. Ένα μικρό λοιπόν αριθμητικό άνοιγμα μπορεί να είναι επιθυμητό.

Στις ίνες που γίνεται σταδιακά η αλλαγή του δείκτη διάθλασης (graded-index), ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μειώνεται προοδευτικά ανάμεσα στον άξονα και την επικάλυψη (βλ. σχήμα 3.7). Αυτό οδηγεί τις ακτίνες φωτός να κάμπτονται ομαλά καθώς πλησιάζουν την επικάλυψη, παρά να ανακλώνονται απότομα από το σύνορο πυρήνα – επικάλυψης. Η προκύπτουσα διαδρομή μειώνει το σκεδασμό που υπάρχει στις step-index ίνες, επειδή οι ακτίνες με μεγάλες γωνίες περνάνε μέσα από την περιφέρεια που έχει μικρό δείκτη διάθλασης, παρά μέσα από το κέντρο του πυρήνα που έχει μεγάλο δείκτη διάθλασης.



σχήμα 3.7

Το προφίλ του δείκτη διάθλασης είναι κατάλληλα επιλεγμένο έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί τη διαφορά στην ταχύτητα της αξονικής διάδοσης των ακτίνων στην ίνα. Το ιδανικό προφίλ πλησιάζει την παραβολική συνάρτηση του δείκτη με την απόσταση από τον άξονα.

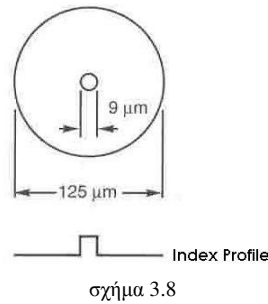
Ίνες μίας κατάστασης (single-mode)

Ίνες με διάμετρο πυρήνα μικρότερο από δέκα φορές το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου φωτός δεν μπορούν να αναλυθούν με τη θεωρία της γεωμετρικής οπτικής. Αντιθέτως, πρέπει να αναλυθούν ως ηλεκτρομαγνητική δομή βάσει της λύσης των απλοποιημένων εξισώσεων του Maxwell για το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Επειδή η ίνα δρα ως ένας οπτικός οδηγός κύματος (waveguide), υποστηρίζει μία ή περισσότερες εγκάρσιες καταστάσεις με τις οποίες το φως μπορεί να διαδοθεί στην ίνα. Η ίνα που επιτρέπει μόνο μία κατάσταση ονομάζεται single-mode. Η συμπεριφορά των ινών με μεγαλύτερες διαμέτρους (multimode) μπορεί επίσης να ερμηνευθεί με την εξίσωση κύματος, η οποία δείχνει ότι αυτές οι ίνες μπορούν να υποστηρίξουν παραπάνω από μία κατάσταση διάδοσης. Τα αποτελέσματα από αυτή τη μοντελοποίηση της multimode ίνας συμφωνούν με τις προβλέψεις από τη γεωμετρική οπτική, εάν ο πυρήνας της ίνας είναι αρκετά μεγάλος για να υποστηρίξει παραπάνω από μερικές καταστάσεις.

Η ανάλυση βάσει του οδηγού μήκους κύματος (waveguide analysis) δείχνει ότι η ενέργεια του φωτός στην ίνα δεν είναι εντελώς περιορισμένη στον πυρήνα. Αντιθέτως, ειδικά σε single-mode ίνες, ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας ταξιδεύει στην επικάλυψη ως διαφεύγον κύμα.

Ο πιο κοινός τύπος single-mode ίνας, έχει διάμετρο πυρήνα 8 μm έως 10 μm και είναι σχεδιασμένος για χρήση στα υπέρυθρα μήκη κύματος (βλ. σχήμα 3.8). Είναι αξιοσημείωτο ότι η δομή της κατάστασης εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται, έτσι ώστε αυτή η ίνα να υποστηρίξει ένα μικρό αριθμό επιπλέον

καταστάσεων στο ορατό μήκος κύματος. Ίνες multi-mode, ως σύγκριση, κατασκευάζονται με πυρήνες διαμέτρων από 50 μικρά έως μερικές εκατοντάδες μικρά.



σχήμα 3.8

Είτε πρόκειται για single-mode είτε για multi-mode, η οπτική ίνα μπορεί να χρησιμεύσει ως αισθητήρας. Όμως, οι single-mode ίνες με μικρότερο πυρήνα είναι πολύ πιο ευαίσθητες, πράγμα που είναι επιθυμητό σε μετρήσεις παραμόρφωσης. Για μετρήσεις μηχανικών παραμορφώσεων, πρέπει αφενός οι αισθητήρες να είναι κοντά στο σημείο που θα σημειωθεί η ζημιά έτσι ώστε να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις, και αφετέρου πρέπει να έχουν επαρκή ανάλυση (resolution) παραμόρφωσης εάν η ζημιά είναι μακριά.

Πολυπλεξία (Multiplexing)

Η πολυπλεξία (multiplexing) είναι ο συνδυασμός πολλών σημάτων χαμηλής ταχύτητας έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ενοποιημένο, υψηλότερης ταχύτητας σήμα, το οποίο μπορεί να μεταδοθεί πιο οικονομικά.

Η πολυπλεξία είναι μια γενική διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται σε πολλές μορφές επικοινωνίας. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι πολυπλεξίας, μερικοί από τους οποίους είναι :

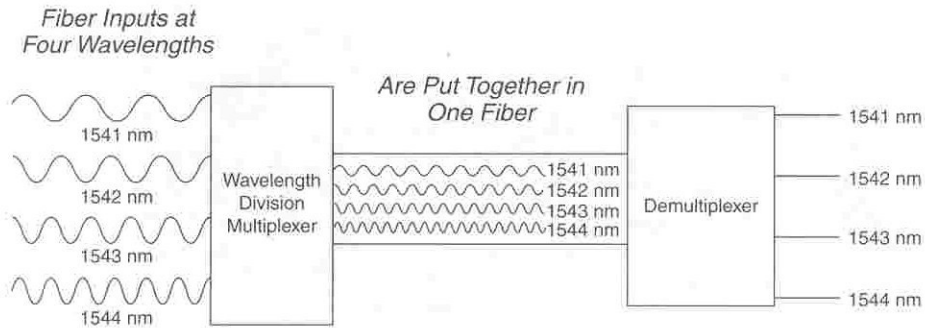
Πολυπλεξία διαμοίρασης συχνότητας (Frequency – division multiplexing)

Είναι η μετάδοση σημάτων σε φορείς με διαφορετικές συχνότητες. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι ραδιο-τηλεοπτικοί σταθμοί. Κάθε σταθμός εκπέμπει το σήμα στη δική του συχνότητα και συνεπώς ο αέρας μεταδίδει τα σήματα όλως των σταθμών στην περιοχή. Ο κάθε δέκτης, όμως, μπορεί να επιλέγει πιο σήμα θέλει, από όλα όσα υπάρχουν ταυτόχρονα εκείνη τη χρονική στιγμή.

Πολυπλεξία διαμοίρασης μήκους κύματος (Wavelength – division multiplexing)

Οπτικά μοιάζει πολύ με τη πολυπλεξία διαμοίρασης συχνότητας. Διαφορετικά σήματα τροποποιούν τους φορείς σε διαφορετικά οπτικά μήκη κύματος (ή συχνότητες στην οπτική περιοχή αντιστοίχως). Κάθε μήκος κύματος είναι ένα οπτικό κανάλι. Ειδικά

όργανα συλλέγουν το φως και το κατευθύνουν σε άλλη οπτική ίνα, η οποία μεταδίδει το φως. Στο άλλο άκρο όργανα αποδιαύλωσης(demultiplexing) διαχωρίζουν τα μήκη κύματος κατευθύνοντας το κάθε οπτικό κανάλι στο δικό του δέκτη για να ξαναδημιουργηθεί το αρχικό σήμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9.

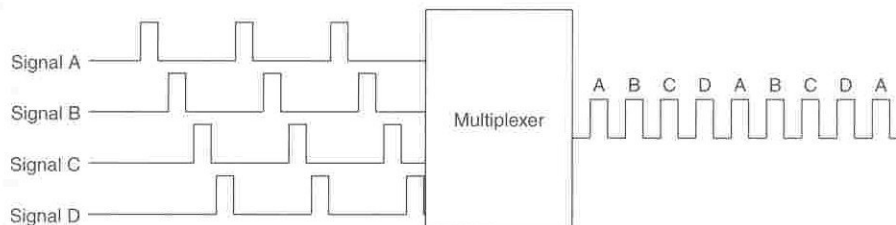


σχήμα 3.9

Και οι δύο τεχνικές είναι παρόμοιες, εκτός του ότι η κάθε μία λειτουργεί σε διαφορετικά μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Και οι δύο πολλαπλασιάζουν την ικανότητα μετάδοσης με τον αριθμό των αναλογικών ή ψηφιακών καναλιών που μεταφέρουν. Ο αριθμός των δυνατών καναλιών περιορίζεται από το μέσο μετάδοσης, την απόσταση των καναλιών, και τα στάνταρ που εφαρμόζονται.

Πολυπλεξία διαμοίρασης χρόνου (Time – division multiplexing)

Είναι μια διαφορετική διαδικασία, η οποία περιορίζεται μόνο σε ψηφιακά σήματα. Συνδυάζει ροές δεδομένων από διαφορετικά σήματα για να παράγει ένα με μεγαλύτερη ταχύτητα δεδομένων (βλ. σχήμα 3.10).



σχήμα 3.10

3.2

Οπτικοί αισθητήρες

Γενικά

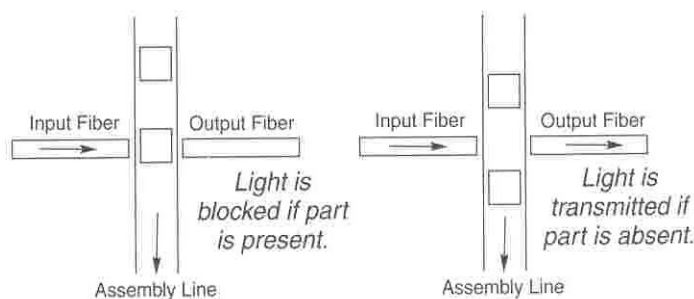
Ο τίτλος οπτικοί αισθητήρες (optic sensors) καλύπτει ένα ευρύ φάσμα από συσκευές που δουλεύουν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Η πιο απλή εφαρμογή χρησιμοποιεί οπτικές ίνες με το να ανιχνεύει αλλαγές στο φως που εξέρχεται από την ίνα. Η ίνα μπορεί να συλλέξει φως από ένα δεδομένο σημείο για να διαπιστωθεί εάν ένα αντικείμενο (π.χ. στοιχείο μηχανής) είναι παρόν ή όχι. Η ίνα μπορεί επίσης να συλλέγει φως από ένα άλλο είδος οπτικού αισθητήρα, ο οποίος αποκρίνεται στο περιβάλλον του με τέτοιο τρόπο που να αλλάζει το φως που φτάνει στην ίνα. Για παράδειγμα, ένα πρίσμα σε μία δεξαμενή υγρού μπορεί να αρχίσει να ανακλά φως πίσω σε έναν αισθητήρα εάν η στάθμη του υγρού πέσει κάτω από την ανακλώμενη επιφάνεια του πρίσματος, εκτίθοντάς το στον αέρα έτσι ώστε να συμβεί ολική εσωτερική ανάκλαση.

Άλλοι αισθητήρες ινών ανιχνεύουν αλλαγές στο φως που περνάει μέσω μιας ίνας και επηρεάζεται από αλλαγές του εξωτερικού κόσμου, όπως θερμοκρασία ή πίεση. Μπορούν να σχεδιαστούν ειδικές ίνες ή ειδικές κατασκευές στις ίνες που να αποκρίνονται πιο έντονα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Μπορούν επίσης μέσω οπτικών φαινομένων όπως η συμβολή να ανιχνευθούν μικρά αποτελέσματα τα οποία συσσωρεύονται σε μεγάλα μήκη της ίνας. Με αυτούς τους τρόπους οπτικοί αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν αλλαγές σε ιδιότητες όπως θερμοκρασία, πίεση και περιστροφή.

Οι ανιχνευτές οπτικών ινών συλλέγουν φως από απομακρυσμένα σημεία, συχνά κάνοντας δειγματοληψία στο φως που οδηγήθηκε εκεί μέσω των ινών. Υπάρχουν δύο μεγάλες οικογένειες οι οποίες εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες ως αισθητήρες. Οι πιο απλές λειτουργούν εξετάζοντας αν το φως είναι παρόν ή απόν στο σημείο που ενδιαφέρει. Οι υπόλοιπες συλλέγουν το φως από απομακρυσμένους οπτικούς αισθητήρες, φερνοντάς το πίσω σε ένα μέρος που μπορεί να αναλυθεί.

Απλοί ανιχνευτές

Το σχήμα 3.11 δείχνει έναν απλό οπτικό ανιχνευτή που ελέγχει αν είναι παρόντα τα τεμάχια, σε μια γραμμή παραγωγής. Μία οπτική ίνα μεταφέρει το φως από μία εξωτερική πηγή και μια δεύτερη ίνα συλλέγει το φως από την πρώτη για όσο καιρό δεν παρεμβάλλεται κάτι ανάμεσά τους. Όταν ένα τεμάχιο περνά ανάμεσα, εμποδίζει το φως. Με αυτό τον τρόπο η διακοπή του φωτός δείχνει ότι ένα τεμάχιο είναι στη γραμμή παραγωγής, ενώ όταν υπάρχει φως στην ίνα σημαίνει ότι δεν υπάρχει τεμάχιο στη γραμμή παραγωγής.



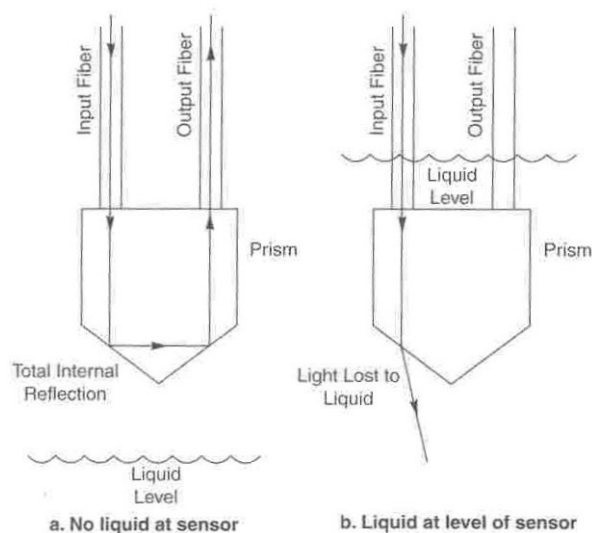
σχήμα 3.11

Αυτή η ιδέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους και δεν είναι καινούργια. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στους υπολογιστές στις διάτρητες κάρτες πριν εμφανισθούν τα μαγνητικά μέσα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο ανιχνευτής πίσω από την κάρτα αισθανόταν άμεσα το μεταδιδόμενο φως χωρίς την ύπαρξη ίνας που συλλέγει το φως. Η κάρτα πέρναγε μέσα από μια σειρά ινών σε συγκεκριμένη ταχύτητα και οι ανιχνευτές παρακολουθούσαν την εκπομπή φωτός ως συνάρτηση του χρόνου. Όταν μια οπή πέρναγε το τέλος της ίνας, φως έφτανε στον ανιχνευτή. Όταν δεν υπήρχε οπή, η κάρτα εμπόδιζε το φως. Η τεχνική ήταν απλή και αποτελεσματική.

Σύγχρονες εκδοχές περιλαμβάνουν μέτρηση του μεγέθους διαφόρων κομματιών έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι πληρούν συγκεκριμένες ανοχές. Μια σειρά από ίνες μπορεί να τοποθετηθεί παράλληλα με τη γραμμή παραγωγής με τέτοιο τρόπο που ορισμένα κομμάτια που περνάνε να εμποδίζουν το φως σε μερικές ίνες. Τα κομμάτια περνάν τον έλεγχο εάν όλες οι ίνες πάνω από το ανώτατο ύψος λαμβάνουν φως, ενώ όσες είναι κάτω από το κατώτατο ύψος δεν δέχονται φως. Κομμάτια που είναι πολύ μικρά ή πολύ ψηλά απορρίπτονται όταν το φως φτάνει σε ίνες που υποτίθεται ότι είναι σκοτεινές ή όταν δε φτάνει σε ίνες που θα έπρεπε να φωτίζονται.

Οπτικοί αισθητήρες σε απόσταση

Οι οπτικοί ανιχνευτές μπορούν επίσης να συλλέγουν φως από άλλους τύπους οπτικών αισθητήρων. Σε αυτή την περίπτωση οι ίνες λειτουργούν ως καλώδια κολλημένα σε ένα ηλεκτρονικό αισθητήρα. Ο οπτικός αισθητήρας (ο οποίος δεν είναι οπτική ίνα) αποκρίνεται με τέτοιο τρόπο στο περιβάλλον, αλλάζοντας το φως που φτάνει στον ανιχνευτή. Η ίνα μεταφέρει το φως στον ανιχνευτή ο οποίος αισθάνεται την αλλαγή.



σχήμα 3.12

Ένα παράδειγμα είναι ο αισθητήρας της στάθμης υγρού, ο οποίος ανιχνεύει πότε το καύσιμο σε μία δεξαμενή φτάνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο (βλ. σχήμα 3.12). Μια ίνα οδηγεί το φως σε ένα πρίσμα τοποθετημένο σε συγκεκριμένο επίπεδο. Εάν δεν υπάρχει υγρό στη δεξαμενή, το φως από την ίνα μέσω ολικής εσωτερικής ανάκλασης οδηγείται πίσω στην ίνα που το συλλέγει. Εάν ο πυθμένας του πρίσματος καλύπτεται από υγρό, τότε δε συμβαίνει ολική εσωτερική ανάκλαση στη γωνία που προσπίπτει το φως και έτσι το φως δεν ανακλάται στη δεύτερη ίνα.

Μηχανισμοί οπτικών αισθητήρων

Οι εξωτερικές επιδράσεις μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη μετάδοση σε μια ίνα με ποικίλους τρόπους, που έχουν σχέση με τον τύπο της ίνας και πώς αυτή είναι τοποθετημένη. Για τη δημιουργία οπτικών αισθητήρων χρησιμοποιούνται ίνες που αποκρίνονται εύκολα, σε αντίθεση με τις ίνες τηλεπικοινωνιών που φτιάχνονται για να είναι απομονωμένες από το περιβάλλον.

Η φιλοσοφία των αισθητήρων

Ένας αισθητήρας μετατρέπει ένα φυσικό φαινόμενο που θέλουμε να παρατηρήσουμε σε μία μετρήσιμη μορφή. Για παράδειγμα, το κοινό θερμόμετρο που είναι γεμάτο με υδράργυρο. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία το υγρό διαστέλλεται. Το θερμόμετρο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε για συγκεκριμένη διαστολή του υγρού να προσεγγίζεται και η σωστή θερμοκρασία.

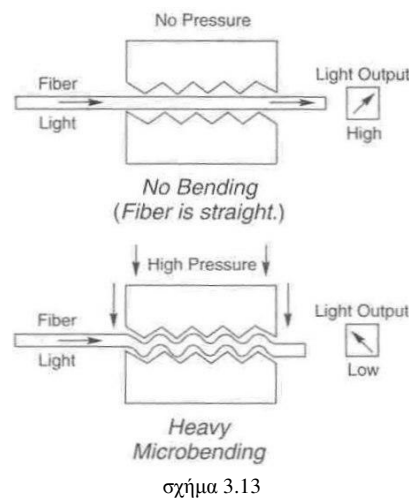
Οι αισθητήρες οπτικών ινών λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και μετρούν ιδιότητες όπως η θερμοκρασία, με το να παρατηρούν το φως που μεταδίδεται μέσω του αισθητήρα. Προσπαθούν με άλλα λόγια να κάνουν την ιδιότητα, που θέλουν να μετρήσουν, να αλλοιώσει το φως με κάποιο τρόπο.

Οι πιο πολλοί λειτουργούν με τους εξής τρόπους :

- Άμεσα αλλοιώνοντας την ένταση (intensity)
- Επηρεάζοντας την κατάσταση πόλωσης (state of polarization) του φωτός
- Μετατοπίζοντας τη φάση (phase shift) του μεταδιδόμενου φωτός

Άμεση αλλοίωση της έντασης

Οι αισθητήρες που μετρούν άμεσα την ένταση του φωτός είναι απλοί σε σύλληψη. Ο πιο απλός από όλους είναι αισθητήρας ρωγμών που έχει τοποθετηθεί μέσα σε σύνθετο υλικό. Για όσο καιρό το υλικό είναι άθικτο, η ίνα μεταδίδει το φως χωρίς εμπόδια. Μία ρωγμή προκαλεί κάμψη στην ίνα, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την ένταση του φωτός ή σταματώντας εντελώς το φως, ανάλογα με το πόσο μεγάλη είναι η ρωγμή. Ένας άλλος τρόπος βασίζεται στο βέλος κάμψης που υφίσταται η ίνα εάν δεχθεί φορτίο. Για παράδειγμα, μια ίνα που περνάει ανάμεσα σε δυο πλάκες οι οποίες σε συγκεκριμένο σημείο έχουν κατάλληλη γεωμετρία έτσι ώστε να εμφανίζουν οδόντωση. Καθώς οι πλάκες κάμπτονται η ίνα ακολουθεί και εκείνη τη γεωμετρία των οδόντων και κάμπτεται (βλ. σχήμα 3.13). Με αυτό τον τρόπο το φως περνάει ολοένα και πιο δύσκολα μέσω της ίνας.



Ενώ είναι σχετικά εύκολο να κατασκευαστούν και δεν απαιτούν πολύπλοκο εξοπλισμό και επεξεργασία σήματος, οι αισθητήρες αυτοί δίνουν μόνο περιορισμένες πληροφορίες. Γενικά είναι ευαίσθητοι σε διακυμάνσεις του φωτός, ή απώλειες φωτός που προέρχονται από μικροκάμψη στην ίνα. Επίσης, υποφέρουν από την έλλειψη σαφούς περιοχής ανίχνευσης. Παρά τα προαναφερθέντα προβλήματα, εάν ένας μεγάλος αριθμός από αισθητήρες χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο για ανίχνευση ζημιάς, θα μπορούσε να είναι χρήσιμος εξαιτίας του χαμηλού κόστους στην κατασκευή και λειτουργία του δικτύου [7].

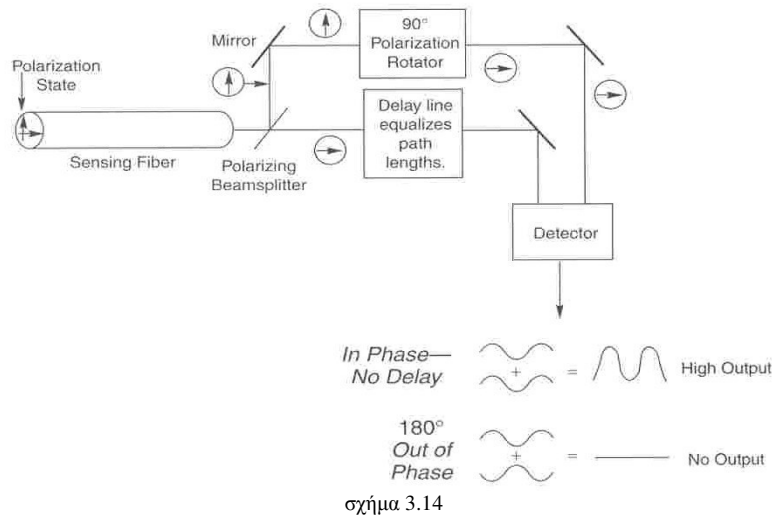
Μέτρηση της κατάστασης πόλωσης

Ένας άλλος τρόπος είναι να επηρεαστεί η κατάσταση πόλωσης του φωτός μέσα στην ίνα. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτής της μεθόδου. Ένα παράδειγμα είναι η μέτρηση των μαγνητικών πεδίων, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που ονομάζεται περιστροφή Faraday και η οποία περιστρέφει το επίπεδο του πολωμένου φωτός κατά μία γωνία ανάλογη με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου. Εάν σταλεί κάθετα πολωμένο φως μέσω μιας ευαίσθητης ίνας, μπορεί να μετρηθεί το μαγνητικό πεδίο μέσω της μέτρησης της γωνίας. Πρακτικά δεν μετράται άμεσα η γωνία της πόλωσης. Μετράται η αλλαγή στην ένταση του μεταδιδόμενου φωτός από έναν άλλο πολωτή. Εάν ο δεύτερος πολωτής είναι επίσης κάθετος, η μείωση της έντασης του μεταδιδόμενου φωτός αντιστοιχεί στη γωνία περιστροφής. Έτσι μετατρέπεται η αλλαγή της πόλωσης σε αλλαγή στην ένταση που είναι πολύ πιο εύκολο να μετρηθεί.

Άλλοι αισθητήρες παράγουν αποτελέσματα τα οποία επηρεάζουν το φως διαφορετικών πολώσεων με διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, η πίεση μπορεί να αλλάξει το δείκτη διάθλασης για κάθετα πολωμένο φως διαφορετικά από ότι για οριζόντια πολωμένο φως. Αυτό οδηγεί σε μία αλλαγή φάσης στις εντάσεις του φωτός διαφορετικών πολώσεων, οι οποίες απαιτούν ένα άλλο είδος μέτρησης όπως περιγράφεται ακολούθως.

Αισθητήρες φάσης ή παρεμβολής

Υπάρχουν αισθητήρες που μπορούν να αλλοιώσουν τη φάση του φωτός για να προκαλέσουν έτσι φαινόμενα παρεμβολής (interference effects) και να αλλάξουν την ένταση του φωτός. Για να κατανοήσουμε πώς λειτουργούν, θα περιγραφεί το παράδειγμα του αισθητήρα πίεσης, ο οποίος αλλάζει τη φάση του πολωμένου φωτός. Αλλάζοντας κατά διαφορετικά ποσά τους δείκτες διάθλασης των διαφορετικών καταστάσεων πόλωσης, ο αισθητήρας καθυστερεί τη μία κατάσταση πόλωσης σε σχέση με την άλλη. Για να μετρηθεί αυτό μπορούν να διαχωριστούν οι δύο καταστάσεις στο άκρο εξόδου, να περιστραφεί η μία κατά 90° , να εξισωθούν τα μήκη διαδρομής και να ενωθούν μαζί, όπως στο σχήμα 3.14. Εάν οι δύο καταστάσεις είναι σε φάση (δηλαδή δεν υπάρχει καθυστέρηση μεταξύ τους) τότε η έξοδος είναι υψηλή. Εάν είναι περιστραμμένη κατά 180° , τότε η έξοδος είναι χαμηλή.

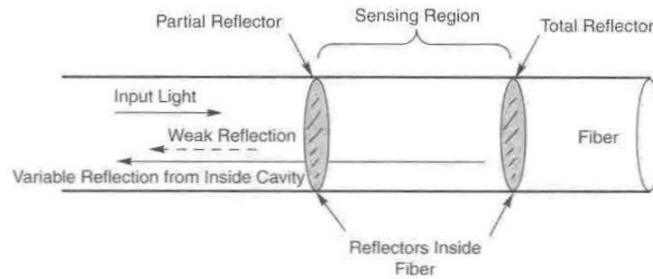


Οι αισθητήρες παρεμβολής (interferometric sensors) είναι πολύ ευαίσθητοι σε μικρές αλλαγές, αλλά εμφανίζουν και κάποιους περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι ότι το φως πρέπει να είναι σε δέσμη έτσι ώστε να συμβαίνει παρεμβολή. Γι'αυτό το λόγο χρειάζονται πηγές φωτός όπως το laser. Επιπλέον, υπάρχει μια έμφυτη διαφορούμενη έννοια, διότι μια καθυστέρηση 360° παράγει το ίδιο αποτέλεσμα με μία μη καθυστέρηση ή με μία των 720° .

Για να γίνει η μετατροπή της μετατόπισης της φάσης σε αλλαγή στην ένταση πρέπει να συγκριθούν δύο σήματα. Στην περίπτωση του αισθητήρα πόλωσης αυτά τα σήματα είναι δύο καταστάσεις πόλωσης, οι οποίες επηρεάζονται διαφορετικά από αλλαγές στο δείκτη διάθλασης που προκύπτουν από την επιβολή πίεσης.

Αισθητήρες παρεμβολής (interferometric) Fabry – Perot

Οι αισθητήρες συμβολής Fabry – Perot ανιχνεύουν μετατόπιση στη φάση μέσω κοιλοτήτων αντήχησης (resonant cavities) παρά μέσω σύγκρισης της μετατόπισης της φάσης του φωτός, που περνά από δύο διαφορετικές διευθύνσεις. Το στοιχείο που κάνει την ανίχνευση είναι μια τομή της ίνας η οποία έχει ανακλαστικές στρώσεις σε κάθε άκρη (βλ. σχήμα 3.15). Το φως περνά μέσα από ένα ελαφρώς ανακλαστικό στρώμα (partly reflecting layer) και ανακλάται μετά από κάποια απόσταση από ένα ολικό ανακλαστή (totally reflecting mirror), όπως ένα καθρέφτη. Αυτοί οι δύο καθρέφτες αποτελούν το συμβολόμετρο Fabry – Perot, το οποίο έχει μια σειρά από αντηχήσεις (resonances) σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, τα οποία καθορίζονται από το μήκος της κοιλότητας (cavity length) και το δείκτη διάθλασης.



σχήμα 3.15

Από τη φυσική γνωρίζουμε ότι σε κάθε σημείο αντήχησης, η απόσταση του ταξιδιού επιστροφής πρέπει να ισούται με ένα ακέραιο αριθμό μηκών κύματος σε υλικό, με το δείκτη διάθλασης να περιλαμβάνεται για να υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ του μήκους κύματος στο κενό “ λ ” και στο υλικό “ λ/n ”.

$$N \lambda = 2 L n \quad (3.1)$$

Εάν το μήκος κύματος παραμένει σταθερό και η κοιλότητα είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος κύματος, η ένταση του ανακλώμενου φωτός αλλάζει με διακυμάνσεις στο μήκος ή στο δείκτη διάθλασης. Σε αισθητήρες θερμοκρασίας η αλλαγή στο δείκτη διάθλασης είναι περίπου 20 φορές μεγαλύτερη από την αλλαγή στο μήκος και για αυτό το λόγο κυριαρχεί στη μετατόπιση της φάσης. Η ίδια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Γυροσκόπιο Οπτικών ινών

Το γυροσκόπιο οπτικών ινών είναι πιθανόν ο πιο επιτυχημένος αισθητήρας οπτικών ινών μέχρι τώρα. Βασίζεται σε οπτικές διαδικασίες για να μετρήσει περιστροφή γύρω από τον άξονα ενός δαχτυλιδιού από οπτικές ίνες. Η ανίχνευση της περιστροφής είναι πολύ σημαντική, ειδικά για τα αεροσκάφη τα οποία χρησιμοποιούσαν μέχρι τώρα μηχανικά γυροσκόπια. Τα γυροσκόπια που λειτουργούν με οπτικές ίνες προσφέρουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν μη κινούμενα μέρη, μεγαλύτερη αξιοπιστία και χωρίς την ανάγκη για περίοδο προθέρμανσης για να ξεκινήσει το γυροσκόπιο.

Τα γυροσκόπια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρη αδρανειακού συστήματος πλοήγησης (inertial navigation system) το οποίο παρακολουθεί την τροχιά του οχήματος. Τρία διαφορετικά γυροσκόπια παρακολουθούν την γωνιακή κατεύθυνση σε τρεις κάθετους άξονες. Για τον προσδιορισμό της θέσης πρέπει επίσης να καταγράφεται και ο χρόνος, έτσι ώστε να είναι γνωστό πότε το όχημα έκανε μια συγκεκριμένη στροφή. Τα σύγχρονα γυροσκόπια μπορούν να κρατάνε τη διεύθυνση με ακρίβεια μίας μοίρας ανά ώρα.

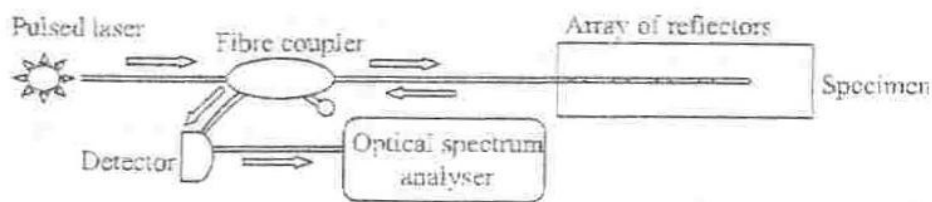
Δίκτυα Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Για να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα της ζημιάς σε μία μεγάλη «έξυπνη» κατασκευή, θα πρέπει να καθοριστεί η κατάσταση τάσης ή παραμόρφωσης. Αυτό, επομένως, σημαίνει ότι πρέπει να ληφθούν πολλαπλές μετρήσεις παραμόρφωσης, πράγμα που μπορεί να επιτευχθεί με δίκτυα αισθητήρων οπτικών ινών. Μία πολύ απλή εφαρμογή θα ήταν σε σύνθετα υλικά να τοποθετηθούν σειρές από ίνες που θα μετρούν την αλλοίωση της έντασης, σε διαφορετικές στρώσεις του σύνθετου. Με επαρκείς σειρές από τέτοιες ίνες σε σύνθετες κατασκευές με μεγάλο πάχος, θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση της θέσης θραύσης και της σοβαρότητας της ζημιάς όταν συμβεί θραύση των οπτικών ινών μέσα στο υλικό [7].

Quasi - distributed δίκτυο αισθητήρων

Ένα πιο αποτελεσματικό δίκτυο οπτικών αισθητήρων προέρχεται είτε από ένα μη πλήρως κατανεμημένο (quasi-distributed) δίκτυο, είτε από ένα πλήρως κατανεμημένο (fully-distributed) δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί μόνο μία πηγή φωτός. Το πρώτο βασίζεται σε σειρές αισθητήρων οι οποίοι τοποθετούνται σε μια ίνα με τις τεχνικές Optical time-domain reflectometry (OTDR), πολυπλεξίας διαμοίρασης μήκους κύματος (WDM), ή coherence division multiplexing (CDM).

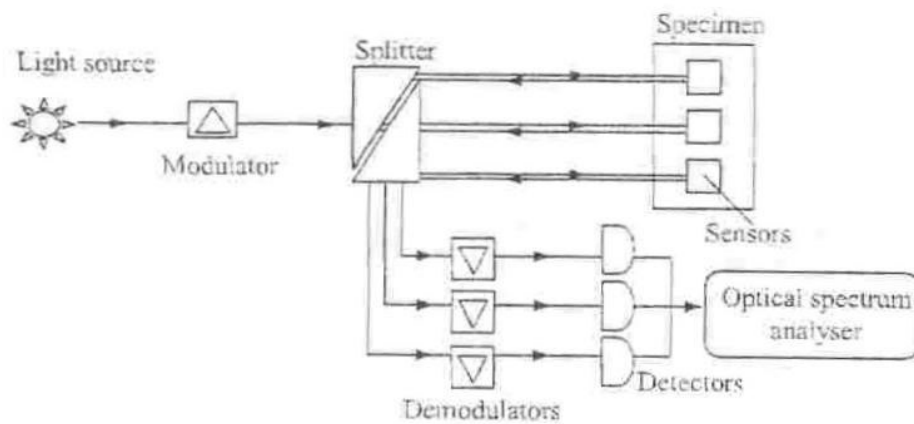
Η τεχνική OTDR χρησιμοποιεί ένα παλμό φωτός ο οποίος εκπέμπεται από το ένα άκρο του αισθητήρα και ανακλάται πίσω στο ίδιο άκρο της ίνας από τοποθεσίες κατά μήκος της ίνας σε μία ανακλαστική διάταξη. Τότε ο χρόνος του ταξιδιού επιστροφής χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις τάσεις. Εάν ο αριθμός αυτών των τοποθεσιών είναι γνωστός από πριν, το σύστημα γίνεται πιο αποτελεσματικό και η σειρά αισθητήρων καλείται : μη πλήρως κατανεμημένος οπτικός αισθητήρας (βλ. σχήμα 3.16). Σε αυτό τον τύπο δικτύου αισθητήρων, οι ανακλαστήρες (reflectors) μπορούν να δημιουργηθούν με fusion splices, διαφορές μήκους-διαδρομής, ή με FBG με γνωστό μήκος κύματος ανάκλασης. Επιπλέον οι αισθητήρες στο δίκτυο μπορούν να τοποθετηθούν είτε σειριακά (βλ σχήμα 3.16) είτε σε παράλληλη σύνδεση (βλ σχήμα 3.17), είτε, τέλος, με συνδυασμό των δυο.



σχήμα 3.16

Η σειριακή τοπολογία σε μία ανακλαστική διάταξη φαίνεται απλούστερη στην εφαρμογή αλλά μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα σχετιζόμενα με την ισχύ, εάν οι αισθητήρες βρίσκονται μακριά από την πηγή φωτός. Το κυριότερο πρόβλημα στη σειριακή τοπολογία είναι ότι, εάν ένας οποιοσδήποτε αισθητήρας καταστραφεί, τότε διακόπτεται όλο το δίκτυο. Επιπλέον, μπορεί μόνο ένας περιορισμένος αριθμός αισθητήρων να

τοποθετηθεί στο δίκτυο, λόγω του περιορισμένου εύρους σε μήκη κύματος ή του περιορισμένου εύρους παραμόρφωσης.



σχήμα 3.17

Εν αντιθέσει, η παράλληλη τοπολογία φαίνεται πολύ πιο δύσκολη στην εφαρμογή με επιπλέον κόστη εξοπλισμού και μειωμένη ισχύ ανά αισθητήρα. Επιτρέπει, όμως, τον κάθε ξεχωριστό αισθητήρα να αντικατασταθεί σε περίπτωση σφάλματος.

Fully distributed δίκτυο οπτικών αισθητήρων

Εάν οι προαναφερθείσες τοποθεσίες ανίχνευσης αντιστοιχούν σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της οπτικής ίνας, τότε το δίκτυο καλείται πλήρως καταναμημένος οπτικός αισθητήρας. Αυτά τα σημεία ανάκλασης (point reflectors) είναι ατέλειες στα σύνορα του πυρήνα με την επικάλυψη. Όταν ένα εξωτερικό φορτίο προκαλεί αλλαγές στο ανακλώμενο σήμα, οι μηχανικές παραμορφώσεις μπορούν να προσδιοριστούν με τις τεχνικές πολυπλεξίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτό το δίκτυο, ενώ διατηρεί τα πλεονεκτήματα των αυτόνομων αισθητήρων, μπορεί να έχει μια χωρική κατανομή των μηχανικών τάσεων κατά μήκος των αισθητήρων. Οι μόνοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται προς το παρόν είναι οι πολαριμετρικοί αισθητήρες.

Το ιδανικό αποτέλεσμα της χρήσης των προαναφερθέντων δικτύων είναι οι επαρκείς πληροφορίες δεδομένων έτσι ώστε να γίνει δυνατή η χωρική κατανομή των παραμορφώσεων παράλληλα με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά πρέπει να είναι απλούστερα από μεγάλης κλίμακας αριθμητικά μοντέλα, όπως αντίστροφα μοντέλα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ή τεχνητά νευρονικά δίκτυα artificial neural networks (ANNs).

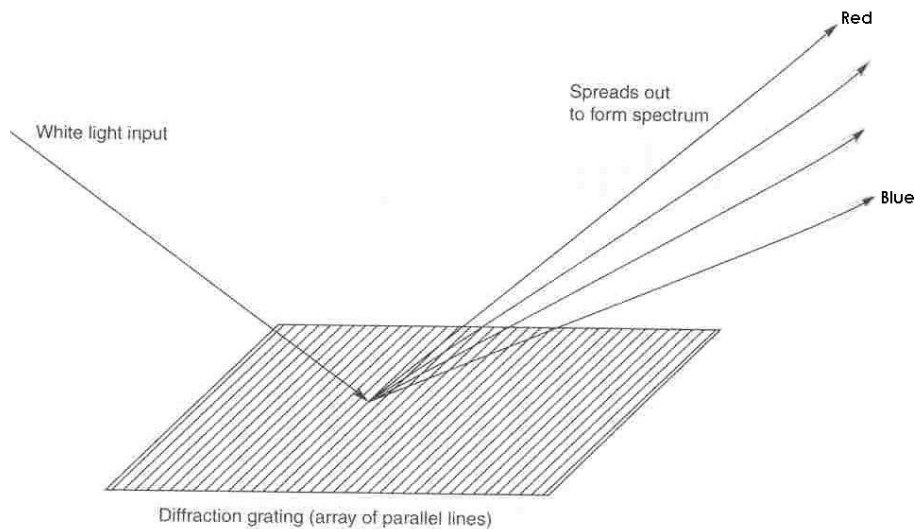
4. Οπτικοί Αισθητήρες Fiber Bragg Grating

4.1

Εισαγωγή

Οι κανονικές οπτικές ίνες είναι ομοιόμορφες σε όλο το μήκος τους. Ένα τμήμα σε ένα σημείο της ίνας θα μοιάζει με οποιοδήποτε άλλο, αγνοώντας μικροσκοπικές ατέλειες. Μπορεί όμως ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας να μεταβάλλεται περιοδικά (άλλοτε να αυξάνεται και άλλοτε να μειώνεται) κατά μήκος της ίνας σε ορισμένα σημεία. Αυτές οι ίνες καλούνται fiber gratings, διότι οι διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης σκεδάζουν το διερχόμενο φως από την ίνα, ένα φαινόμενο παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει καθώς το φως σκεδάζεται αφού χτυπήσει σε οπτικές συσκευές που έχουν χαραγμένα αυλάκια (diffraction gratings). Και οι δύο διαδικασίες εξαρτώνται από το μήκος κύματος του φωτός.

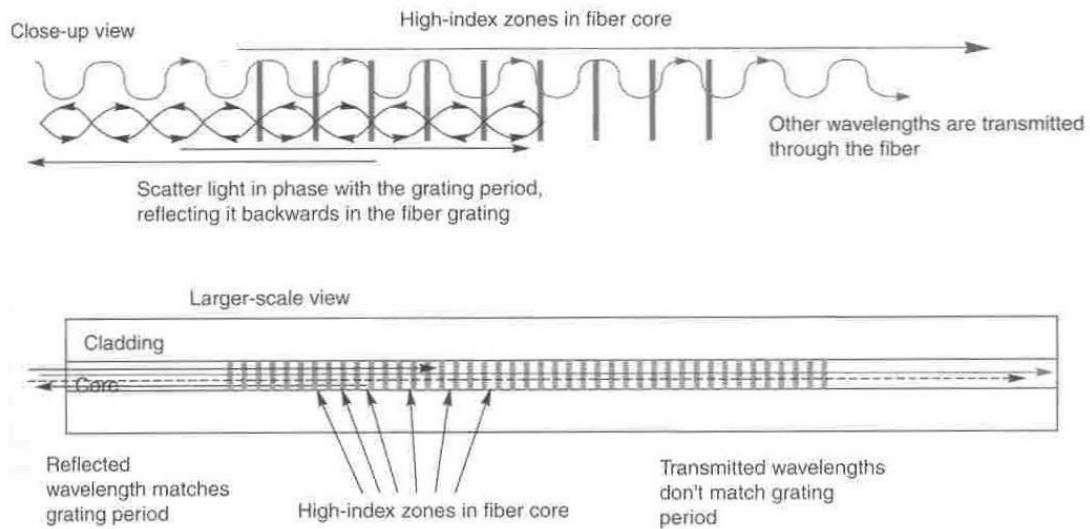
Τα diffraction gratings είναι σειρές από παράλληλες γραμμές ή αυλάκια σε ανακλώμενες επιφάνειες. Οι γραμμές ανακλούν ή σκεδάζουν τα κύματα φωτός και με αυτό τον τρόπο προβάλλει το «ουράνιο τόξο» των χρωμάτων (βλ. σχήμα 4.1). Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει εάν ανακλαστεί φως από ένα δίσκο CD, όπου τα μικροσκοπικά κομμάτια σε παράλληλες κυκλικές γραμμές δρουν ως ευθείες σε ένα diffraction grating.



σχήμα 4.1

Σε ένα fiber grating οι «γραμμές» δεν είναι αυλάκια χαραγμένα σε μια επιφάνεια. Αντιθέτως είναι περιοχές με ομοιόμορφα κατανομημένη απόσταση στην ίνα όπου ο δείκτης διάθλασης έχει αυξηθεί σε σχέση με εκείνο που έχει ο πυρήνας στην υπόλοιπη ίνα. Αυτές οι μεταβολές σκεδάζουν το φως σύμφωνα με το φαινόμενο Bragg. Η σκέδαση Bragg δεν είναι ακριβώς το ίδιο φαινόμενο με το σκεδασμό από ένα diffraction grating. Αντιθέτως, ένα Bragg grating επιλεκτικά ανακλά ένα στενό φάσμα μηκών κύματος.

Κάθε φορά που το φως χτυπά σε μια περιοχή με υψηλότερο δείκτη διάθλασης ένα κομμάτι σκεδαζείται προς τα πίσω. Εάν το μήκος κύματος ταιριάζει με την απόσταση της ζώνης υψηλού δείκτη στην ίνα, τα σκεδαζόμενα κύματα από κάθε ζώνη συμβάλλουν και παράγουν συνολικά μια έντονη ανάκλαση (βλ σχήμα 4.2). Οι περιοχές με υψηλό δείκτη διάθλασης επίσης κεδάζουν το φως σε άλλα μήκη κύματος, αλλά τα σκεδαζόμενα κύματα διαφέρουν στη φάση και έτσι ακυρώνονται μεταξύ τους.



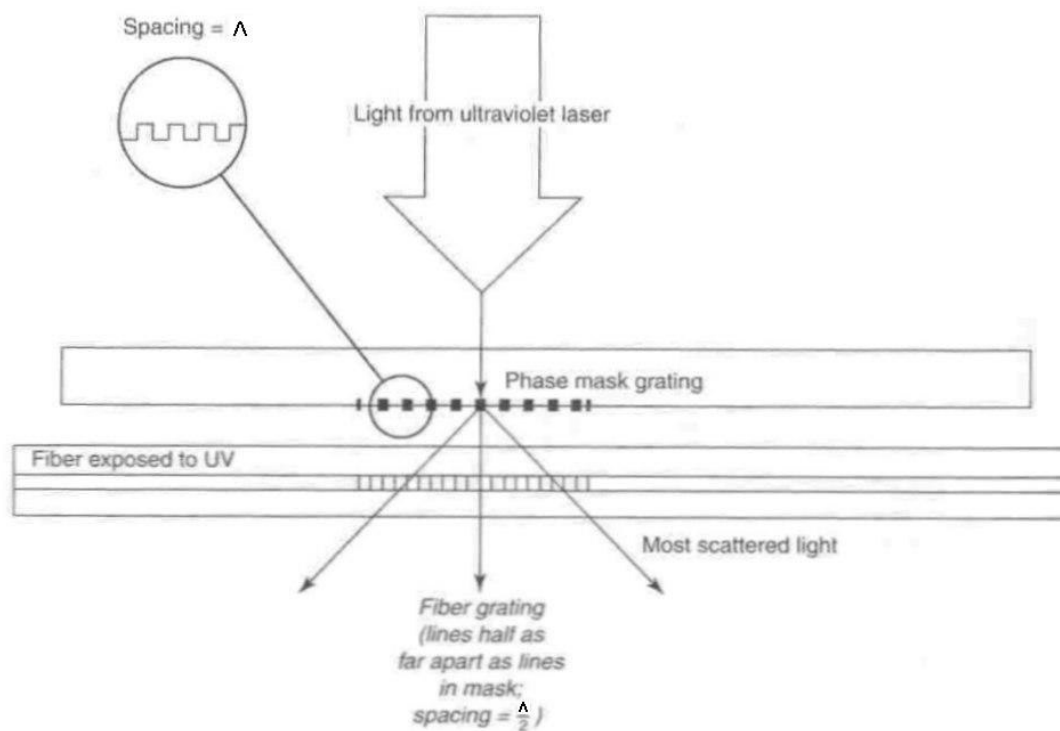
σχήμα 4.2

Κατασκευή των Fiber Gratings

Η φωτοευαισθησία της ίνας είναι ένα σημαντικό φαινόμενο το οποίο αφορά στην εγγραφή των Bragg gratings στον πυρήνα της ίνας. Η πρώτη παραγωγή των Bragg Gratings έγινε το 1978 στο καναδικό κέντρο τηλεπικοινωνιών από τον Hill. Αρχικά τα gratings κατασκευάζονταν χρησιμοποιώντας ένα ορατό laser που διαδιδόταν κατά μήκος του πυρήνα της ίνας. Όμως, έπρεπε να περάσουν άλλα 11 χρόνια για να δημοσιευθεί από τον G. Meltz το 1989, μία κορυφαία εργασία για την παραγωγή τους στον πυρήνα της ίνας μέσω της πλευράς της (fabrication through its side), ανακαλύπτοντας μια καινοτομία στους FBG αισθητήρες. Αυτή η τεχνική «πλευρικής» εγγραφής δημιουργεί ένα Bragg grating άμεσα στον πυρήνα της ίνας, χρησιμοποιώντας ένα ολογραφικό συμβολόμετρο το οποίο φωτίζεται από μία πηγή υπεριώδους φωτός (UV source).

Από τότε πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να αυξήσουν το δείκτη διάθλασης μέσω της βελτίωσης της μεθόδου έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία και τη φωτοευαισθησία του πυρήνα της ίνας. Οι εγκάρσιες ολογραφικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμες, διότι μπορούν να κατασκευάσουν τα κατάλληλα διαμορφωμένα gratings και μπορούν να παράξουν εύκολα FBG αισθητήρες με το επιθυμητό φάσμα απόκρισης και σε οποιοδήποτε θέση της ίνας. Το 1993 προτάθηκε μια προχωρημένη τεχνική παραγωγής FBG, η οποία έκανε χρήση μίας οπτικής μάσκας φάσης (optical phase mask) για να δημιουργήσει άκρες/όρια συμβολής (interference fringes). Παρόμοιες τεχνικές για την παρασκευή FBG χρησιμοποιούνται σήμερα στους πιο πολλούς αισθητήρες.

Το υπεριώδες φως δημιουργεί fiber gratings με το σπάσιμο των ατομικών δεσμών στο γυαλί του πυρήνα. Η σύνθεση του γυαλιού προσαρμόζεται έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει το αποτέλεσμα. Συνήθως για την παρασκευή, ένα υπεριώδες laser φωτίζει την ίνα μέσω μιας λεπτής επίπεδης πλάκας γυαλιού με κατάλληλη διάταξη παράλληλων κοιλοτήτων στο κάτω μέρος του. Η επιφάνεια αυτή καλείται μάσκα φάσης (phase mask). Οι περιοχές με υψηλή και χαμηλή ένταση εναλλάσσονται. Στις περιοχές με υψηλή ένταση το υπεριώδες φως σπάει τους δεσμούς στο γυαλί, αλλάζοντας το δείκτη διάθλασης και σχηματίζει ένα grating. Λόγω της γεωμετρίας οι γραμμές του grating στην ίνα μειώνονται στο μισό καθώς εκτείνονται πιο μακριά από τις παράλληλες γραμμές της μάσκας φάσης. Δηλαδή, εάν τα διαστήματα στη μάσκα φάσης είναι “ Λ ”, η απόσταση των grating της ίνας είναι “ $\Lambda/2$ ” (βλ. σχήμα 4.3). Το μήκος κύματος του laser δεν επηρεάζει τα διαστήματα των γραμμών, αλλά επηρεάζει τη δύναμη του grating.



σχήμα 4.3

Το μέγεθος της αλλαγής στο δείκτη διάθλασης εξαρτάται από την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, τη σύνθεση του γυαλιού και οποιαδήποτε επεξεργασία πριν τη διαδικασία. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι παλμικά laser υπεριώδους ακτινοβολίας φωτίζουν τις ίνες για μερικά λεπτά σε υψηλές εντάσεις. Αυτό μεταβάλλει το δείκτη διάθλασης κατά ένα συντελεστή 0.00001 έως 0.001. Εάν η ίνα επεξεργαστεί με υδρογόνο πριν την έκθεση, μπορεί να αυξηθεί η ευαισθησία, με αποτέλεσμα ο δείκτης διάθλασης να αυξάνεται έως και 1%. Αυτά τα υψηλά μεγέθη της αύξησης είναι συγκρίσιμα με τη διαφορά ανάμεσα στο δείκτη διάθλασης μεταξύ του πυρήνα και της επικάλυψης, η οποία συνήθως δεν ξεπερνάει το 1% σε ίνες μίας κατάστασης (single – mode fiber).

Διαδικασία παραγωγής

Αρχικά η κατασκευή των φωτοευαίσθητων οπτικών ινών και η «εγγραφή» των Bragg grating γίνονται ξεχωριστά. Σήμερα οι γραμμές παραγωγής δημιουργούν την ίνα και το grating σε ένα στάδιο. Αυτός ο τρόπος μειώνει το κόστος και το χρόνο και επιτρέπει, επίσης, τη μαζική παραγωγή των Bragg gratings. Η μαζική παραγωγή διευκολύνει ιδιαίτερα στις «έξυπνες» κατασκευές, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως και 3000 Bragg gratings σε μία μόνο ίνα.

Ανάκλαση και μετάδοση στα fiber gratings

Το μήκος κύματος είναι αυτό που επηρεάζει το φως καθώς ταξιδεύει μέσα στην ίνα. Κάθε γραμμή ανακλά ένα μικρό κομμάτι του φωτός σε όλα τα μήκη κύματος. Εάν το μήκος κύματος στο γυαλί είναι ακριβώς διπλάσιο της απόστασης των γραμμών που είναι χαραγμένες στην ίνα, τότε όλο το σκεδαζόμενο φως είναι σε φάση, με αποτέλεσμα τα κύματα του φωτός να συμβάλλουν όλα μαζί. Αυτό το συγκεκριμένο μήκος κύματος ανακλάται. Όσο πιο πολλές γραμμές, όσο πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη η απόσταση και όσο πιο έντονα χαραγμένες στην ίνα, τόσο πιο έντονη είναι η ανάκλαση.

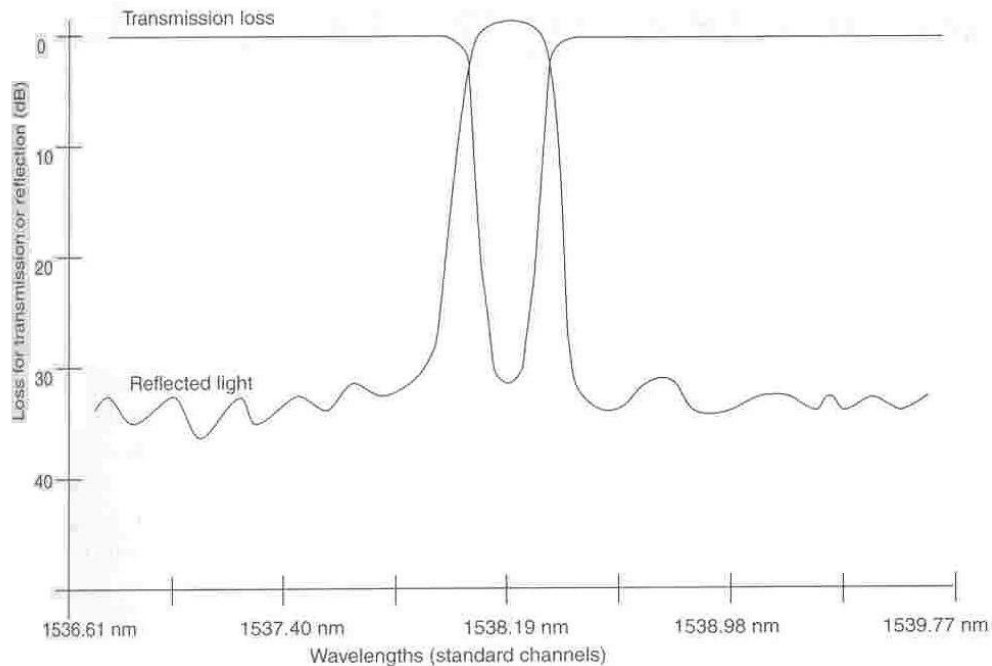
Το ανακλώμενο μήκος κύματος είναι διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των γραμμών που είναι χαραγμένες στην ίνα, διότι το κύμα του φωτός πρέπει να περάσει στην περιοχή αναμεσαί τους δύο φορές, την πρώτη μέσα στο grating και την άλλη καθώς ανακλάται προς τα πίσω. Είναι, επίσης, γνωστό ότι το μήκος κύματος που έχει σημασία, είναι εκείνο μέσα στο γυαλί, το οποίο είναι μικρότερο από εκείνο στον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης εισέρχεται στην εξίσωση, εάν θέλουμε τα αποτελέσματα σε μήκη κύματος στον αέρα (που είναι και το πιο σύνηθες). Έστω “Λ” η απόσταση των gratings και “n” ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού. Το ανακλώμενο μήκος κύματος (μετρούμενο στον αέρα) είναι :

$$\lambda_{\text{grating}} = 2 n \Lambda \quad (4.1)$$

Παραδείγματος χάριν, εάν η απόσταση των gratings είναι 0.500 μm και ο δείκτης διάθλασης είναι 1.47, τότε το συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι 1.47 μm. Μπορούμε, επίσης, να αντιστρέψουμε την εξίσωση για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη απόσταση των gratings για να ανακλαστεί ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι για να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, πρέπει να είναι γνωστός ο ακριβής δείκτης διάθλασης και η απόσταση των gratings.

Άλλα μήκη κύματος τα οποία δεν πληρούν αυτό το κριτήριο δεν ανακλώνται σε φάση, έτσι τα σκεδαζόμενα κύματα φωτός δεν προστίθενται όλα μαζί. Το ανακλώμενο φως έχει μέσο όρο μηδέν, έτσι τα κύματα μεταδίδονται σχεδόν ανεπηρέαστα. Το αποτέλεσμα είναι μια απλή γραμμή, η οποία ανακλά το συγκεκριμένο μήκος κύματος και μεταδίδει όλα τα υπόλοιπα. Καμία οπτική συσκευή δε λειτουργεί τέλεια και στην πράξη η ανάκλαση αυξάνεται έντονα σε ένα εύρος μηκών κύματος με κορυφή την ανάκλαση, με το συγκεκριμένο μήκος κύματος. Τα Fiber Bragg Gratings μπορούν να φτιαχτούν έτσι ώστε

να έχουν τη μέγιστη ανάκλαση σε ένα στενό εύρος. Η καμπύλη της ανάκλασης δείχνει το τμήμα του φωτός που ανακλάται σε dB στο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το σχέδιο μετάδοσης δείχνει την απώλεια στο συγκεκριμένο μήκος κύματος (βλ. σχήμα 4.4).



σχήμα 4.4

Αυτές οι αποκλίσεις στην ανακλαστικότητα των μηκών κύματος εξαρτώνται από τη φύση του grating. Καλές, λεπτές, με ομοιόμορφη απόσταση γραμμές τείνουν να συγκεντρώνουν την ανάκλαση σε ένα στενό φάσμα μηκών κύματος. Αυξάνοντας την έκθεση για να φτιαχτεί ένα πιο δυνατό grating, θα αυξηθεί η ικανότητα ανάκλασης και θα αυξηθεί το εύρος των ανακλώμενων μηκών κύματος. Εμπορικές συσκευές που χρησιμοποιούν αυτό το σχεδιασμό επιλέγουν ένα εύρος μηκών κύματος τόσο στενό όσο μερικά δέκατα του νανόμετρου, φτάνοντας μέχρι μερικά νανόμετρα.

Σύνθετα και με κλίση Gratings

Τα fiber gratings μπορούν, επίσης, να φτιαχτούν σε περιοχές όπου δεν ισαπέχουν ή δεν είναι κάθετα κατά το μήκος της ίνας.

Τύποι FBGs

1. uniform positive-only index change
2. Gaussian apodized
3. raised-cosine apodized
4. chirped
5. discrete phase shift
6. superstructure

Chirped Bragg gratings

Η μορφή των gratings μπορεί να τροποποιηθεί για να προστεθούν άλλα χαρακτηριστικά, όπως η γραμμική αλλοίωση της περιόδου (καλείται chirp), για να αυξηθεί το εύρος του ανακλώμενου φάσματος. Το chirp έχει την ικανότητα να αυξάνει τη σκέδαση, δηλαδή διαφορετικά μήκη κύματος ανακλώμενα από το grating θα υπόκεινται σε διαφορετικές καθυστερήσεις.

4.2

Βασικές αρχές ανίχνευσης των FBG

Εισαγωγή

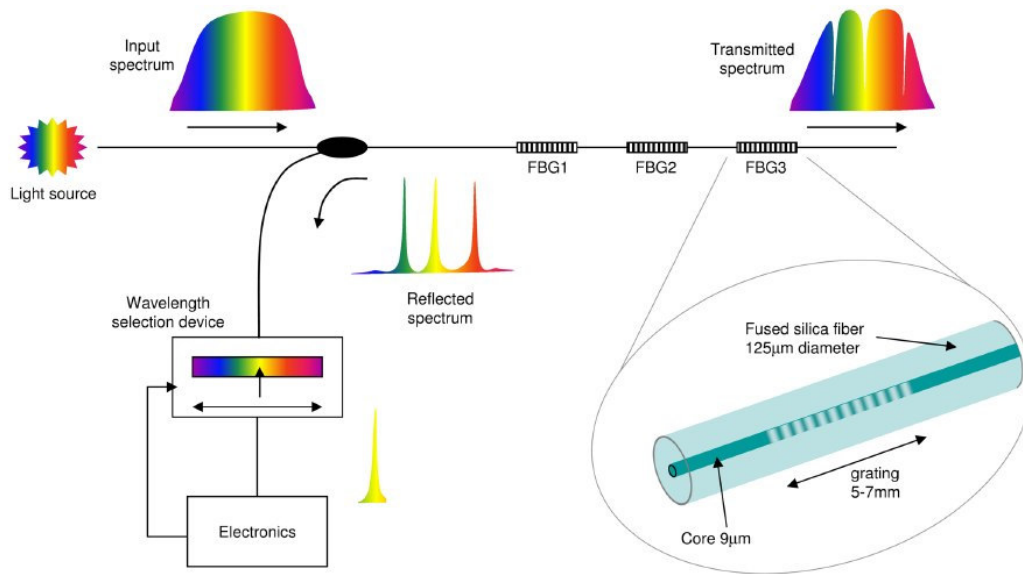
Στο πεδίο των αισθητήρων από οπτικές ίνες οι αισθητήρες FBG είναι από τα πιο εντυπωσιακά επιτεύγματα των τελευταίων χρόνων. Έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους αισθητήρες οπτικών ινών, κυρίως λόγω των ιδιοτήτων τους για τοποθέτηση πολλών αισθητήρων σε μία μόνο οπτική ίνα (multiplexing) και εύκολης παρακολούθησής τους λόγω του μοναδικού μήκους κύματος κάθε grating. Επίσης, τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι κωδικοποιημένα στη μορφή μήκους κύματος, η οποία είναι μια απόλυτη παράμετρος και δεν υφίσταται αλλοιώσεις από τη διαδρομή του φωτός. Για αυτό το λόγο το σήμα εξόδου είναι ανεπηρέαστο από την ένταση της πηγής και τις απώλειες στις ενώσεις των ινών με τους συζευκτές (coupler).

Εντατική έρευνα σε αισθητήρες FBG επικεντρώθηκε σε βασικές αρχές της αξιοπιστίας των αισθητήρων σε θέματα όπως η ευαισθησία σε παραμορφώσεις, επαναληψιμότητα, τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν τη δυναμική των αισθητήρων FBG για τη μέτρηση των παραμορφώσεων. Τα μοναδικά πλεονεκτήματα που προσφέρονται έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση τους σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως στα αεροσκάφη, στη ναυτιλία και στην ιατρική. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι οι FBG αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση πολλαπλών ιδιοτήτων όπως παραμόρφωση, πίεση, θερμοκρασία, ταλάντωση, μαγνητικά πεδία και επιτάχυνση.

Βασικές αρχές λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το FBG είναι μια περιοδική «κατασκευή» η οποία είναι γραμμένη σε ένα τμήμα ίνας μίας κατάστασης (single-mode fiber) και στην οποία είναι σχηματισμένη μια περιοδική αλλοίωση του δείκτη διάθλασης του πυρήνα που προήλθε από έκθεσή του σε υπεριώδη ακτινοβολία στα 197 nm ή 248 nm. Όταν το φως σε μια ίνα περνάει από ένα FBG, πολλαπλές ανακλάσεις Fresnel συμβαίνουν κατά μήκος του grating λόγω των αλλαγών στο δείκτη διάθλασης. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το ανακλώμενο μήκος κύματος ονομάζεται μήκος κύματος

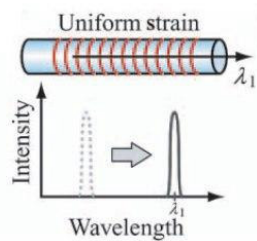
του Bragg και δίδεται από την εξίσωση $\lambda_B = 2 n \Lambda$. Το φως το οποίο δεν πληρεί την παραπάνω συνθήκη – εξίσωση περνάει από το FBG με ελάχιστες απώλειες (βλ. σχήμα 4.5). Και το “n” και το “Λ” εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την παραμόρφωση και κατά συνέπεια το μήκος κύματος Bragg είναι ευαίσθητο στην παραμόρφωση και τη θερμοκρασία. Οι αλλαγές στο δείκτη διάθλασης στα FBG είναι σχετικά μόνιμες, οπότε τα FBG είναι ευαίσθητα σε ένα αριθμό φυσικών παραμέτρων.



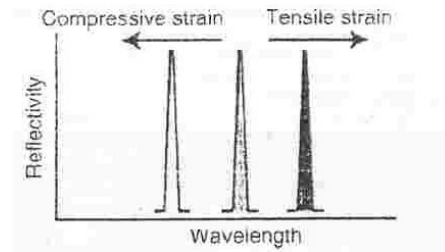
σχήμα 4.5

Έτσι, με το να παρατηρούνται οι αλλαγές στο ανακλώμενο μήκος κύματος, οι αισθητήρες FBG μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία ποικιλία εφαρμογών ανίχνευσης για να μετρήσουν: παραμόρφωση, θερμοκρασία, πίεση, υπέρηχους, μαγνητικά πεδία, δύναμη και ταλαντώσεις.

Κάθε ανακλώμενο σήμα θα έχει ένα μοναδικό μήκος κύματος και θα μπορεί να παρακολουθηθεί εύκολα, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την πολλαπλή παρακολούθηση αισθητήρων χρησιμοποιώντας μόνο μια οπτική ίνα. Βέβαια το κύριο μήκος κύματος του κάθε FBG θα ποικίλει ανάλογα με τις αλλαγές των παραπάνω παραμέτρων τις οποίες υφίσταται ο αισθητήρας.



σχήμα 4.6



σχήμα 4.7

Έστω $\Delta\epsilon$ η διαμήκης αλλαγή της παραμόρφωσης και $\Delta\lambda_{BS}$ η μετατόπιση του μήκους κύματος. Τότε, για την εφαρμογή διαμήκου παραμόρφωσης ισχύει (βλ. σχήματα 4.6 και 4.7) :

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B (1 - \rho_\epsilon) \Delta\epsilon \quad (4.2)$$

όπου ρ_ϵ ο φωτοελαστικός συντελεστής της ίνας που δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_\epsilon = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})] \quad (4.3)$$

όπου ν ο λόγος του Poisson και ρ_{11} , ρ_{12} τα μέρη του οπτικού αισθητήρα παραμόρφωσης, με συνήθεις τιμές το 0.22. Για μια ίνα από γυαλί οι ευαισθησίες μήκους κύματος – παραμόρφωσης στα 800 nm και στα 1.55 nm FBG αισθητήρων έχουν μετρηθεί στα ~0.64 pm/με και ~1.15 pm/με αντιστοίχως.

Έστω ΔT η αλλαγή στη θερμοκρασία και $\Delta\lambda_{BT}$ η αλλαγή του μήκους κύματος. Τότε, με μεταβολή της θερμοκρασίας, η αντίστοιχη αλλαγή είναι :

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (4.4)$$

όπου, α και ζ είναι ο θερμικός συντελεστής διαστολής και ο θερμο-οπτικός συντελεστής του υλικού της ίνας αντιστοίχως.

Για μια ίνα από γυαλί οι ευαισθησίες μήκους κύματος –θερμοκρασίας στα 800 nm και στα 1.55 nm FBG αισθητήρων έχουν μετρηθεί στα ~6.8 pm/°C και ~13 pm/ °C αντιστοίχως [6].

Ο δείκτης διάθλασης “ n ” και η περίοδος του grating “ Λ ”, συνεπώς και το μήκος κύματος Bragg “ λ_B ”, ποικίλουν με αλλαγές στην αξονική παραμόρφωση $\Delta\epsilon$ και θερμοκρασία ΔT . Η μετατόπιση στο μήκος κύματος Bragg σε αντιστοιχία με την παραμόρφωση και τη θερμοκρασία είναι :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_\epsilon) \Delta\epsilon + (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (4.5)$$

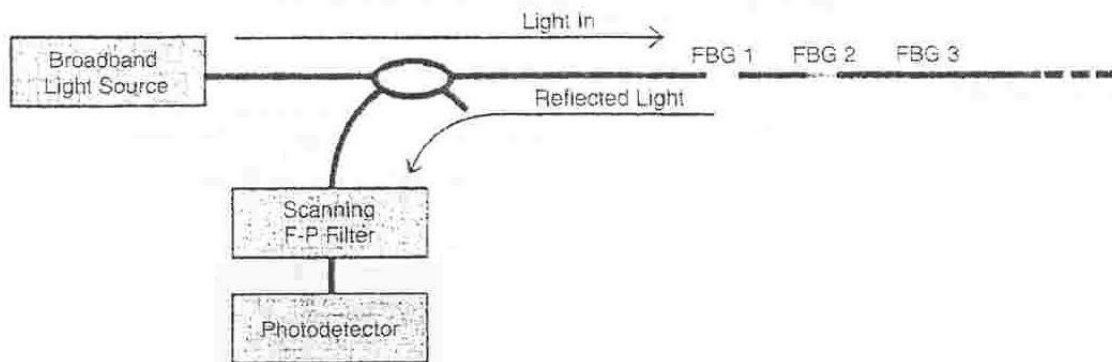
Τεχνικές τοποθέτησης πολλών FBG σε μία ίνα (multiplexing)

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των FBG αισθητήρων είναι η ικανότητά τους να τοποθετούνται παραπάνω του ενός, σε μια και μόνο ίνα. Στις περισσότερες εφαρμογές οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν μαζί έτσι ώστε να μπορούν να παρθούν μετρήσεις σε καταναμημένες περιοχές και να μπορέσουν να ανταγωνιστούν τους συμβατικούς

αισθητήρες (π.χ. strain gauges). Μία μεγάλη σειρά από αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιεί μόνο μία πηγή και η επεξεργασία του σήματος να γίνεται βάσει μιας σειράς από τις ακόλουθες τεχνικές: πολυπλεξία διαμοίρασης χρόνου (TDM), πολυπλεξία διαμοίρασης χώρου (SDM), πολυπλεξία διαμοίρασης συχνότητας (FDM) και πολυπλεξία διαμοίρασης μήκους κύματος (WDM). Οι τεχνικές πολυπλεξίας που είναι κατάλληλες για συμβατικούς αισθητήρες οπτικών ινών, μπορούν να εφαρμοστούν και σε αισθητήρες FBG.

Πολυπλεξία διαμοίρασης μήκους κύματος (WDM)

Το σχήμα 4.8 δείχνει ένα σκαρίφημα ενός φίλτρου ανίχνευσης και επεξεργασίας του σήματος (scanning filter FBG interrogation unit) το οποίο λειτουργεί βάσει της τεχνικής WDM. Τα συστήματα interrogation θα διαχωρίσουν τα σήματα κάθε ξεχωριστού αισθητήρα. Απαιτούν τη χρήση FBG με υψηλή ικανότητα ανάκλασης και τα οποία θα λειτουργούν το καθένα με ένα ξεχωριστό μήκος κύματος. Είναι μια από τις πιο άμεσες τεχνικές, καθώς οι FBG αισθητήρες στο δίκτυο ορίζονται έτσι ώστε οι επιχειρησιακές περιοχές τους να μην επικαλύπτονται. Ο μέγιστος αριθμός αισθητήρων σε μια ίνα που μπορεί να εξετασθεί με ένα μόνο interrogator εξαρτάται από το οπτικό εύρος της πηγής φωτός και το επιχειρησιακό εύρος των αισθητήρων. Συνήθεις τιμές κυμαίνονται γύρω στους 40 αισθητήρες και περιορίζεται κυρίως από το εύρος της πηγής. Οι εμπορικές εφαρμογές interrogator βασίζονται σε φίλτρα Fabry – Perot.



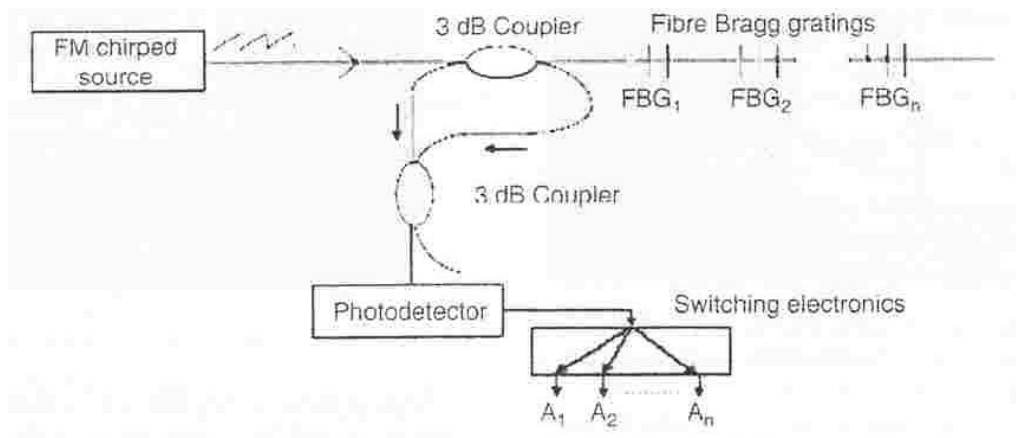
σχήμα 4.8

Πολυπλεξία διαμοίρασης χώρου (SDM)

Η τεχνική SDM είναι σχετικά απλή και χωρίζει το φως σε πολλά τμήματα της ίνας, χρησιμοποιώντας ένα fused fiber – coupler. Τα ανακλώμενο φως από τα FBG του κάθε τμήματος είτε αντιστοιχεί σε ένα ίσο αριθμό μονάδων μετρήσεως του μήκους κύματος είτε σε μια κοινής χρήσης συσκευή με τη βοήθεια ενός οπτικού διακόπτη. Το ανακλώμενο σήμα από κάθε τμήμα της ίνας δεν αλληλεπιδρά και έτσι με αυτό τον τρόπο FBGs με το ίδιο χαρακτηριστικό μήκος κύματος (Bragg wavelength) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ίνα. Αυτή η τεχνική, σε συνδυασμό με την τεχνική WDM, μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των αισθητήρων σημαντικά.

Πολυπλεξία διαμοίρασης συχνότητας (FDM)

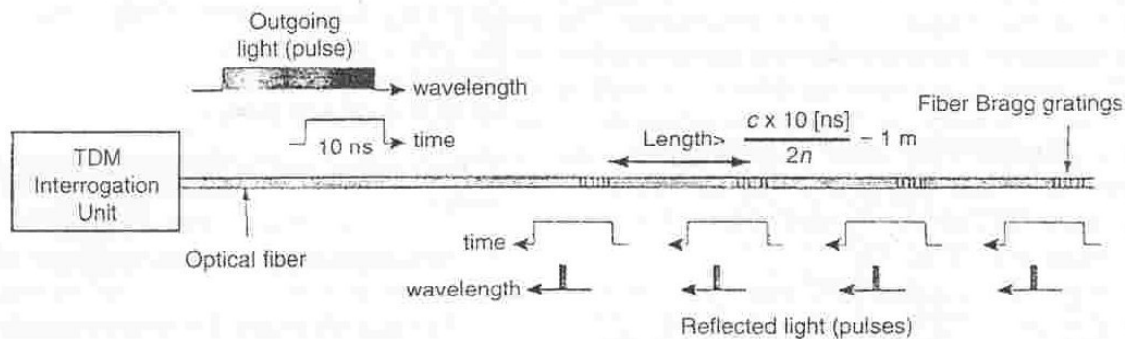
Το σχήμα 4.9 δείχνει ένα σκαρίφημα με το σύστημα FDM. Μία πηγή laser ελεγχόμενου μήκους κύματος χρησιμοποιείται για μια σειρά από όμοιους αισθητήρες. Το σήμα αναφοράς από τον coupler συμβάλλει με τα ανακλώμενα σήματα από τους αισθητήρες. Εάν οι αισθητήρες λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, τα σήματα από κάθε αισθητήρα μπορούν να διαχωριστούν από κατάλληλα ηλεκτρονικά. Επιτυχής τεχνική αποδιαύλωσης (demultiplexing), εξαρτάται από τη μη επικάλυψη των συχνοτήτων των FBG.



σχήμα 4.9

Πολυπλεξία διαμοίρασης χρόνου (TDM)

Το ακόλουθο σκαρίφημα (βλ σχήμα 4.10) δείχνει πώς λειτουργεί το σύστημα TDM, κατά το οποίο στενοί οπτικοί παλμοί στέλνονται σε μία οπτική ίνα, που περιέχει πολλά χαμηλής ανάκλασης FBG με ίδια μήκη κύματος Bragg. Το φως χρειάζεται περίπου 10 ns για να διασχίσει μια διαδρομή ενός μέτρου σε μία οπτική ίνα και να επιστρέψει. Επομένως, η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς αισθητήρες πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 μέτρο, για παλμούς εύρους 10 ns. Ο κάθε αισθητήρας διαχωρίζεται με τη μέτρηση του χρόνου που χρειάζονται τα σήματα για να επιστρέψουν στη μονάδα interrogation. Ένας παλμός αποτελείται από πολλά μήκη κύματος, αλλά ο αισθητήρας FBG ανακλά μόνο τη συνιστώσα του μήκους κύματος που ταιριάζει με το μήκος κύματος Bragg. Συνήθως, η μετατόπιση του μήκους κύματος του αισθητήρα καθορίζεται με τη χρήση ενός γραμμικού οπτικού φίλτρου, το οποίο μετατρέπει τη μετατόπιση του μήκους κύματος σε αλλοίωση της οπτικής έντασης.



σχήμα 4.10

Τα TDM συστήματα χρησιμοποιούν όμοιους, χαμηλής ανακλαστικότητα αισθητήρες που όλοι έχουν το ίδιο χαρακτηριστικό μήκος κύματος. Όμως, ο λόγος σήμα προς θόρυβο (signal-to-noise ratio) των συστημάτων TDM είναι χαμηλότερος από εκείνον των συστημάτων WDM και γι' αυτό το λόγο έχουν χαμηλότερη απόδοση. Εκτός αυτού του μειονεκτήματος τα συστήματα TDM μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγάλο αριθμό αισθητήρων χωρίς την ανάγκη στοιχείων επιλογής μήκους κύματος.

Πλεονεκτήματα FBG αισθητήρων σε σχέση με συμβατικούς

- Ικανότητα τοποθέτησης πολλών αισθητήρων σε μία ίνα (multiplexing)
- Μικρό βάρος και μέγεθος
- Δεν υπόκεινται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εύφλεκτο περιβάλλον (π.χ δεξαμενές καυσίμων)
- Γρήγορη απόκριση
- Ευκολία τοποθέτησης σε σύνθετα υλικά
- Δεν υπάρχει πρόβλημα διάβρωσης

Μειονεκτήματα

- Η μετρούμενη παραμόρφωση μπορεί να είναι τρισδιάστατης φύσης
- Μεγάλη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές
- Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τη μέθοδο της ανάλυσης του μήκους κύματος

Η τεχνολογία των FBG Αισθητήρων έχει υποστεί πολύ μεγάλη ανάπτυξη από την πρώτη τους παρουσίαση από τον Morey το 1989. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι FBG αισθητήρες έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους οπτικούς και ηλεκτρικούς. Έτσι, καθίστανται κατάλληλοι σε εφαρμογές παρακολούθησης της κατασκευής (health monitoring) σε κατασκευές όπως γέφυρες, φράγματα, στα αεροσκάφη και, φυσικά, στα πλοία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε υπάρχουσες κατασκευές με την επικόλληση πάνω στην επιφάνειά τους (surface mounted). Ακόμη, σε νέες κατασκευές, μπορούν να τοποθετηθούν κατά τη διάρκεια παραγωγής (embedded sensors) μέσα στο υλικό, χωρίς να επηρεάζουν τις ιδιότητες λόγω του μικρού μεγέθους.

5. Πείραμα Κάμψης

5.1

Εισαγωγή

Ύστερα από το θεωρητικό μέρος και την παρουσίαση των οπτικών ινών, καθώς και των αισθητήρων από οπτικές ίνες, κρίνεται σκόπιμη στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας η εκτέλεση δυο πειραμάτων. Στα κεφάλαια 5 και 6 αναλύονται τα δυο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, με σκοπό να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών, καθώς και να συγκριθούν οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους οπτικούς αισθητήρες με τους κλασικούς αισθητήρες (ηλεκτρομηκυνσιόμετρα - strain gauges). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το πείραμα της απλής κάμψης ενός δοκιμίου με οπή σε αμφιέριστη έδραση.

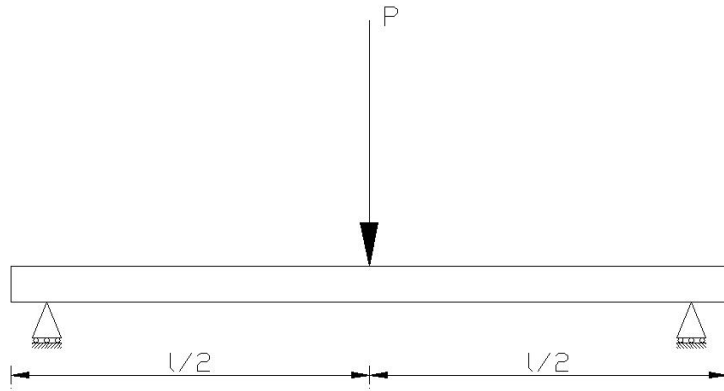
5.2

Κάμψη

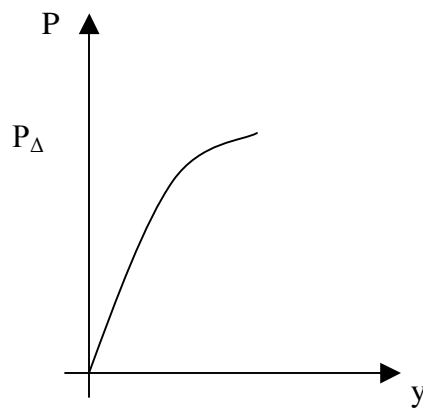
Κατά την καταπόνηση αυτή ελέγχεται η αντοχή σε κάμψη των δοκών από διάφορα υλικά (μέταλλα, ξύλο κ.λ.π.) που υφίστανται είτε συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο τους ή φορτία σε άλλες θέσεις καθ' όλο το μήκος τους ή, τέλος, και ομοιόμορφα κατανομημένα φορτία. Η καταπόνηση των δοκών γίνεται είτε στην ελαστική περιοχή (οπότε μετά την αποφόρτιση η δοκός επανέρχεται στην πριν από τη φόρτιση κατάσταση της) είτε στην ελαστοπλαστική ή πλαστική περιοχή, οπότε εμφανίζονται μόνιμες παραμορφώσεις.

Θεωρούμε τη δοκό που φαίνεται στο σχήμα 5.1, η οποία στηρίζεται αμφιέριστα και δέχεται ένα φορτίο στο μέσο της. Τότε το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που προκύπτει, είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 5.2. Σε αυτό το διάγραμμα ορίζεται ως P_{Δ} το φορτίο διαρροής. Η ροπή διαρροής της ράβδου M_{Δ} είναι:

$$M_{\Delta} = \frac{P_{\Delta} \cdot l}{4}$$



σχήμα 5.1



σχήμα 5.2

Όταν εφαρμόζονται δύο ίσα φορτία (βλ. σχήμα 5.3), τότε η οριακή ροπή που προκύπτει είναι:



σχήμα 5.3

$$M_{\Delta} = \frac{P_{\Delta} \cdot l_1}{2}$$

όπου, l_1 το μήκος από το αριστερό άκρο της ράβδου.

Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της M_{Δ} είναι προτιμότερος γιατί έχει περισσότερο ομαλή κατανομή της καμπτικής ροπής.

Στα ψαθυρά υλικά, στα οποία παρατηρείται θραύση λόγω κάμψης, συνήθως ως μέτρο της ολκιμότητάς τους χρησιμοποιείται το μέγιστο βέλος κάμψης κατά τη στιγμή της θραύσης. Αυτό, όμως, έχει μόνο συγκριτική σημασία για γεωμετρικά ίδιες δοκούς που φορτίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Τα πειράματα της κάμψης μπορεί να γίνουν με οποιεσδήποτε μηχανές που να έχουν την ικανότητα να επιβάλλουν θλιπτικά φορτία και μάλιστα σε συγκεκριμένες θέσεις της δοκού. Είναι εξάλλου δυνατό τα φορτία να επιβάλλονται είτε στατικά είτε δυναμικά με ορισμένη συχνότητα.

Κατά το πείραμα της κάμψης, η δοκός στηρίζεται αμφιέριστα και εφαρμόζονται συγκεντρωμένα φορτία σε θέσεις της δοκού που καθορίζονται από τις εκάστοτε απαιτήσεις του προβλήματος. Σε καθορισμένες θέσεις της δοκού τοποθετούνται βελόμετρα για τη μέτρηση του βέλους κάμψης y της δοκού, μηκυσιόμετρα Huggenberger για τη μέτρηση των παραμορφώσεων ϵ και ηλεκτρομηκυσιόμετρα (strain gauges), επίσης για τη μέτρηση των παραμορφώσεων.

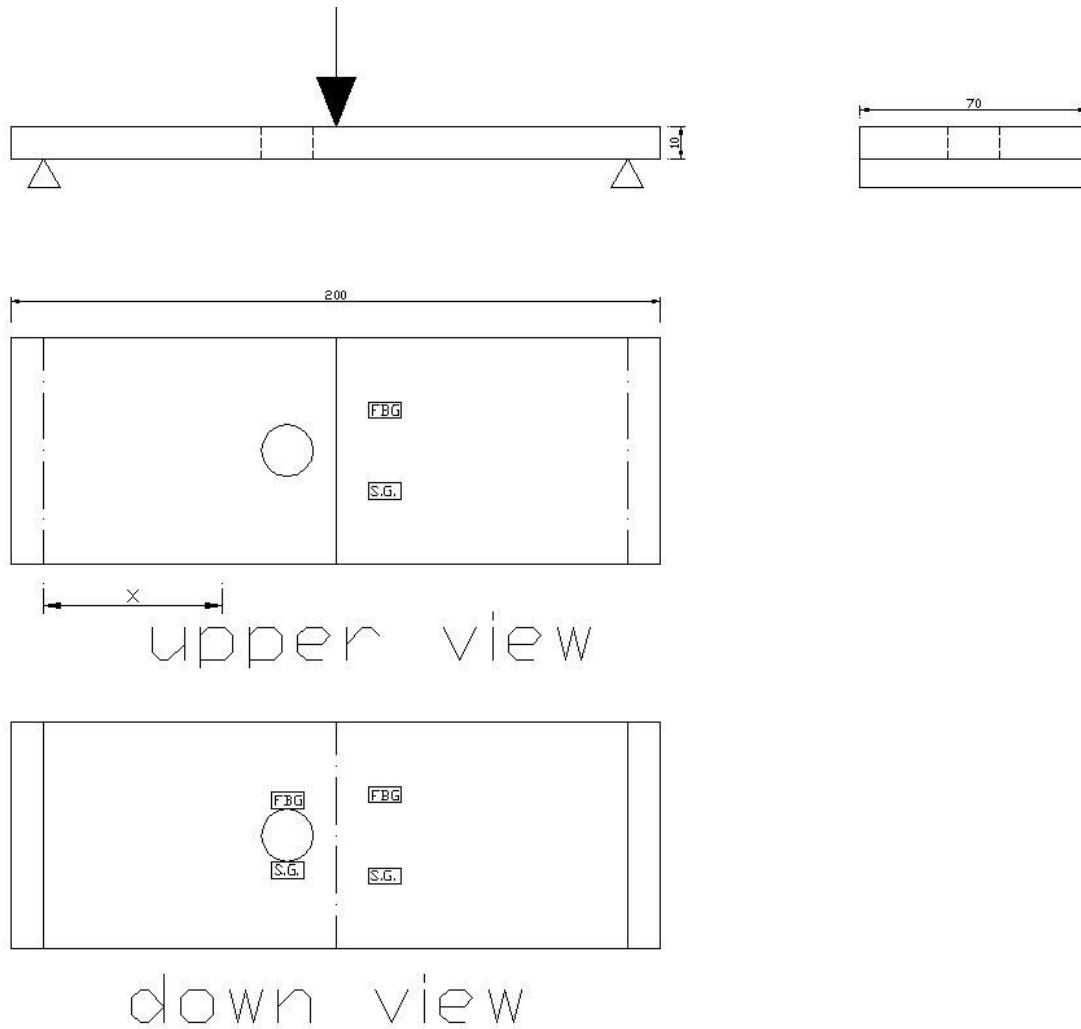
Από τις ενδείξεις των οργάνων είναι δυνατό να κατασκευάσουμε τα παραστατικά διαγράμματα των βελών κάμψης και των παραμορφώσεων, που θα δείχνουν τη συμπεριφορά της δοκού σε κάμψη.

5.3

Θεωρητικό μοντέλο

Στόχοι πειράματος

- Μέτρηση των παραμορφώσεων (ϵ_x) και στις δύο πλευρές του δοκιμίου, δηλαδή στην πάνω όψη που υφίσταται θλίψη καθώς και στην κάτω όψη που υφίσταται εφελκυσμό (βλ. σχήμα 5.4), σε σημεία του δοκιμίου που υφίστανται ελαστικές παραμορφώσεις. Η μέτρηση θα πραγματοποιηθεί και στις δυο περιπτώσεις με δύο διαφορετικούς τρόπους, δηλαδή με αισθητήρες οπτικών ινών (FBG) καθώς και με συμβατικά strain gauges, για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά των οπτικών αισθητήρων σε σχέση με την κλασική μέθοδο.
- Μέτρηση των πλαστικών παραμορφώσεων (ϵ_x) κοντά σε οπή, για να μετρηθεί η αύξηση των παραμορφώσεων λόγω συγκέντρωσης τάσης σε σημεία κοντά στην οπή. Μετρήσεις θα γίνουν και με τους δύο τρόπους.



σχήμα 5.4

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το σκαρίφημα του δοκιμίου κάμψης, το οποίο πρόκειται να λάβει μέρος στο πείραμα. Οι κύριες διαστάσεις του δοκιμίου (μήκος, πλάτος, πάχος) είναι καθορισμένες εκ των προτέρων, αφού το δοκίμιο προϋπήρχε στο εργαστήριο. Αυτό που μένει να καθοριστεί είναι η διάμετρος της οπής (η οποία θα δημιουργηθεί στο δοκίμιο), η θέση της, καθώς και οι θέσεις των αισθητήρων. Στην επόμενη παράγραφο υπολογίζονται θεωρητικά οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στο δοκίμιο και ορίζονται οι τελικές θέσεις των αισθητήρων και της οπής, καθώς και η διάμετρός της.

Θωρητικοί Υπολογισμοί

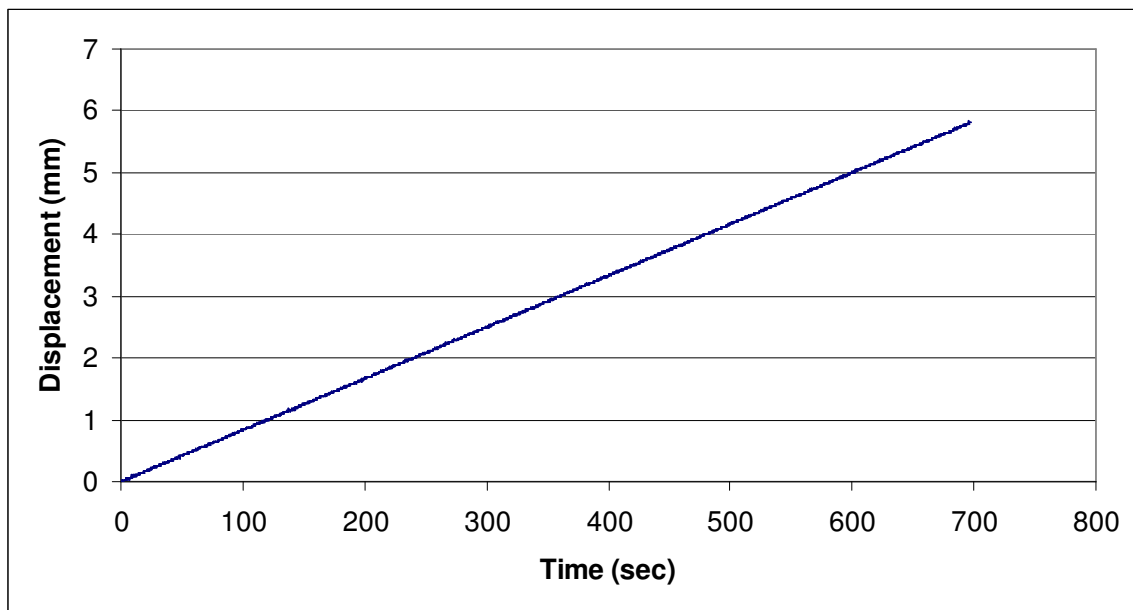
Το δοκίμιο που θα λάβει μέρος στο πείραμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής, με όριο διαρροής:

$$\sigma_0 = 348 \text{ MPa}$$

Η μηχανή δοκιμών του εργαστηρίου μπορεί να επιβάλλει μέγιστη δύναμη P_0 ίση με:

$$P_0 = 240 \text{ kN}$$

Στο πείραμα της κάμψης, η μετατόπιση αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, και το κατακόρυφο στέλεχος κατεβαίνει με σταθερή ταχύτητα (displacement controlled test), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5.



σχήμα 5.5

Διαστάσεις δοκιμίου:

Συνολικό μήκος, $L = 200 \text{ mm}$

Πλάτος, $B = 70 \text{ mm}$

Πάχος, $t = 10 \text{ mm}$

Εκλέγεται, η απόσταση ανάμεσα στις δύο θέσεις που θα στηρίζεται το δοκίμιο να είναι: Ανυποστήρικτο μήκος, $l = 180 \text{ mm}$

Σκοπός του πειράματος είναι να εμφανιστούν στο δοκίμιο πλαστικές παραμορφώσεις, για να παρακολουθηθεί η συμπεριφορά των αισθητήρων στην πλαστική περιοχή. Επομένως, πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι οι τάσεις που θα αναπτυχθούν σε κάποια περιοχή του δοκιμίου να ξεπερνούν το όριο διαρροής.

Στην περίπτωση της απλής κάμψης η περιοχή που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τάσεις είναι η μέση του δοκιμίου. Επομένως, το πρώτο σημείο που θα εξεταστεί είναι η μέση του δοκιμίου ($x = 90 \text{ mm}$). Ακολούθως, πρέπει να καθοριστεί η θέση και η διάμετρος της οπής. Εκλέγεται διάμετρος ίση με, $z = 16 \text{ mm}$, και εξετάζονται οι τάσεις που θα αναπτυχθούν σε δύο διαφορετικές θέσεις του δοκιμίου. Οι θέσεις αυτές απέχουν, $x = 45 \text{ mm}$ και $x = 75 \text{ mm}$, αντιστοίχως από το αριστερό άρο που στηρίζεται το δοκίμιο. Τελικά θα επιλεγεί μια θέση για την οπή, η οποία θα πρέπει να εμφανίζει τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του υλικού κατασκευής του δοκιμίου.

όπου:

x είναι η απόσταση από το αριστερό άκρο που στηρίζεται το δοκίμιο (βλ. σχήμα 5.4)

Από τη μηχανική παραμορφώσιμου σώματος γνωρίζουμε ότι η τάση σε απλή κάμψη είναι :

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

όπου:

M η ροπή στη συγκεκριμένη θέση

I η ροπή αδρανείας

y η κατακόρυφη απόσταση από το σύστημα αξόνων

Θεωρούμε φόρτιση δοκιμίου P στο πείραμα ίση με:

$$P = 10 \text{ kN}$$

α.

Τάση στη μέση του δοκιμίου ($x = 90 \text{ mm}$)

$$M = P l / 4 = 450 \text{ Nm}$$

$$y = 5 \text{ mm}$$

$$I = b t^3 / 12 = 5833.3 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = 386 \text{ MPa}$$

β.

Τάση στην οπή που βρίσκεται σε απόσταση $x = 45 \text{ mm}$

Διάμετρος οπής, $z = 16 \text{ mm}$

$$M = P l / 8 = 225 \text{ Nm}$$

$$y = 5 \text{ mm}$$

$$I = 4500 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = 250 \text{ MPa}$$

γ.

Τάση στην οπή που βρίσκεται σε απόσταση $x = 75 \text{ mm}$

Διάμετρος οπής, $z = 16 \text{ mm}$

$M = P \cdot x / 2 = 375 \text{ Nm}$

$y = 5 \text{ mm}$

$I = 4500 \text{ mm}^4$

$\sigma = 417 \text{ MPa}$

Στις παραπάνω (α-γ) περιπτώσεις υπολογίστηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε τρία διαφορετικά σημεία του δοκιμίου. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο θα διαρρεύσει στην μέση του δοκιμίου (όπως ήταν και η αρχική υπόθεση), και στην οπή που βρίσκεται στη θέση $x = 75 \text{ mm}$. Στα δύο αυτά σημεία οι τάσεις είναι μεγαλύτερες του ορίου διαρροής. Στο σημείο στη θέση $x = 45 \text{ mm}$, οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν είναι μεγαλύτερες του ορίου διαρροής και επομένως, το σημείο αυτό δεν μπορεί να επιλεγεί ως θέση της οπής. Άρα, εφόσον είμαστε σίγουροι πως στη μέση του δοκιμίου και στην οπή θα εμφανιστούν πλαστικές παραμορφώσεις, μπορούμε να προβούμε στην επιλογή των σημείων που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες.

Τελικές διαστάσεις

Ολικό μήκος, $L = 200 \text{ mm}$

Ανυποστήρικτο μήκος, $l = 180 \text{ mm}$

Πλάτος, $B = 70 \text{ mm}$

Πάχος, $t = 10 \text{ mm}$

Διάμετρος οπής, $z = 16 \text{ mm}$

Θέση Οπής, απόσταση $x = 75 \text{ mm}$ από το αριστερό άκρο στήριξης

Αισθητήρες

Από την παραπάνω ανάλυση αποδείχθηκε ότι το δοκίμιο θα μεταβεί στην πλαστική περιοχή τουλάχιστον σε δύο σημεία. Επομένως, το πρώτο σημείο που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες (FBG και strain gauges) είναι εκατέρωθεν της οπής στην κάτω όψη του δοκιμίου. Στην άνω όψη και στην περιοχή της οπής και της μέσης του δοκιμίου, δεν γίνεται να τοποθετηθούν αισθητήρες διότι εκεί ακουμπάει ο κύλινδρος της μηχανής δοκιμών κατά τη διάρκεια του πειράματος (βλ. σχήμα 5.7). Εκτός από τους αισθητήρες που θα τοποθετηθούν στην οπή, θα τοποθετηθούν και αισθητήρες σε σημεία που δεν θα εμφανίσουν πλαστικές παραμορφώσεις. Όπως φάνηκε στην παραπάνω παράγραφο τα σημεία που βρίσκονται σε απόσταση $x = 45 \text{ mm}$ από το αριστερό άκρο, δεν εμφανίζουν πλαστικές παραμορφώσεις. Επομένως, το δεύτερο σημείο θα είναι στην κάτω όψη σε απόσταση $x = 45 \text{ mm}$, αλλά από το δεξί άκρο. Τέλος το τρίτο σημείο θα είναι και αυτό στην ίδια θέση, αλλά στην άνω όψη. Τα ανωτέρω συνοψίζονται στον πίνακα 5.1.

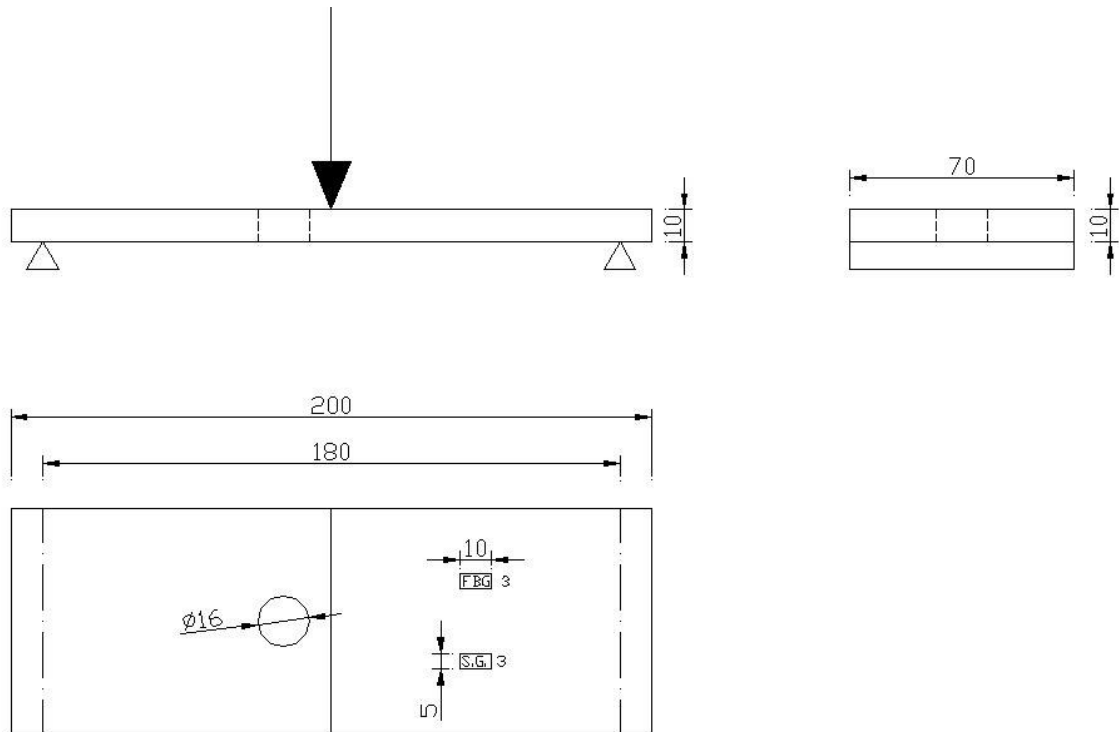
Είδος αισθητήρα	Ονομασία αισθητήρα	Επιφάνεια που βρίσκεται	Κοντά/Μακριά από οπή	Απόσταση από άκρο στήριξης
Οπτικός	FBG-1	Κάτω όψη	Κοντά στην οπή	$x = 75 \text{ mm}$
Συμβατικός	SG-1	Κάτω όψη	Κοντά στην οπή	$x = 75 \text{ mm}$
Οπτικός	FBG-2	Κάτω όψη	Μακριά από οπή	$x = 45 \text{ mm}$
Συμβατικός	SG-2	Κάτω όψη	Μακριά από οπή	$x = 45 \text{ mm}$
Οπτικός	FBG-3	Άνω όψη	Μακριά από οπή	$x = 45 \text{ mm}$
Συμβατικός	SG-3	Άνω όψη	Μακριά από οπή	$x = 45 \text{ mm}$

Πίνακας 5.1

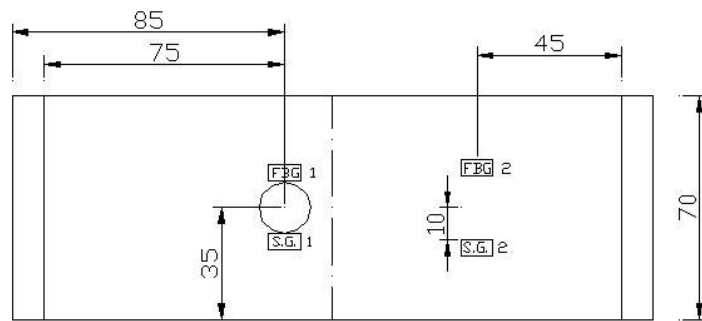
Οι αισθητήρες FBG-2,SG-2 και οι FBG-3,SG-3 βρίσκονται στην ίδια απόσταση από το άκρο στήριξης, αλλά σε διαφορετικές επιφάνειες. Επομένως, αναμένουμε από τα αποτελέσματα του πειράματος οι τιμές των αισθητήρων της κάτω όψης να είναι αντίθετες εκείνων της άνω όψης. Αυτό θα συμβαίνει διότι ενώ η άνω επιφάνεια θλίβεται, η κάτω εφελκύεται. Οι απόλυτες τιμές των τάσεων θα είναι οι ίδιες και στις δύο επιφάνειες, αφού βρίσκονται στην ίδια απόσταση από το άκρο στήριξης, απλώς τα πρόσημά τους θα είναι αντίθετα.

Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα (strain gauges) που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είναι ο τύπος KFG-10-120-C1 της εταιρείας Kyowa. Το ενεργό μήκος του αισθητήρα (gauge length) είναι 10 mm.

Στην επόμενη σελίδα υπάρχει το σχέδιο του δοκιμίου κάμψης με τους αισθητήρες.



upper view

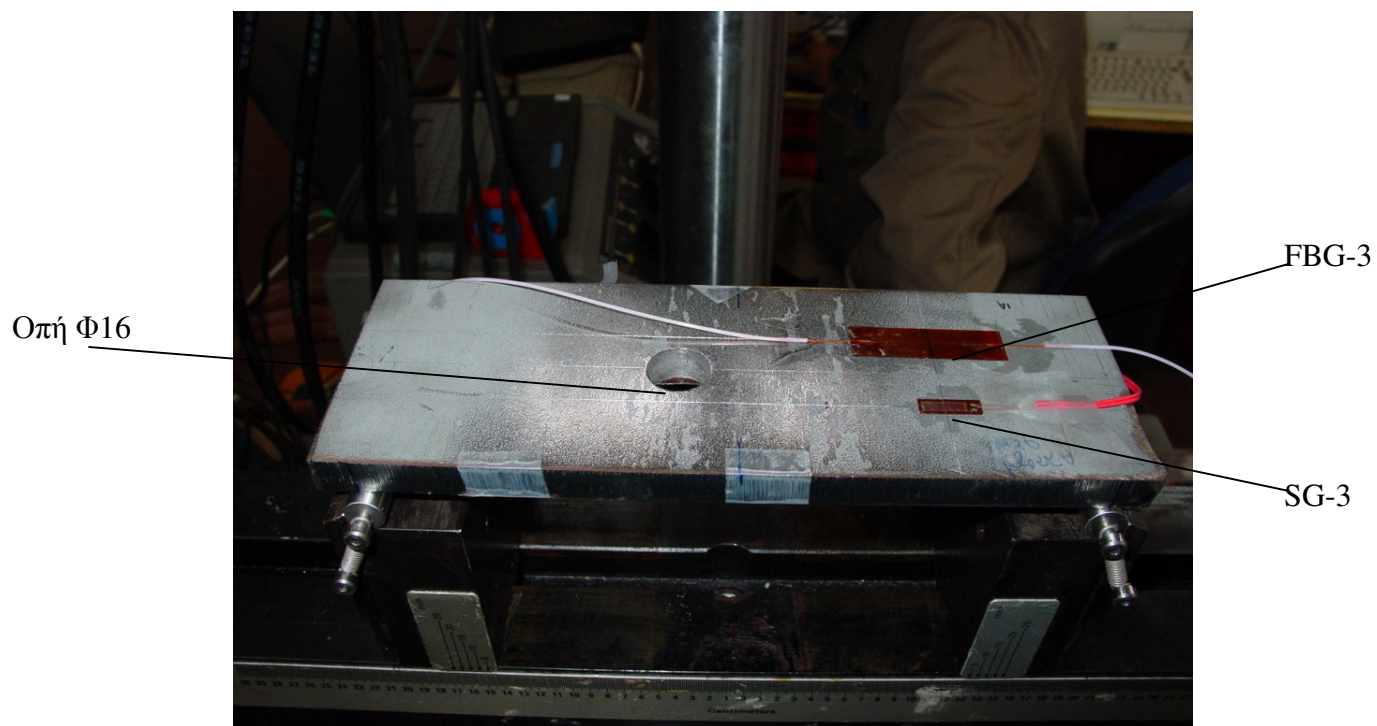


down view

σχήμα 5.6

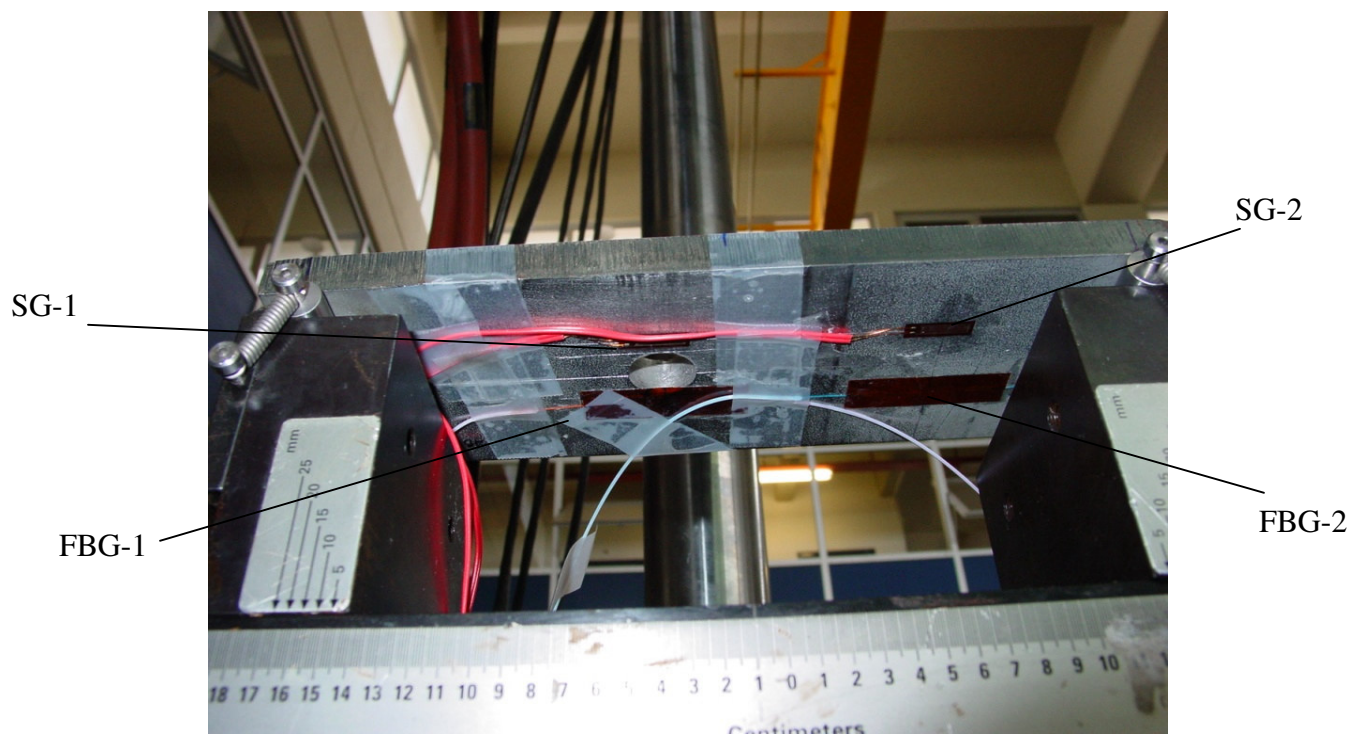
Στα παρακάτω σχήματα 5.7 και 5.8 φαίνεται το δοκίμιο που είναι τοποθετημένο πάνω στη μηχανή δοκιμών πριν αρχίσει το πείραμα. Στο σχήμα 5.7 διακρίνεται η άνω όψη του δοκιμίου, ενώ στο σχήμα 5.8 διακρίνεται η κάτω όψη. Στο δοκίμιο πάνω, πέρα από τους αισθητήρες διακρίνονται και οι χαραγές που έγιναν από το χαρακτηριστικό μηχάνημα για την ακριβή τοποθέτηση των αισθητήρων.

Άνω όψη

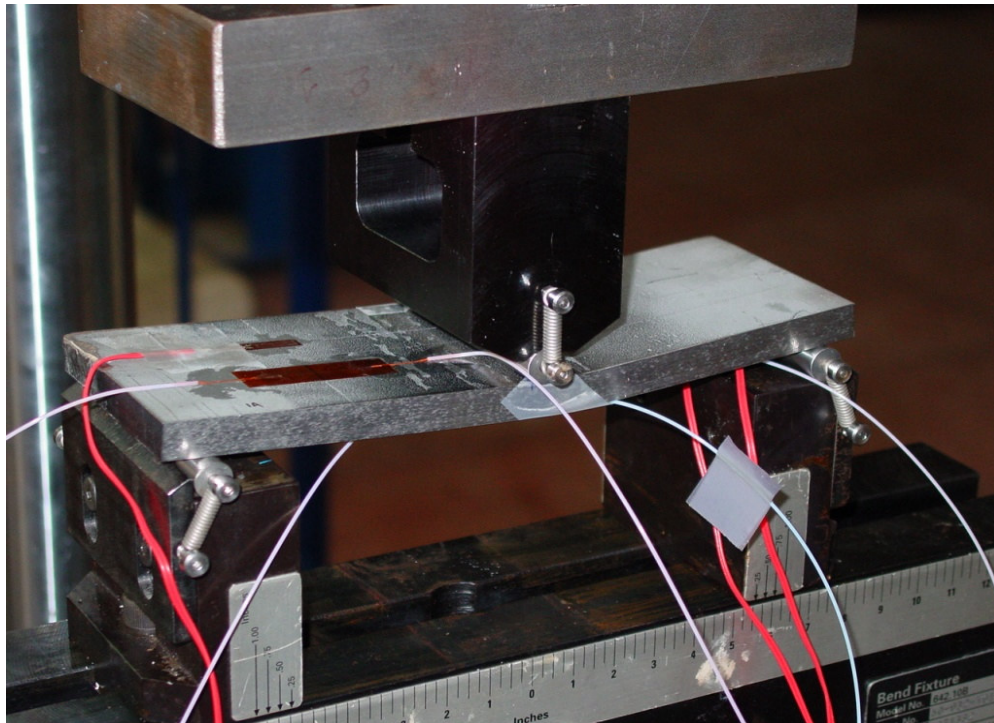


σχήμα 5.7

Κάτω όψη

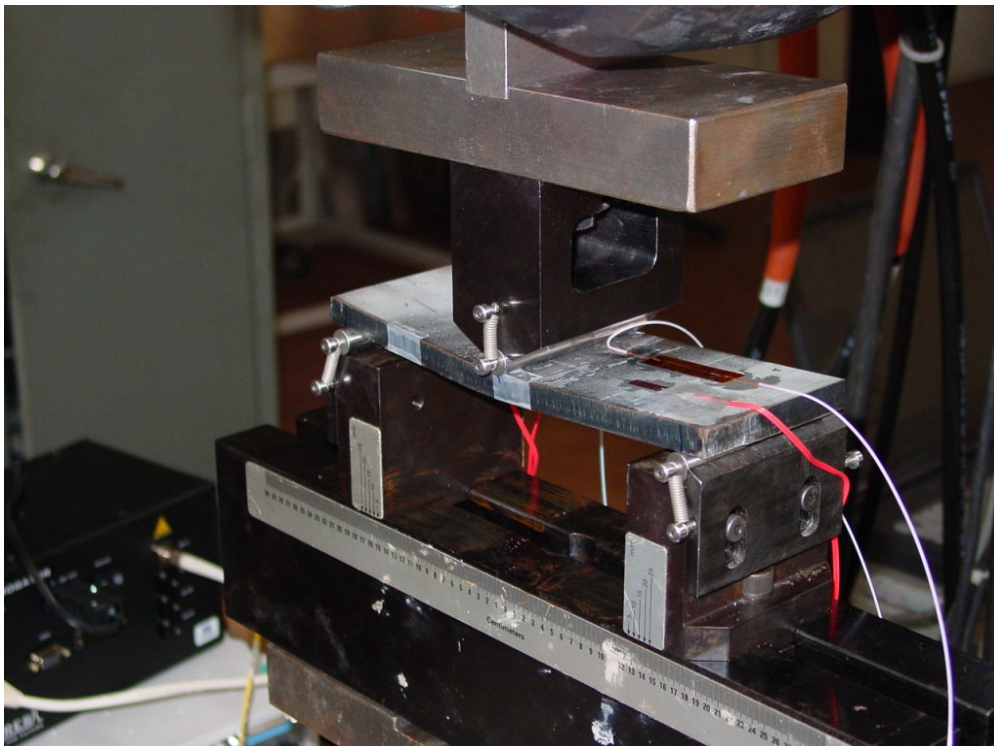


σχήμα 5.8

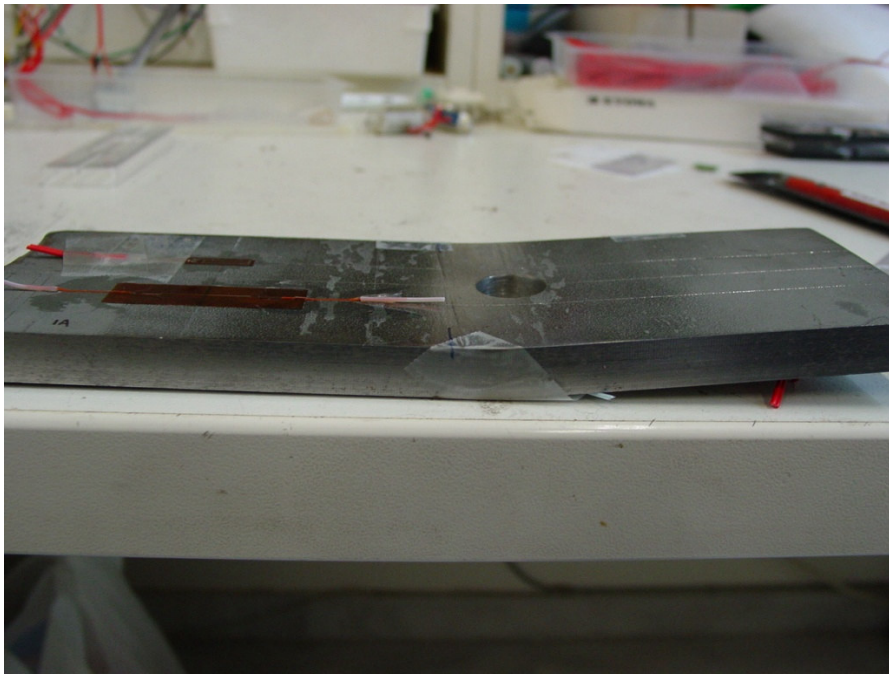


σχήμα 5.9 (Άνω Όψη)

Στα σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζεται το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το πείραμα όπως αναφέρθηκε πραγματοποιείται με σταθερή μετατόπιση της μηχανής δοκιμών. Στη φωτογραφία γίνεται επίσης πιο κατανοητό, για ποιό λόγο δεν ήταν δυνατή η τοποθέτηση του αισθητήρα στην οπή στην άνω επιφάνεια.

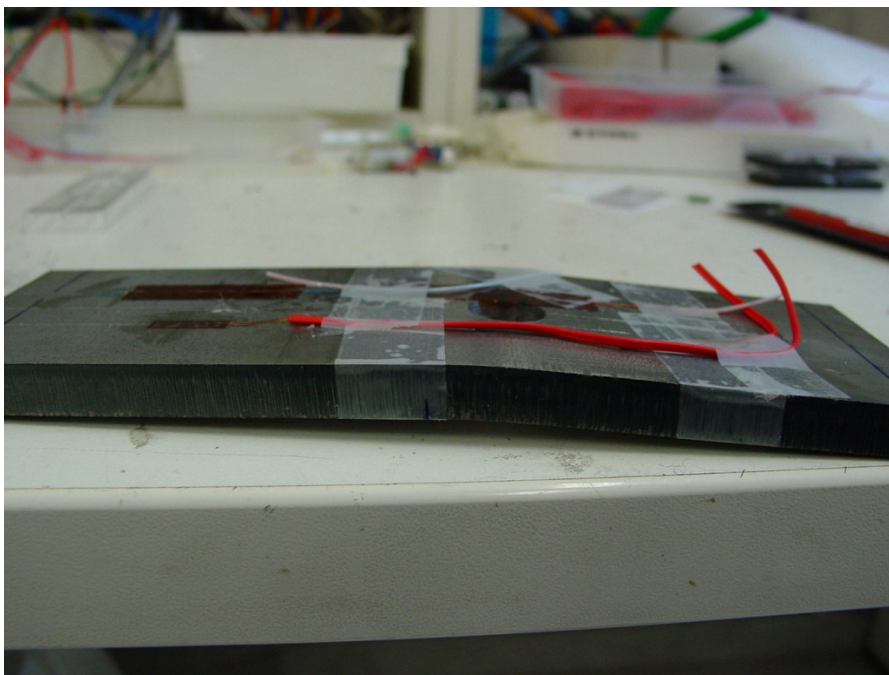


σχήμα 5.10 (Άνω Όψη)



σχήμα 5.11 (Άνω Όψη)

Στα σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται η κατάσταση του δοκιμίου μετά την εκτέλεση του πειράματος. Είναι εμφανές ότι το δοκίμιο παρουσιάζει μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις. Με οπτική εξέταση διακρίνουμε ότι στους αισθητήρες δεν συνέβη καμία αστοχία κατά τη διάρκεια του πειράματος (π.χ. αποκόλληση, θραύση του αισθητήρα κτ.λ.).

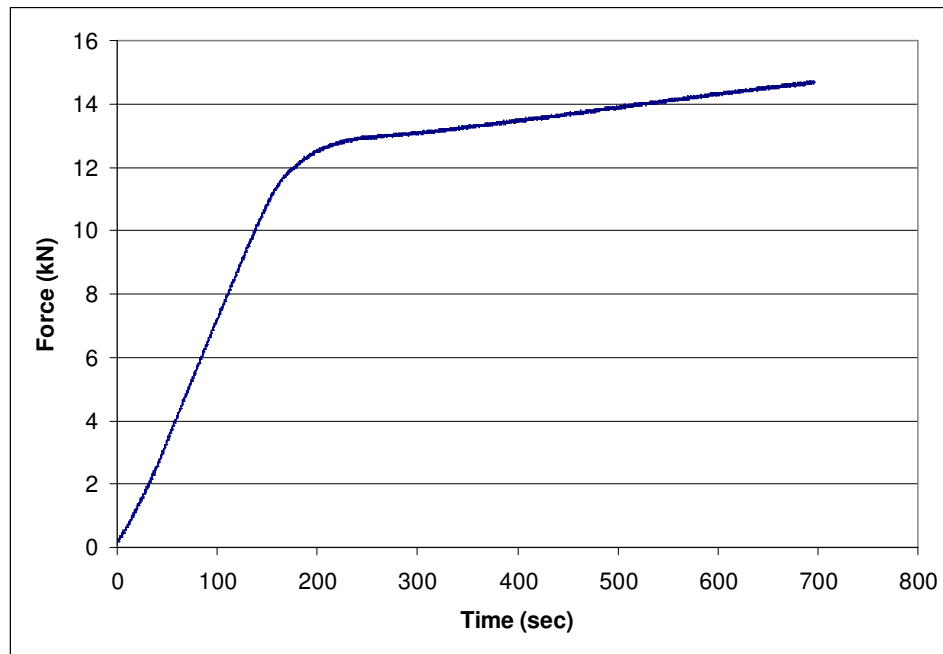


σχήμα 5.12 (Κάτω Όψη)

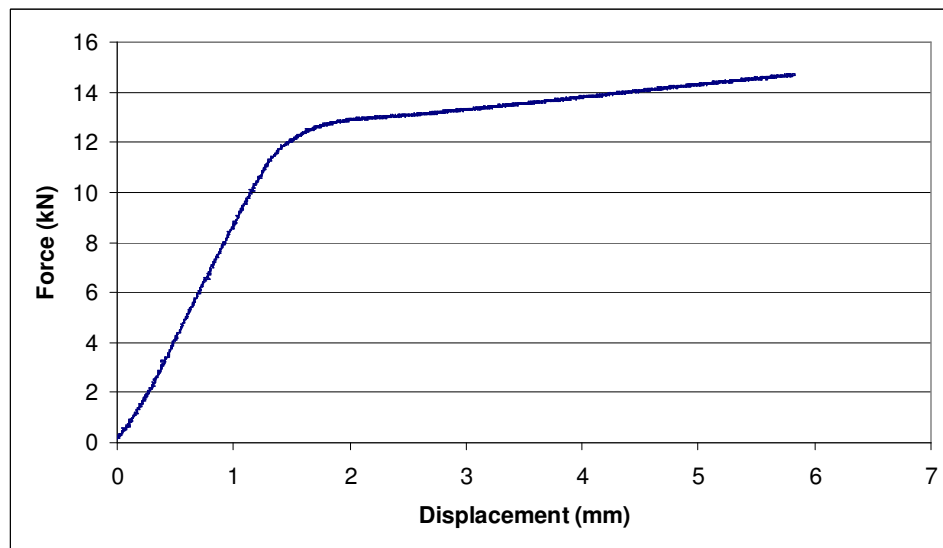
5.4

Ανάλυση πειραματικών δεδομένων (data analysis)

Γραφικές παραστάσεις F-t και F-δ της μηχανής δοκιμών



σχήμα 5.13

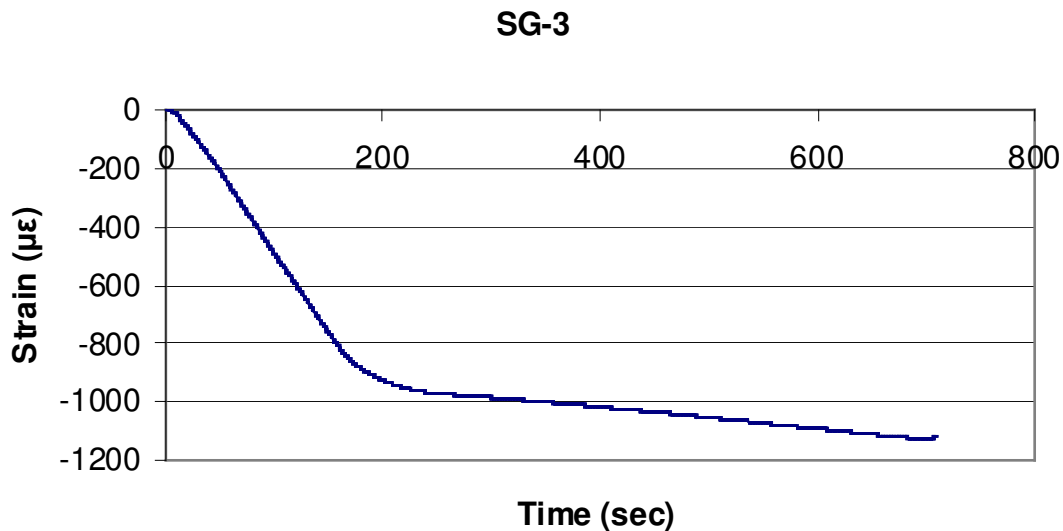


σχήμα 5.14

Στα σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της δύναμης ως συνάρτησης του χρόνου και τις μετατόπισης αντιστοίχως. Η δύναμη “F”, είναι η δύναμη που ασκεί η μηχανή δοκιμών στο δοκίμιο, και η μετατόπιση “δ”, είναι η μετατόπιση του κατακόρυφου στελέχους της μηχανής δοκιμών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.9. Οι γραφικές παραστάσεις είναι αντιπροσωπευτικές μεταλλικών δοκιμών σε απλή κάμψη, όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου στο σχήμα 5.2. Η δύναμη αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με τη μετατόπιση, μέχρι το δοκίμιο να εισέλθει στην πλαστική περιοχή (περίπου στα 11.5 kN φόρτισης) και ακολούθως χάνεται η γραμμικότητα και οι παραμορφώσεις αυξάνονται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό. Η ίδια ερμηνεία ισχύει και για το διάγραμμα δύναμης ως συνάρτησης του χρόνου, αφού η μετατόπιση αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, όπως έχει ήδη εξηγηθεί στο σχήμα 5.5.

Παρουσίαση δεδομένων από τα ηλεκτρομηκυστόμετρα (Strain Gauges)

1.

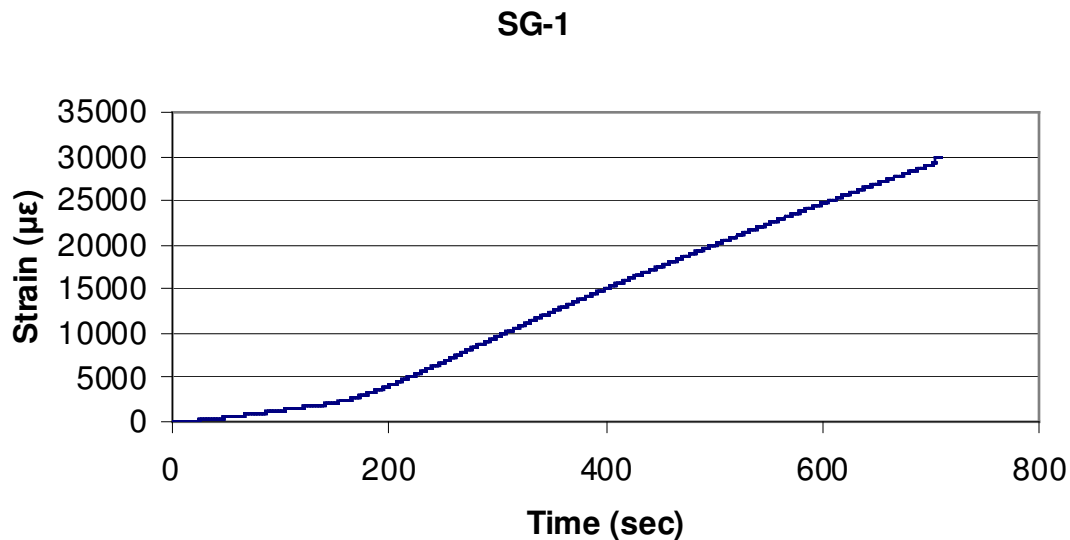


σχήμα 5.15

Το παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 5.15) αναπαριστά τις παραμορφώσεις ως συνάρτηση του χρόνου που αναπτύχθηκαν στον αισθητήρα στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου (βλ. σχήμα 5.7) κατά το πείραμα της κάμψης. Τα αποτελέσματα αφορούν τα ηλεκτρομηκυστόμετρα (strain gauges). Όπως παρατηρείται, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται είναι αρνητικές διότι η άνω επιφάνεια στο πείραμα της απλής κάμψης δέχεται θλιπτικές φορτίσεις. Οι παραμορφώσεις βρίσκονται στην ελαστική περιοχή, καθώς ο αισθητήρας είναι απομακρυσμένος από τη μέση του δοκιμίου όπου εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές στις παραμορφώσεις. Παρατηρείται, επίσης, ότι μέχρι και τα 200 περίπου sec εμφανίζεται γραμμική αύξηση των παραμορφώσεων, ενώ αμέσως

μετά ο ρυθμός αύξησης μειώνεται δραματικά, διότι προφανώς κάποια άλλη περιοχή του δοκιμίου μπαίνει στην πλαστική περιοχή. Αυτό εξηγείται καλύτερα και στο επόμενο σχήμα, αφού έχει ήδη συμβεί πλαστική παραμόρφωση στη μέση του δοκιμίου όπου βρίσκεται η οπή.

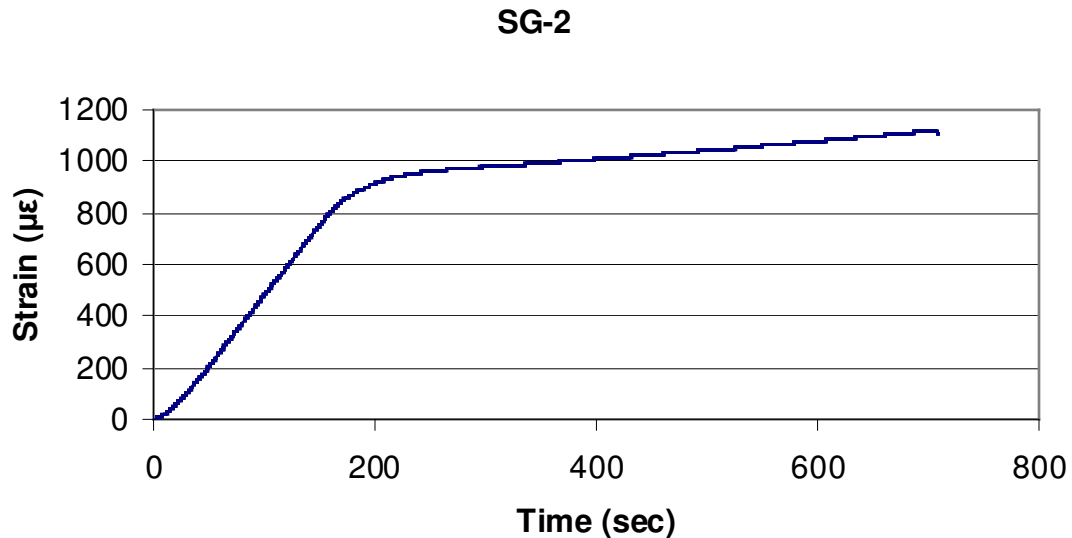
2.



σχήμα 5.16

Σε αυτό το διάγραμμα (σχήμα 5.16) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον αισθητήρα στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και κοντά στην οπή (βλ σχήμα 5.2). Οι παραμορφώσεις σε αυτή την περίπτωση είναι φυσικά θετικές διότι στην κάτω όψη υπάρχουν εφελκυστικές τάσεις. Αυτός ο αισθητήρας παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις γιατί, όπως υπολογίστηκε και θεωρητικά, οι τάσεις κοντά στην οπή υπερβαίνουν την τάση διαρροής, οπότε εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις στο δοκίμιο. Παρατηρείται λοιπόν ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται γραμμικά μέχρι περίπου τα 170 sec οπότε έχουν πλησιάσει στο όριο των 2000 με που είναι και το όριο της ελαστικής περιοχής για το χάλυβα. Από εκεί και πέρα το δοκίμιο παραμορφώνεται, οι παραμορφώσεις αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό και το δοκίμιο παίρνει τη μορφή που έχει στα σχήματα 5.11 και 5.12 .

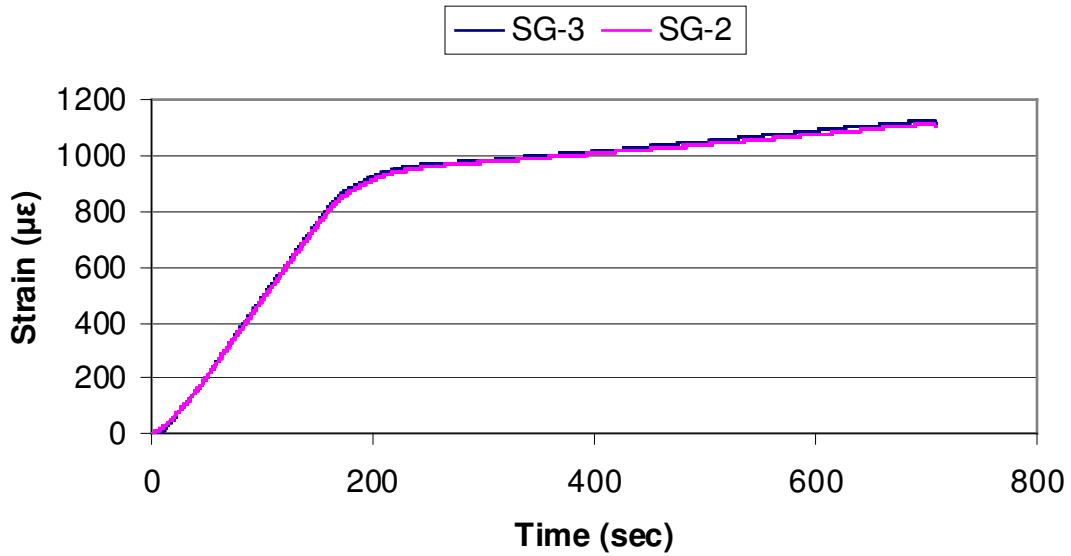
3.



σχήμα 5.17

Τα αποτελέσματα του τελευταίου αισθητήρα που βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια (SG-2) και μακριά από την οπή, δηλαδή ακριβώς κάτω από τον αισθητήρα στην άνω όψη (βλ. σχήμα 5.8), παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα. Οι παραμορφώσεις και πάλι είναι θετικές και επίσης το διάγραμμα είναι συμμετρικό με εκείνο που αφορά τον αισθητήρα στην πάνω επιφάνεια. Για να γίνει καλύτερα η σύγκριση, θα μετατρέψουμε τις τιμές του αισθητήρα στην άνω όψη σε θετικές και θα τις προβάλλουμε σε διάγραμμα μαζί με τις τιμές του αισθητήρα στην κάτω επιφάνεια, οπότε έχουμε το σχήμα 5.18. Φαίνεται, λοιπόν, ότι υπάρχει ταύτιση των τιμών και επομένως έχουμε το φαινόμενο της καθαρής κάμψης, άρα οι δυο αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί σωστά και βρίσκονται στο ίδιο σημείο στην άνω και κάτω επιφάνεια αντιστοίχως.

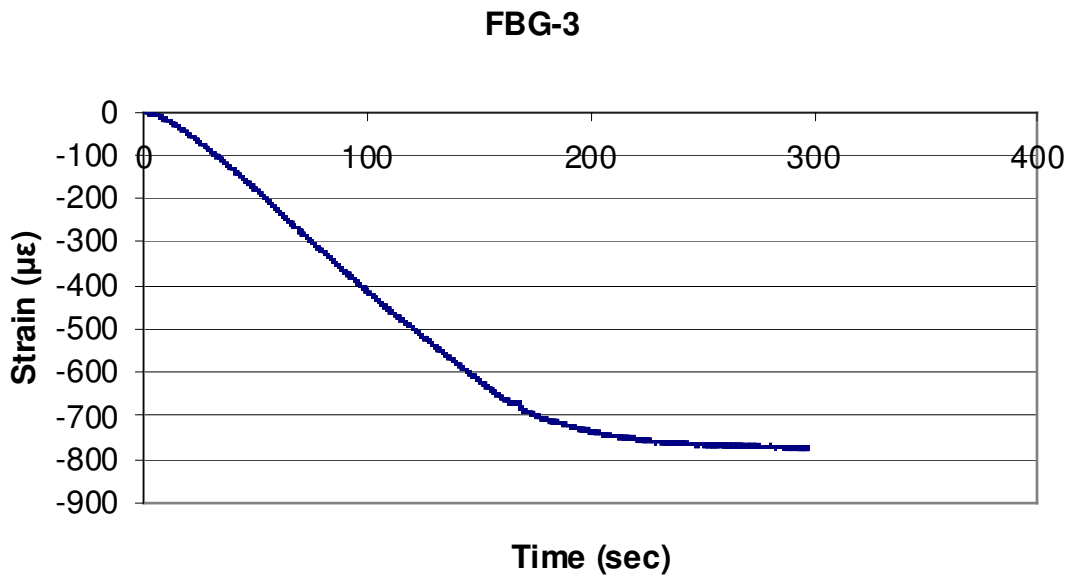
3β.



σχήμα 5.18

Παρουσίαση δεδομένων από τους αισθητήρες οπτικών ινών (FBGs)

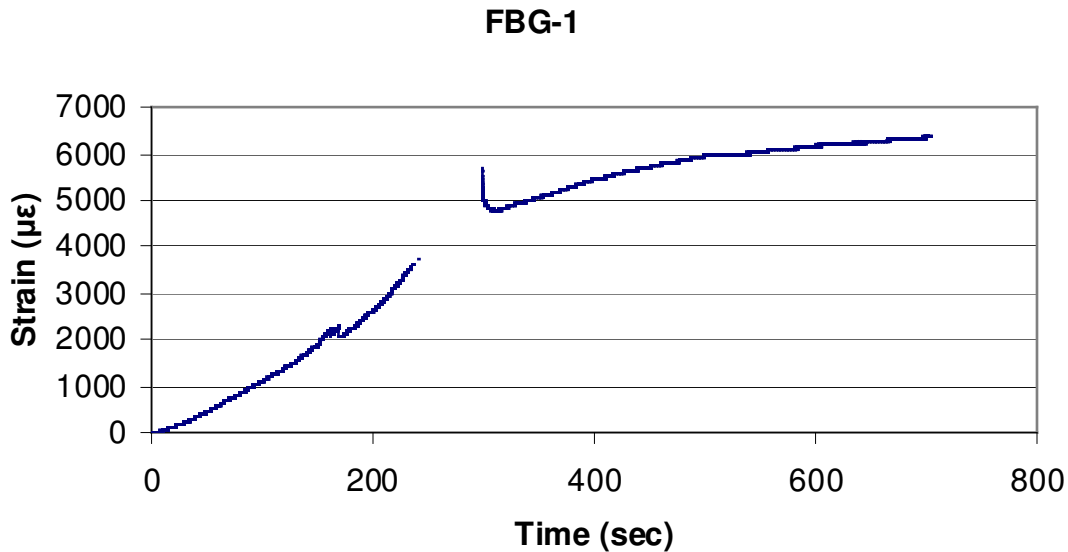
1.



σχήμα 5.19

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.19 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις σε συνάρτηση με το χρόνο, για τον αισθητήρα οπτικών ινών (Fibre Bragg Grating) που είναι τοποθετημένος στην άνω επιφάνεια (βλ σχήμα 5.7). Η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με εκείνη του σχήματος 5.15. Δηλαδή οι παραμορφώσεις είναι αρνητικές επειδή υπάρχει θλιπτική φόρτιση (άνω όψη), βρίσκονται στην ελαστική περιοχή και επίσης διακρίνεται η γραμμική περιοχή και το σημείο καμπής, όπου αλλάζει η κλίση της καμπύλης και οι παραμορφώσεις αυξάνονται με μικρότερη ταχύτητα.

2.



σχήμα 5.20

Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα της παραμόρφωσης ως συνάρτηση του χρόνου για τον αισθητήρα οπτικών ινών (FBG) που βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια και κοντά στην οπή. Το διάγραμμα έχει αρκετές ομοιότητες αλλά και πολλές διαφορές με το διάγραμμα του σχήματος 5.16. Ο αισθητήρας φαίνεται πως λειτουργεί κανονικά μέχρι και τα 160 sec περίπου και διακρίνεται η γραμμική αύξηση των παραμορφώσεων σε σχέση με το χρόνο.

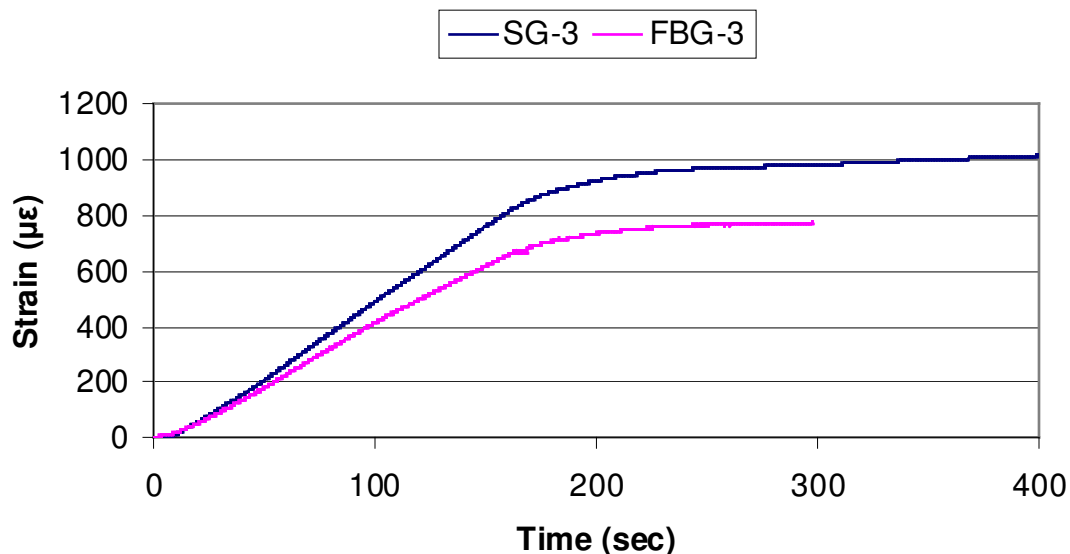
Από τη στιγμή που οι παραμορφώσεις ξεπεράσουν τα 2000 με, ο αισθητήρας σταματάει να λαμβάνει κανονικά τιμές. Ενώ οι παραμορφώσεις συνεχίζουν να αυξάνονται, αλλάζει η κλίση της καμπύλης και εμφανίζονται και δυο κορυφές, γεγονός που δηλώνει ότι ο αισθητήρας έχει σταματήσει πλέον να λειτουργεί κανονικά. Οι δυο αυτές κορυφές οφείλονται στο γεγονός ότι μικροσκοπικά η οπτική ίνα έχει αρχίσει και θραυτείται, αλλά τα εναπομείναντα τμήματά της δεν καταστρέφονται πλήρως και συνεχίζουν να λαμβάνουν τιμές. Κάθε φορά που σπάει ένα μέρος της ίνας δημιουργείται η αρνητική κλίση έως ότου να ξαναρχίσει να λαμβάνει τιμές και να αποκατασταθεί η δυσλειτουργία. Μετά την εμφάνιση των δυο κορυφών ο αισθητήρας φαίνεται και πάλι ότι λειτουργεί

ομαλά, μέχρι να σταματήσει εντελώς για κάποιο χρονικό διάστημα να λαμβάνει τιμές και, τέλος, να έχουμε τη μορφή της καμπύλης που διακρίνεται στο σχήμα. Δεν παρατηρείται ούτε σημείο καμπής ούτε αλλαγή της κλίσης της καμπύλης, όπως υπήρχε στο σχήμα 5.16. Είναι προφανές ότι μετά τα 2000 με οι τιμές του αισθητήρα δεν είναι αξιόπιστες και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων ή για την περαιτέρω επεξεργασία και σύγκρισή τους με άλλα δεδομένα. Η συμπεριφορά αυτή του αισθητήρα οφείλεται στις προδιαγραφές του, καθώς οι πιο πολλοί τύποι αισθητήρων οπτικών ινών που υπάρχουν στο εμπόριο δεν μπορούν να μετρήσουν παραπάνω από 2000 με, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και στο συγκεκριμένο πείραμα.

Συγκριτικά διαγράμματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται και ο κύριος λόγος πραγματοποίησης των πειραμάτων, που είναι δηλαδή η σύγκριση των ηλεκτρομηκυσιόμετρων (strain gauges) με τους αισθητήρες οπτικών ινών (Fibre Bragg Gratings), για να διαπιστωθεί κατά πόσο λειτουργούν σωστά και ποιες είναι οι διαφορές τους. Λαμβάνεται, βέβαια, ως δεδομένο ότι τα strain gauges δίνουν αποτελέσματα τα οποία είναι απολύτως αξιόπιστα, καθώς χρησιμοποιούνται επιτυχώς εδώ και δεκαετίες σε όλες τις επιστημονικές εφαρμογές. Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται η σύγκριση στην κάθε θέση, των αποτελεσμάτων των δυο διαφορετικών αισθητήρων.

1.

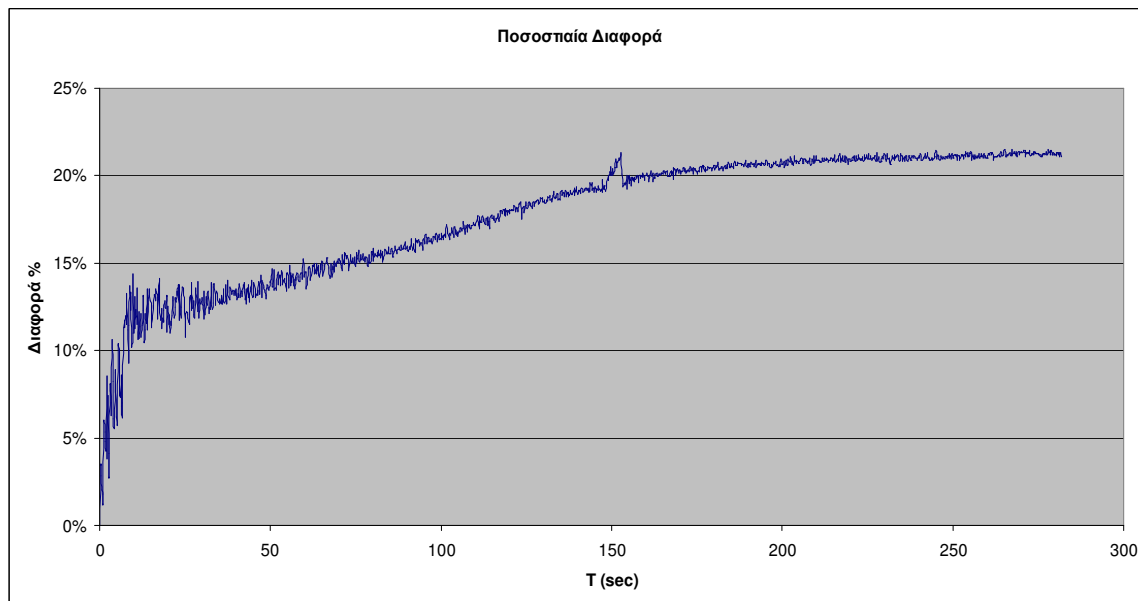


σχήμα 5.21

Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζεται το διάγραμμα παραμορφώσεων – χρόνου που απεικονίζει τον αισθητήρα οπτικών ινών, καθώς και τον αισθητήρα strain gauge, οι οποίοι βρίσκονται και οι δύο στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου στην ίδια θέση. Παρατηρείται εξ'αρχής ότι οι δύο καμπύλες δεν ταυτίζονται, αλλά υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους, πράγμα που δηλώνει ότι οι δυο αισθητήρες δεν λάμβαναν τις ίδιες ενδείξεις. Για ευκολότερη κατανόηση των αποτελεσμάτων οι δυο καμπύλες απεικονίζονται με θετικές τιμές. Η μορφή των καμπυλών έχει εξηγηθεί στα προηγούμενα σχήματα 5.15 και 5.19. Οι διαφορές στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι οι εξής:

- Η καμπύλη του αισθητήρα FBG βρίσκεται κάτω από εκείνη του strain gauge
- Η κλίση της καμπύλης FBG είναι μικρότερη από εκείνης του strain gauge
- Οι απόλυτες τιμές των παραμορφώσεων της καμπύλης FBG είναι μικρότερες από εκείνης της καμπύλης strain gauge έως και 210 με και το ποσοστό της διαφοράς ως προς τη μέγιστη παραμόρφωση φτάνει το 21% .

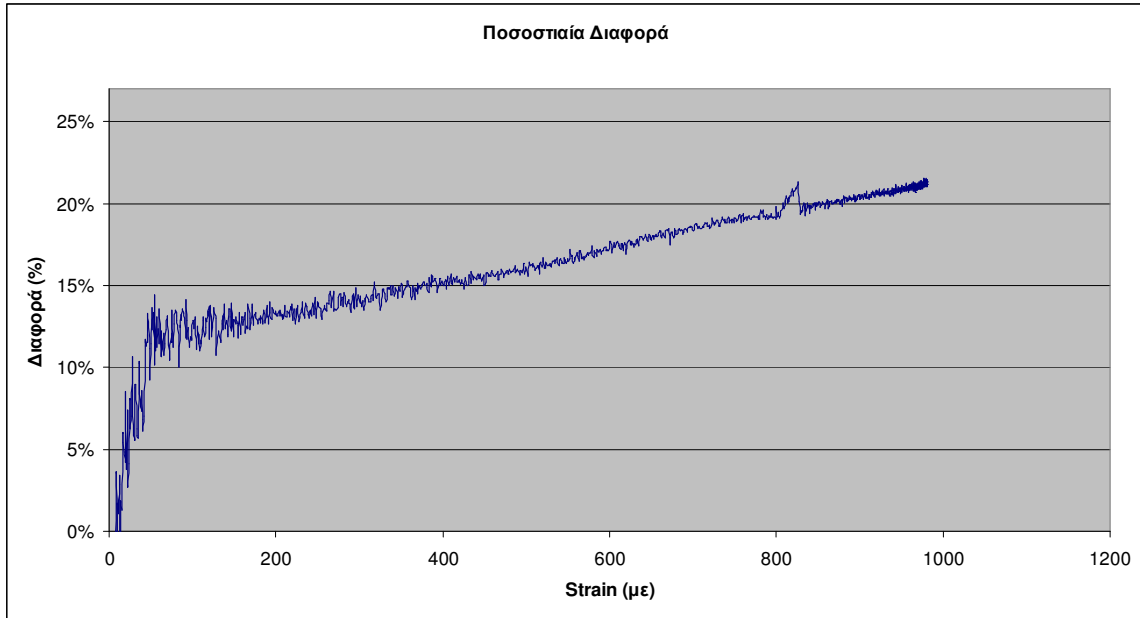
Παρατηρώντας το διάγραμμα και τις διαφορές που μόλις διατυπώθηκαν βγαίνει το συμπέρασμα ότι για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή ο αισθητήρας οπτικών ινών δίνει μικρότερη τιμή από εκείνη του ηλεκτρομηκυνσιόμετρου. Άρα, με δεδομένο ότι οι τιμές από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα είναι πιο κοντά στις πραγματικές, ο αισθητήρας οπτικών ινών δίνει λανθασμένες τιμές, υποτιμάει τις πραγματικές τιμές τάσεων και έχει ένα εσφαλμένο περιθώριο που φτάνει έως τα 210 με. Η ποσοστιαία διαφορά ως προς τη μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο σχήμα 5.22. Η ανάλυση των διαφορών και σε άλλες θέσεις του δοκιμίου θα δείξει, εαν πρόκειται για μη αξιόπιστο τρόπο μέτρησης των παραμορφώσεων.



σχήμα 5.22

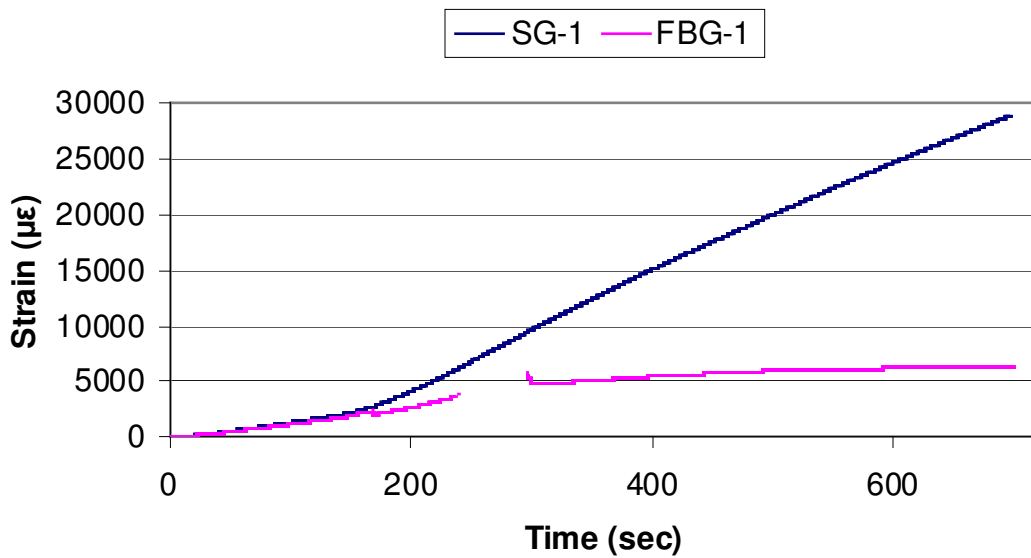
Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 5.22 η ποσοστιαία διαφορά ως προς τη μέγιστη τιμή, φτάνει έως 21%. Στο σχήμα 5.23, παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά ως συνάρτηση

της μέγιστης παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι, για μικρές τιμές των παραμορφώσεων η διαφορά είναι μικρή (περίπου 10%). Από τα 120 με και μετά αρχίζουν οι διαφορές να γίνονται αρκετά μεγαλύτερες.



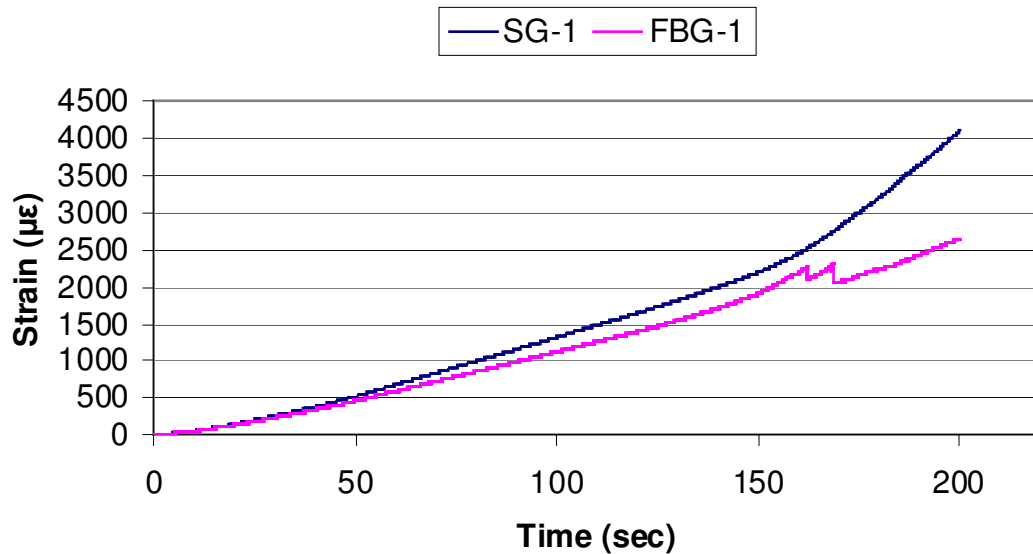
σχήμα 5.23

2α.



σχήμα 5.24

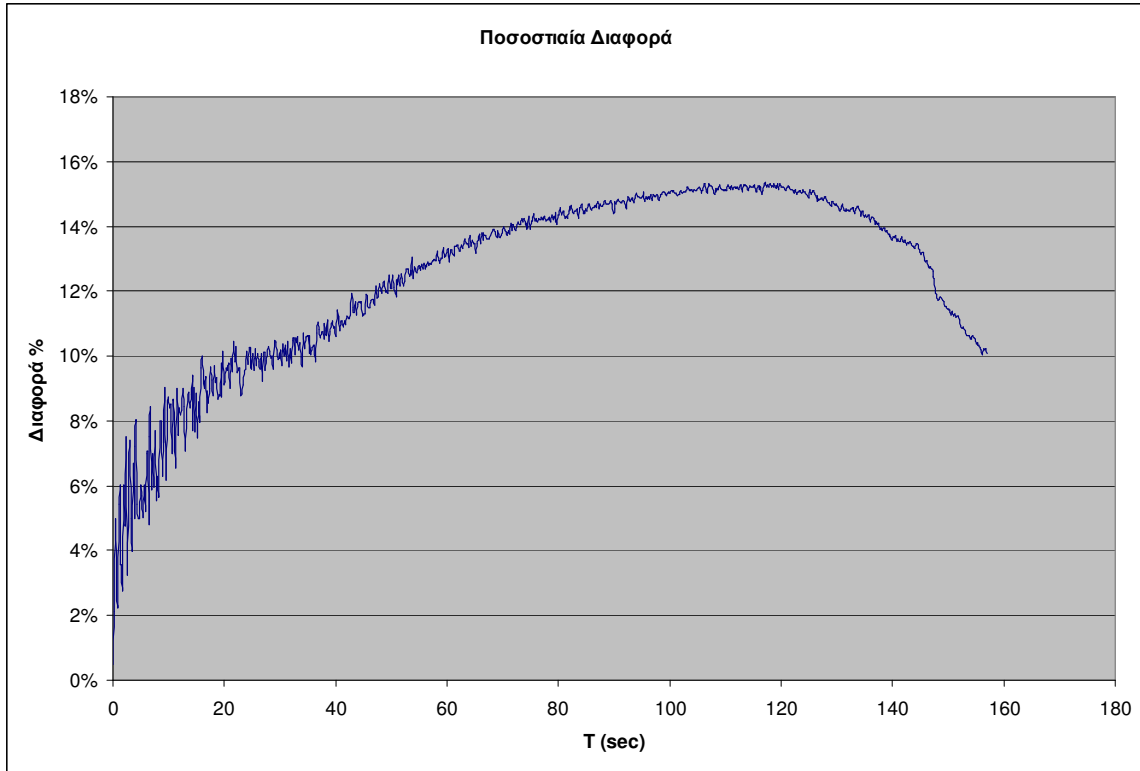
2β.



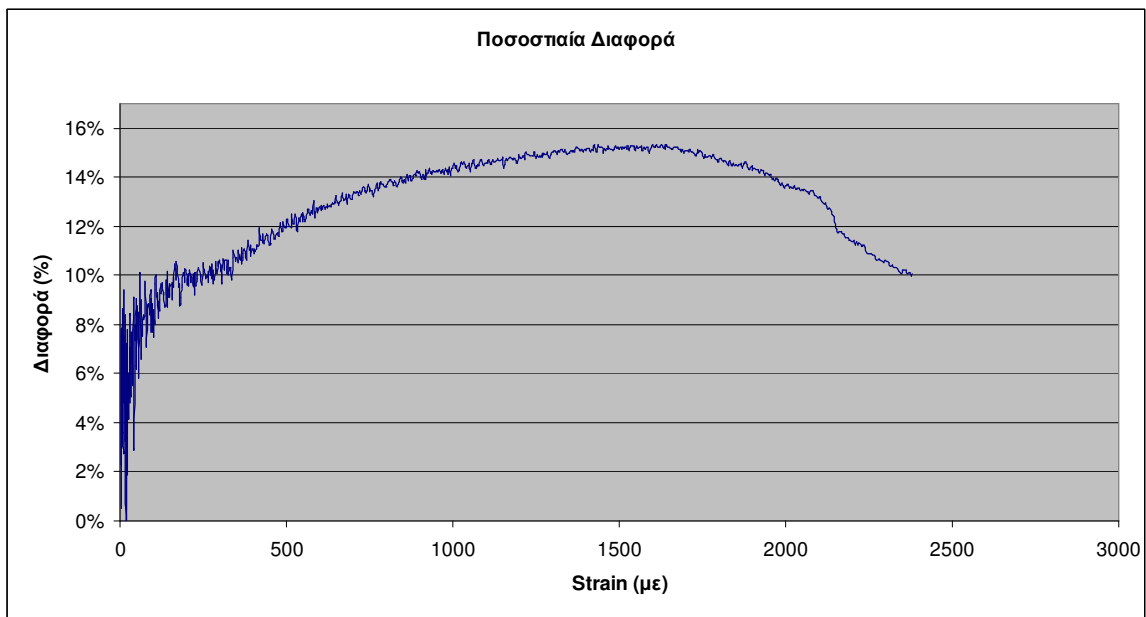
σχήμα 5.25

Στα σχήματα 5.24 και 5.25 συγκρίνονται οι τιμές από τον αισθητήρα οπτικών ινών και το ηλεκτρομηκυνσιόμετρο, που βρίσκονται κοντά στην οπή του δοκιμίου. Το σχήμα 5.24 μας δίνει την εικόνα από τις τιμές σε όλη τη χρονική διάρκεια του πειράματος, ενώ το σχήμα 5.25 επικεντρώνεται στις τιμές των παραμορφώσεων που δεν υπερβαίνουν τα 2000 με, που όπως προαναφέρθηκε είναι και το όριο λειτουργίας των οπτικών αισθητήρων. Παρατηρείται λοιπόν στο σχήμα 5.24, όπως και στο σχήμα 5.20, ότι οι τιμές μετά τα 2000 με δεν έχουν καμία σχέση με την πραγματική κατάσταση φόρτισης (όπως φαίνεται σε σύγκριση με το strain gauge) και δεν πρέπει να λαμβάνονται καθόλου υπόψη. Άρα, στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί οπτικός αισθητήρας και οι τιμές θα είναι στην πλαστική περιοχή δεν θα πρέπει να ληφθούν καθόλου υπόψη. Το γεγονός αυτό βέβαια δεν περιορίζει ιδιαίτερα το πεδίο χρήσης των οπτικών αισθητήρων, αφού στις πιο πολλές εφαρμογές τα υλικά εργάζονται στην ελαστική περιοχή.

Παρατηρώντας το σχήμα 5.25 διαπιστώνεται πως και στη θέση κοντά στην οπή οι τιμές των δυο αισθητήρων δεν ταυτίζονται. Παρουσιάζονται και σε αυτή τη θέση (οπή) οι διαφορές που είχαν επισημανθεί στο σχήμα 5.21. Δηλαδή, η καμπύλη του FBG βρίσκεται κάτω από εκείνη του strain gauge, η κλίση της είναι μικρότερη από του strain gauge και οι τιμές των παραμορφώσεων είναι έως και 290 με περίπου μικρότερες από τις πραγματικές (strain gauge). Η ποσοστιαία διαφορά ως προς τη μεγαλύτερη τιμή (strain gauge), φτάνει σε αυτή την περίπτωση 15% (βλ. σχήμα 5.26).



σχήμα 5.26



σχήμα 5.27

Στο σχήμα 5.27 έχουμε τη γραφική παράσταση της ποσοστιαίας διαφοράς των παραμορφώσεων, ως προς την παραμόρφωση από τα strain gauge. Το σχήμα αυτό

χρησιμοποιείται παράλληλα με το σχήμα 5.26, απλά εδώ φαίνεται η σχέση με την παραμόρφωση αντί με το χρόνο. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι διαφορές ανάμεσα στους δύο αισθητήρες (FBG και strain gauge) αρχίζει να γίνεται μεγάλη από τα 150 με και πάνω. Άρα, για μικρές τιμές παραμορφώσεων η απόκλιση του οπτικού αισθητήρα είναι πολύ μικρή.

5.5

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε περιγραφή του πειράματος κάμψης. Στο δοκίμιο με την οπή τοποθετήθηκαν στις ίδιες θέσεις ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (strain gauges), καθώς και αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Bragg Gratings), και έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα των δυο αισθητήρων. Από τα σχήματα 5.22 και 5.26, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι τιμές από τους αισθητήρες οπτικών ινών, είναι μικρότερες από τις πραγματικές τιμές από 15% έως και 21%. Η υποτίμηση των πραγματικών τιμών από τους οπτικούς αισθητήρες οφείλεται προφανώς στη μη αξιόπιστη λειτουργία τους. Διότι δεν διαπιστώθηκε κάποιο λάθος που να οφειλόταν σε λανθασμένη τοποθέτηση, αφού σε διαφορετικές θέσεις οι διαφορές παρέμεναν οι ίδιες. Άρα οφείλεται σε ένα μόνιμο χαρακτηριστικό τους. Αυτή η συμπεριφορά όμως δεν τους κάνει ανταγωνιστικούς σε σχέση με τους κλασικούς αισθητήρες. Πόσο μάλλον όταν το κόστος των οπτικών αισθητήρων είναι μεγαλύτερο, η διαδικασία τοποθέτησής τους και λήψης των δεδομένων πολύ πιο πολύπλοκη και η όλη διάταξη είναι πολύ πιο ευαίσθητη σε επιδράσεις από το εξωτερικό περιβάλλον.

6. Πείραμα Κόπωσης

6.1

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το πείραμα της κόπωσης. Το δοκίμιο του πειράματος υπόκειται σε δυναμική φόρτιση, έτσι ώστε να εξεταστεί και σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία των αισθητήρων. Το δοκίμιο με την τεχνητή ρωγμή (εγκοπή) στο μέσον του υποβάλλεται σε εναλλασσόμενο εφελκυσμό και θλίψη, έως ότου οδηγηθεί σε θραύση. Στο συγκεκριμένο πείραμα, εκτός από τους αισθητήρες οπτικών ινών (FBG), χρησιμοποιήθηκαν οπτικές ίνες χωρίς αισθητήρες, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να γίνει δυνατή η ανίχνευση της διάδοσης της ρωγμής μέσω των διαδοχικών θραύσεων των οπτικών ινών.

6.2

Κόπωση

Κόπωση (fatigue) καλείται το φαινόμενο της αστοχίας ενός υλικού που προκαλείται από επαναλαμβανόμενη επιβολή τάσεων ή παραμορφώσεων σε αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Παρά το ότι στην πράξη οι τάσεις ή παραμορφώσεις μπορεί να μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου με τυχαίο τρόπο, στη θεωρητική προσέγγιση υποθέτουμε ότι η μεταβολή είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(2\pi t/T)$$

όπου

σ είναι η τιμή της τάσεως σε χρονική στιγμή t , σ_m η σταθερή συνιστώσα της τάσης, η οποία καλείται μέση τάση, σ_a το πλάτος της χρονικά μεταβαλλόμενης συνιστώσας της τάσεως που καλείται εναλλασσόμενη τάση και T η περίοδος της εναλλαγής.

Όταν ένα υλικό υπόκειται σε εναλλασσόμενη φόρτιση είναι δυνατή η δημιουργία θραύσης μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών. Όσο μικρότερη είναι η επιβαλλόμενη τάση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εναλλαγών πριν σημειωθεί η θραύση.

Ενδιαφέρουν δύο κύριως μηχανισμοί θραύσης από κόπωση :

- Κόπωση υψηλής συχνότητας – χαμηλής τάσης
- Κόπωση χαμηλής συχνότητας – υψηλής τάσης

Στάδια θραύσης από κόπωση

- Έναρξη της ρωγμής
- Διάδοση της ρωγμής
- Ασταθής θραύση

Στο πρώτο στάδιο συμβαίνει η έναρξη της ρωγμής στην επιφάνεια. Ακολούθως, η ρωγμή μεγαλώνει με κάθε εναλλαγή του φορτίου και διαδίδεται σε κατεύθυνση κάθετη προς τη μέγιστη εφελκυστική τάση. Τέλος, καθώς η ρωγμή διαδίδεται, η τάση στην εναπομένονσα εγκάρσια τομή αυξάνει, οπότε επέρχεται ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού διάδοσης. Τελικά συμβαίνει θραύση είτε με ψαθυρό είτε με όλκιμο τρόπο.

Το φαινόμενο της αστοχίας ενός υλικού από κόπωση συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη τοπικών ανωμαλιών, δηλαδή συγκεντρώσεων τάσεων. Οι χαρακτηριστικότεροι εκπρόσωποι των ανωμαλιών αυτών είναι οι ρωγμές. Επομένως, η μελέτη της επίδρασης των ρωγμών στο φαινόμενο της κοπώσης έχει εξαιρετική σημασία. Η μελέτη αυτή γίνεται με την τεχνητή δημιουργία μιας μακροσκοπικής ρωγμής ή εγκοπής στο δοκίμιο. Με αυτό τον τρόπο η τεχνητή ρωγμή γίνεται η κυρίαρχη ανωμαλία στο δοκίμιο και ρυθμίζει τη συμπεριφορά του.

Για την εκτίμηση της επίδρασης μιας εγκοπής στην αντοχή σε κόπωση ενός υλικού, χρησιμοποιείται το μέγεθος “συντελεστής αναγωγής εξ εγκοπών”, K_f , που ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε κόπωση ενός δοκιμίου χωρίς εγκοπή, προς την αντίστοιχη αντοχή του όταν έχει εγκοπή, με την προϋπόθεση ότι οι δύο δοκιμές έγιναν με την ίδια μέση τάση και κύκλους εναλλαγών. Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδος εφόσον υποτίθεται ότι η ύπαρξη εγκοπής οδηγεί σε εξασθένηση του δοκιμίου.

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν ελαττώματα (ανομοιογένειες, εγκλείσματα, σφάλματα κατασκευής κ.λ.π.) και οποιοδήποτε εξάρτημα συσκευής, μπορεί να παρουσιάζει αλλαγές διατομής ή επιφάνειες κατά το μάλλον ή ήττον τέλειες. Οι συνθήκες αυτές ευνοούν την εμφάνιση ανομοιογενούς κατανομής της καταπόνησης και κατά συνέπεια τη δημιουργία και στη συνέχεια τη διάδοση ρωγματώσεων εξαιτίας του φαινομένου της κόπωσης.

Όταν μια ρωγμή σχηματισθεί, το μήκος της a αυξάνεται με τη ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής και μεγαλώνει συνεχώς μέχρι την τελική θραύση του εξαρτήματος ή του πειραματικού δοκιμίου.

Η ταχύτητα διάδοσης προσδιορίζεται από την παράγωγο da/dN , όπου a το μήκος της ρωγμής και N ο αριθμός των επιβαλλόμενων κύκλων [9].

Στην περίπτωση που έχουμε προ-ρωγματωμένο δοκίμιο, η μελέτη της θραύσης του δοκιμίου βασίζεται στη θεωρία του Griffith και στη ψαθυρή θραύση.

Οι Paris και Erdogan πρότειναν ένα τρόπο παρακολούθησης της διάδοσης μιας ρωγμής με τη μέτρηση της ταχύτητάς της. Με βάση την υπόθεση ότι υπάρχει μια σχέση που συνδέει την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής και του συντελεστή έντασης τάσης K προτάθηκε η σχέση του Paris:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n,$$

όπου C παράμετρος χαρακτηριστική του υλικού
n λαμβάνει τιμές μεταξύ 2 και 4

Στην απλή περίπτωση που το εύρος τάσης σ παραμένει σταθερό, αύξηση του μήκους a της ρωγμής επιφέρει αύξηση της τιμής του K . Επειδή, όμως, η καταπόνηση μεταβάλλεται, είναι δυνατό να προσδιορισθεί η μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσης K :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

Η πειραματική ανάπτυξη των σχέσεων μεταξύ της ταχύτητας και του εύρους του συντελεστή έντασης τάσης γίνεται σε δύο στάδια :

1. Στο πρώτο στάδιο βρίσκεται η σχέση ανάμεσα στο μήκος ρωγμής και τις αντίστοιχες εναλλαγές φόρτισης.
2. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών da/dN και ΔK για διάφορα μήκη της ρωγμής [2].

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή κόπωσης είναι δύο ειδών :

- Μηχανές που επιβάλλουν στατικό εφεκυστικό ή θλιπτικό φορτίο και συγχρόνως ένα ημιτονοειδές φορτίο ελεγχόμενου πλάτους και σταθερής συχνότητας.
- Μηχανές που επιβάλλουν καταπόνηση καθαρής κάμψης σε στρεφόμενα κυλινδρικά δοκίμια.

Μια τυπική μηχανή του πρώτου είδους αποτελείται από δύο ομόκεντρα ελατήρια από τα οποία το πρώτο μεταβιβάζει στο δοκίμιο τη στατική τάση σ_m , ενώ το δεύτερο, διεγερόμενο με ένα σύστημα εκκέντρου, επιβάλλει την εναλλασσόμενη συνιστώσα σ_a με συχνότητα σταθερή και ίση προς την ιδιοσυχνότητα του δεύτερου αυτού ελατηρίου. Η μηχανή είναι εφοδιασμένη με ένα δαχτυλίοειδές δυναμόμετρο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η μέτρηση των τάσεων σ_m και σ_a , αφού βεβαίως είναι γνωστή η διατομή του δοκιμίου. Τέλος, ένας ψηφιακός μετρητής, ανάλογος με τα οδόμετρα των αυτοκινήτων, απαριθμεί το πλήθος των εναλλαγών της εναλλασσόμενης τάσης.

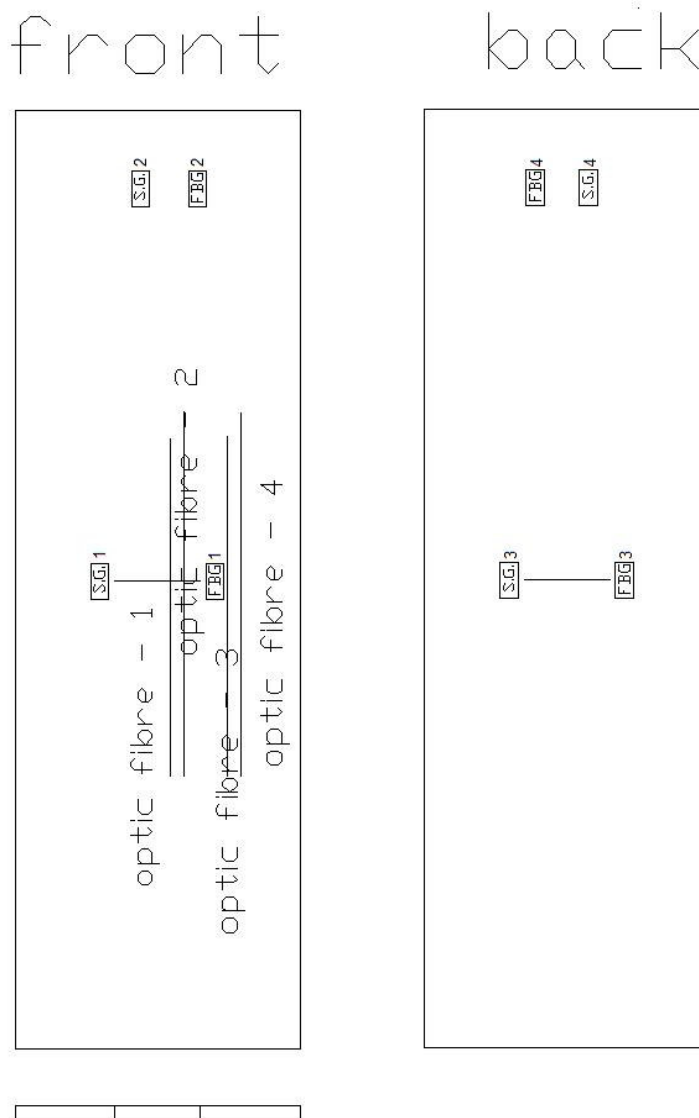
Η μηχανή καμπτικής κόπωσης επιβάλλει δύο ίσες τέμνουσες δυνάμεις στο δοκίμιο που στηρίζεται σε δύο αρθρώσεις, επιτυγχάνοντας έτσι συνθήκες καθαρής κάμψης. Το δοκίμιο μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και κάθε ίνα του στρεφόμενη κατά 180° βρίσκεται από τη θέση της περισσότερο εφελκυστικής στη θέση της περισσότερο θλιβόμενης ίνας, με αποτέλεσμα να υφίσταται εναλλασσόμενη κόπωση. Οι μηχανές καμπτικής κόπωσης είναι πολύ απλούστερες και ελαφρότερες από τις αντίστοιχες μηχανές εφεκυστικής – θλιπτικής κόπωσης και δεν παρουσιάζουν τα προβλήματα κραδασμών που είναι αναπόφευκτα στην ταλάντωση ελατηρίων.

6.3

Θεωρητικό μοντέλο

Στόχοι

- Σε δοκίμιο με τεχνητή διαμπερή ρωγμή, μέτρηση των παραμορφώσεων (ϵ_x) δεξιά και αριστερά της ρωγμής με τους κατάλληλους αισθητήρες έτσι ώστε να διαπιστωθεί η διάδοσή της (βλ. σχήμα 6.1). Οι αισθητήρες θα τοποθετηθούν και στις δυο όψεις. Ακόμη θα τοποθετηθούν στην μπροστά όψη οπτικές ίνες πάνω στη ρωγμή καθώς και στις άκρες του δοκιμίου για να διαπιστωθεί η συμπεριφορά τους κατά τη θραύση τους (εφόσον αυτή συμβεί) και κατά την ανάπτυξη της ρωγμής.
- Μέτρηση των παραμορφώσεων (ϵ_x) σε σημεία μακριά από τη ρωγμή και από τις δύο όψεις για τον προσδιορισμό των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που προκύπτουν από τον εναλλασσόμενο εφελκυσμό.



σχήμα 6.1

Θεωρητικοί υπολογισμοί

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνουν θεωρητικοί υπολογισμοί για να καθοριστούν οι τελικές διαστάσεις του δοκιμίου και θα γίνει μια εκτίμηση της απαιτούμενης δύναμης που πρέπει να αναπτυχθεί στο δοκίμιο.

α.

Ψαθυρή θραύση

Με τις εξισώσεις από τη θεωρία της ψαθυρής θραύσης, θα υπολογιστεί το μέγιστο μήκος ρωγμής, έτσι ώστε να μη συμβεί ασταθή θραύση στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι υπολογισμοί θα γίνουν για τρία διαφορετικά πλάτη, από τα οποία τελικά θα επιλεγεί ένα. Το δοκίμιο έχει πάχος $t = 10 \text{ mm}$ και μήκος $L = 662 \text{ mm}$. Άρα μένει να καθοριστεί το πλάτος.

Για το συγκεκριμένο υλικό του δοκιμίου κόπωσης, η τιμή του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης (K_{Ic}) είναι:

$$K_{Ic} = 50 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Η τάση εφελκυσμού που θα υφίσταται το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι:
 $\sigma = 100 \text{ MPa}$

Επομένως, με τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση και με γνωστό τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσης, θα υπολογιστεί το κρίσιμο μήκος ρωγμής για τρία διαφορετικά πλάτη $2b = 100 \text{ mm}$, $2b = 200 \text{ mm}$ και $2b = 300 \text{ mm}$. Το δοκίμιο έχει κεντρική διαμπερή ρωγμή.

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι για κεντρική διαμπερή ρωγμή το κρίσιμο μήκος ρωγμής για πλάκα πεπερασμένου πλάτους $2b$ είναι :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a \left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right)}$$

Οπότε έχουμε

Πλάτος	Κρίσιμο μήκος ρωγμής (2a)
100 mm	75.8 mm
200 mm	114.1 mm
300 mm	132.8 mm

Το δοκίμιο του πειράματος έχει ρωγμή μήκους $2a = 60 \text{ mm}$, οπότε από τους ανωτέρω υπολογισμούς παρατηρούμε, ότι δεν πρόκειται σε καμία περίπτωση να συμβεί ψαθυρή θραύση στο δοκίμιο με τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση. Τελικά επιλέγεται πλάτος:
 $B = 200 \text{ mm}$

β.

Όλκιμη θραύση

Για την περίπτωση της όλκιμης θραύσης θα γίνει υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης της μηχανής δοκιμών, έτσι ώστε η τάση που θα εφαρμόζεται να είναι ίση με εκείνη που έχει οριστεί στα δεδομένα του πειράματος. Τέλος υπολογίζεται η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτύξει η μηχανή. Θεωρούμε ότι το δοκίμιο καταπονείται από μονοαξονικό εφελκυσμό.

Στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού η τάση (σ) είναι :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

όπου

P, το φορτίο

A, η επιφάνεια της διατομής

Θα γίνουν υπολογισμοί για μήκος ρωγμής $2a = 60\text{mm}$ και πλάτος $B=200\text{ mm}$ και θα υπολογιστούν τα φορτία που θα επιβληθούν στο δοκίμιο.

Υπολογισμός επιφάνειας διατομής με τη ρωγμή

$$A_{ολ} = 2b * t = 2000\text{ mm}^2$$

$$A_{ρωγ} = 2a * t = 758\text{ mm}^2$$

$$A_{δρων} = A_{ολ} - A_{ρ} = 0.00124\text{ m}^2$$

Η τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο (δεδομένο πειράματος) κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι:

$$\sigma = 100\text{ MPa}$$

Επομένως, η απαιτούμενη δύναμη που πρέπει να επιβληθεί από τη μηχανή δοκιμών είναι:

$$P = 124.2\text{ kN}$$

Η τάση διαρροής του χάλυβα είναι:

$$\sigma = 250\text{ MPa}$$

Η δύναμη που θα έπρεπε να εφαρμοστεί στο δοκίμιο, εάν η τάση ήταν ίση με την τάση διαρροής:

$$P = 298.1\text{ kN}$$

Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκήσει η μηχανή δοκιμών είναι:

$$P = 240\text{ kN}$$

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι:

- Η μηχανή δοκιμών μπορεί να ασκήσει δύναμη, τέτοια ώστε να εφαρμοστεί τάση ίση με 100 MPa.

- Ακόμα και αν ασκήσουμε τη μέγιστη δύναμη της μηχανής δοκιμών, το δοκίμιο δεν πρόκειται να διαρρεύσει και να μεταβεί στην πλαστική περιοχή, διότι η εφαρμοζόμενη τάση θα είναι αρκετά μικρότερη της τάσης διαρροής.

Συμπερασματικά από την ανάλυση που προηγήθηκε για την ψαθυρή και όλκιμη θραύση, παρατηρούμε ότι το δοκίμιο δεν πρόκειται να αστοχήσει με ψαθυρό τρόπο, λόγω της ρωγμής κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ακόμη, η μηχανή δοκιμών έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει την απαιτούμενη τάση και τέλος, σε όλη τη διάρκεια, οι τάσεις που θα εφαρμοζονται θα είναι στην ελαστική περιοχή. Επομένως, το πείραμα θα μπορέσει να πραγματοποιηθεί σωστά και το δοκίμιο να αστοχήσει από κόπωση και όχι από άλλη αιτία.

Διαστάσεις δοκιμίου

Μήκος, $L = 662 \text{ mm}$

Πλάτος, $B = 200 \text{ mm}$

Πάχος, $t = 10 \text{ mm}$

Μήκος ρωγμής, $2a = 60 \text{ mm}$

Αισθητήρες

Όπως αναφέρθηκε στην ανωτέρω παράγραφο (στόχοι) στην αρχή της ενότητας 6.3 θα τοποθετηθούν οπτικοί αισθητήρες (FBG) και ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (strain gauges). Οι αισθητήρες θα τοποθετηθούν κατά ομάδες και συγκεκριμένα 2 ζευγάρια εκατέρωθεν της ρωγμής (στην μπροστά και πίσω επιφάνεια) και άλλα 2 ζευγάρια σε απομακρυσμένη θέση από τη ρωγμή. Η ονοματολογία των αισθητήρων ακολουθεί στον πίνακα 6.1.

Όνομα αισθητήρα	Είδος αισθητήρα	Επιφάνεια που βρίσκεται	Θέση αισθητήρα
FBG - 1	Οπτικός	Μπροστά όψη	Κοντά στη ρωγμή
SG - 1	Συμβατικός	Μπροστά όψη	Κοντά στη ρωγμή
FBG - 2	Οπτικός	Μπροστά όψη	Μακριά από ρωγμή
SG - 2	Συμβατικός	Μπροστά όψη	Μακριά από ρωγμή
FBG - 3	Οπτικός	Πίσω όψη	Μακριά από ρωγμή
SG - 3	Συμβατικός	Πίσω όψη	Μακριά από ρωγμή
FBG - 4	Οπτικός	Πίσω όψη	Κοντά στη ρωγμή
SG - 4	Συμβατικός	Πίσω όψη	Κοντά στη ρωγμή

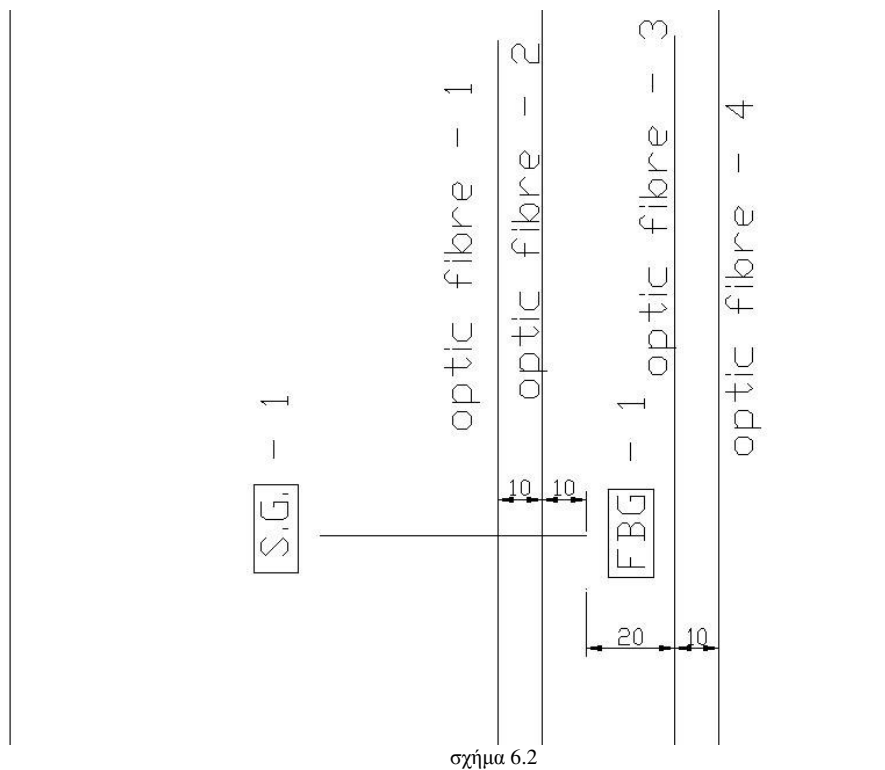
Πίνακας 6.1

Πέρα από τους αισθητήρες θα τοποθετηθούν και οπτικές ίνες (χωρίς αισθητήρα) για την ανίχνευση της διάδοσης της ρωγμής. Η ονομασία τους ακολουθεί στον πίνακα 6.2

Όνομα οπτικής ίνας	Επιφάνεια που βρίσκεται	Θέση οπτικής ίνας
Optic fibre - 1	Μπροστά όψη	20 mm αριστερά του άκρου της ρωγμής
Optic fibre - 2	Μπροστά όψη	10 mm αριστερά του άκρου της ρωγμής
Optic fibre - 3	Μπροστά όψη	20 mm δεξιά του άκρου της ρωγμής
Optic fibre - 4	Μπροστά όψη	30 mm δεξιά του άκρου της ρωγμής

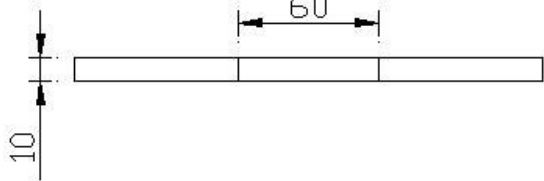
Πίνακας 6.2

Οι ακριβείς θέσεις των οπτικών ινών φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 6.2

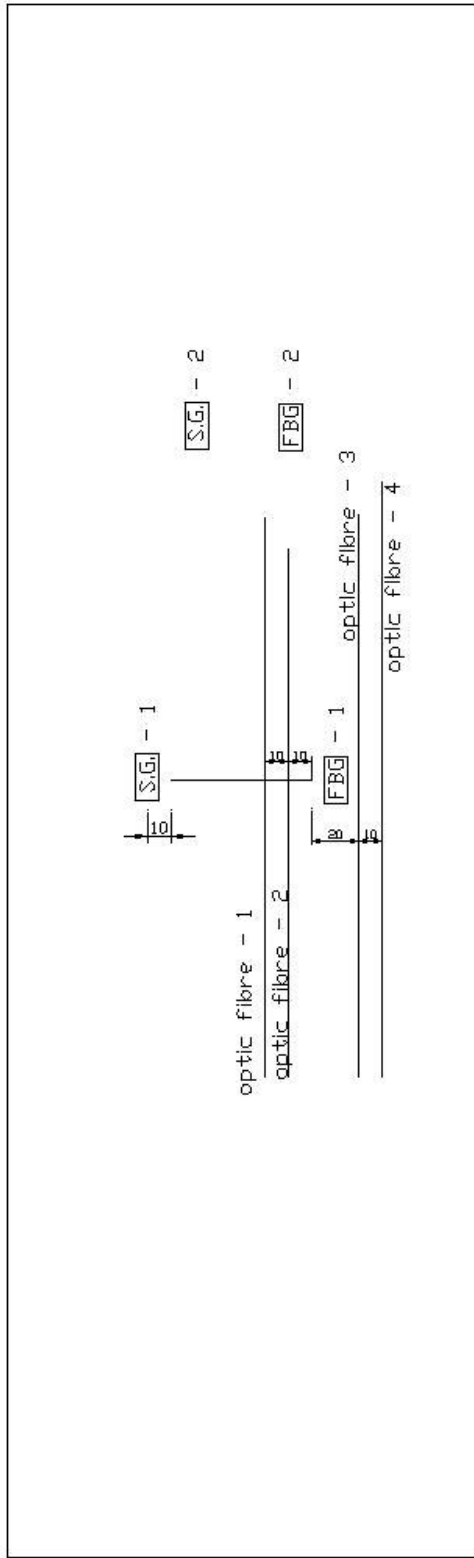


σχήμα 6.2

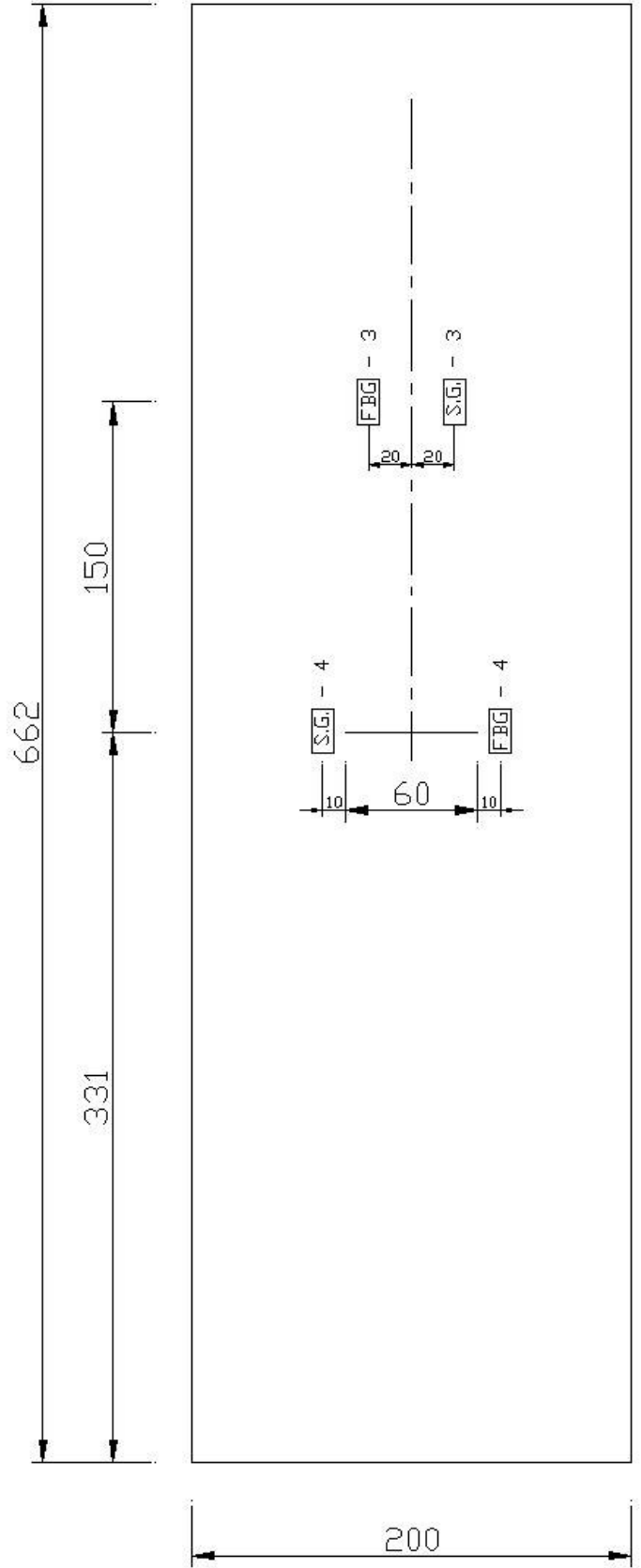
Το σχέδιο του δοκιμίου κόπωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3, το οποίο περιλαμβάνει και όλες τις ακριβείς διαστάσεις με τις θέσεις όλως των αισθητήρων και των διαστάσεων του δοκιμίου.



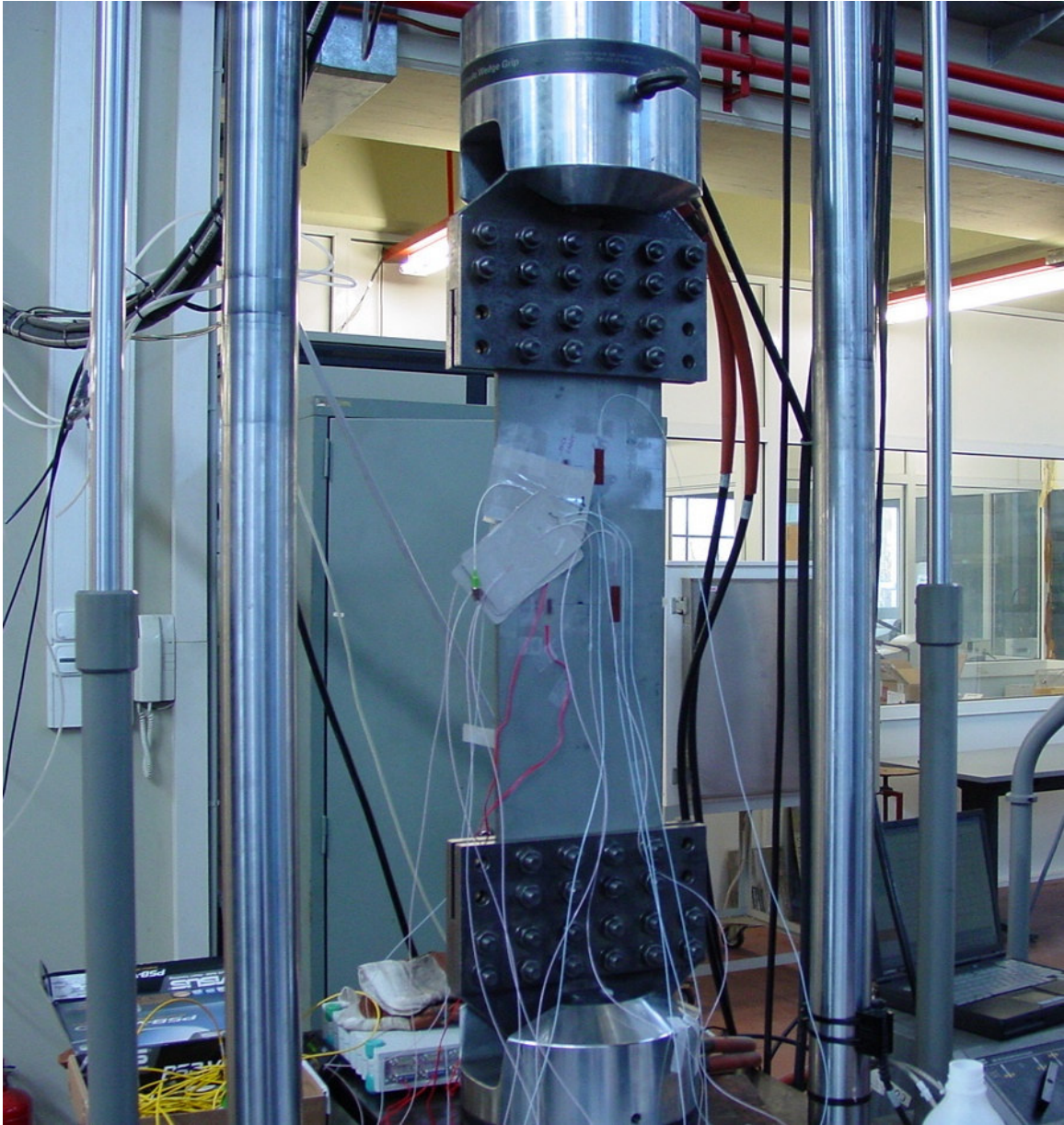
front



back



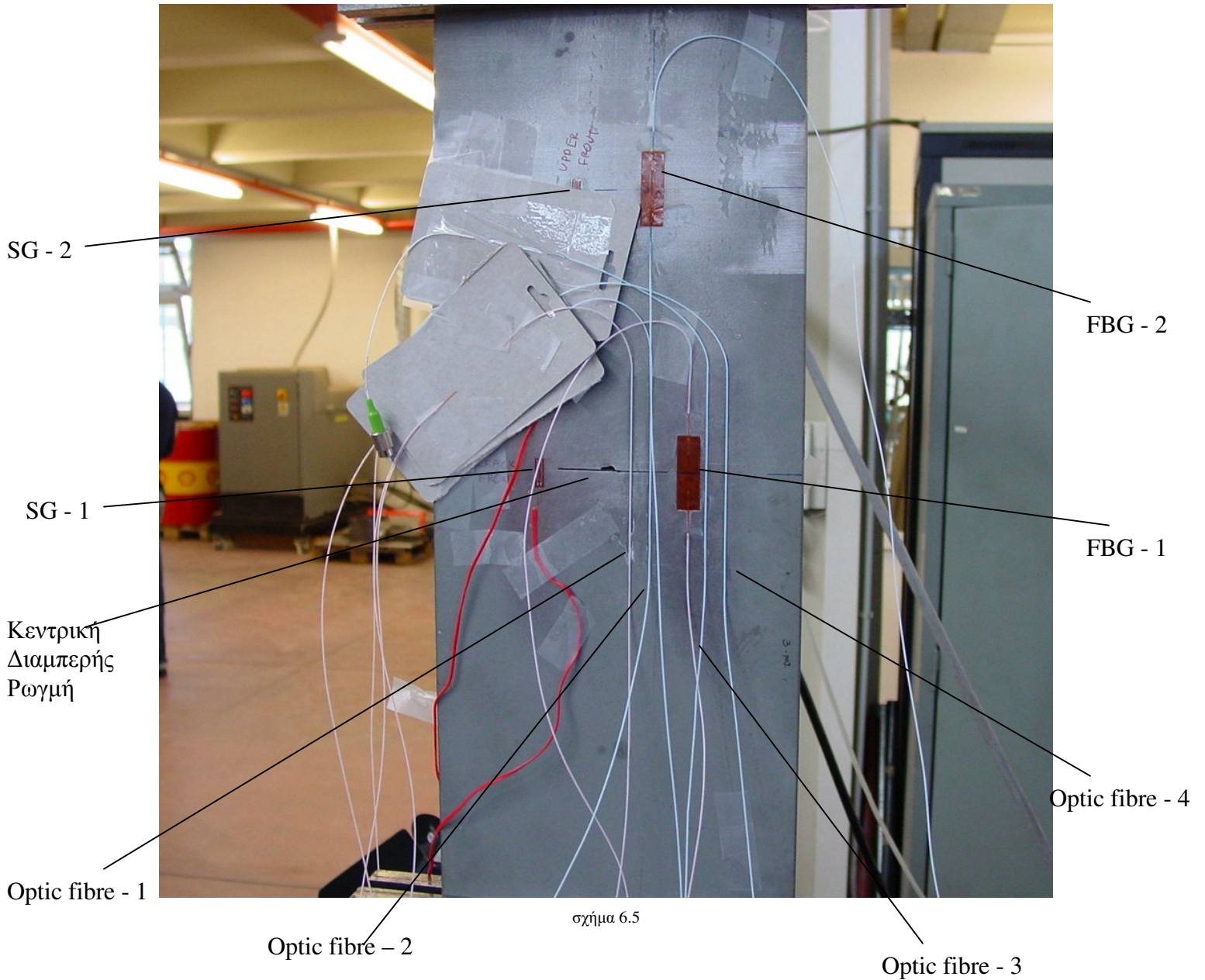
σχίμα 6.3



σχήμα 6.4

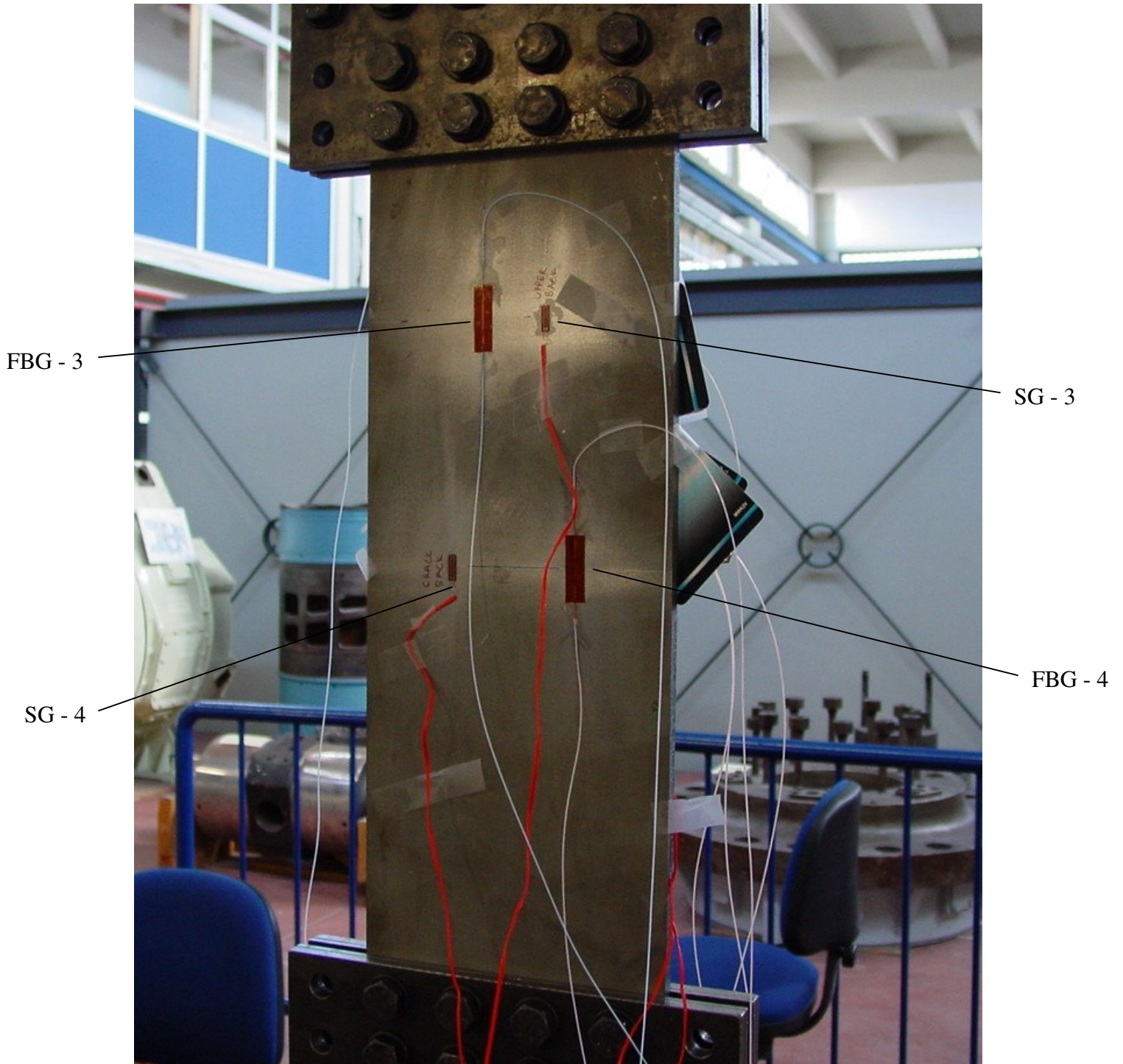
Στο σχήμα 6.4 διακρίνεται το δοκίμιο, το οποίο είναι τοποθετημένο στη μηχανή δοκιμών, λίγο πριν αρχίσει το πείραμα. Η επιφάνεια που φαίνεται είναι η μπροστά όψη, πάνω στην οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες και οι οπτικές ίνες, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Μπροστά Επιφάνεια



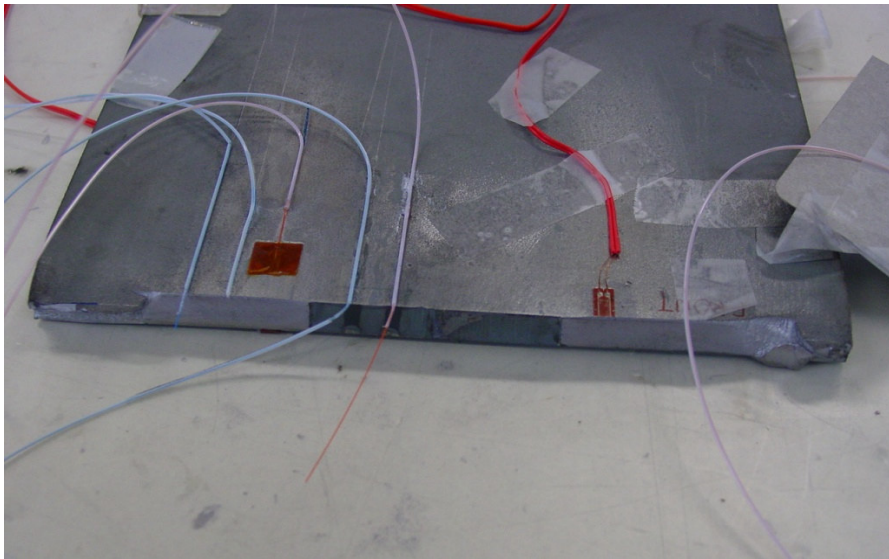
Στο σχήμα 6.5 φαίνονται πιο ξεκάθαρα όλοι οι αισθητήρες και οι οπτικές ίνες με τις ονομασίες τους. Οι οπτικές ίνες, όπως φαίνεται είναι όλες συνδεδεμένες με ένα Bragg αναφοράς (τμήμα πάνω στο χαρτόνι), το οποίο χρησιμεύει για την παρακολούθηση της κατάστασης της ίνας, όπως εξηγείται σε επόμενη παράγραφο.

Πίσω επιφάνεια



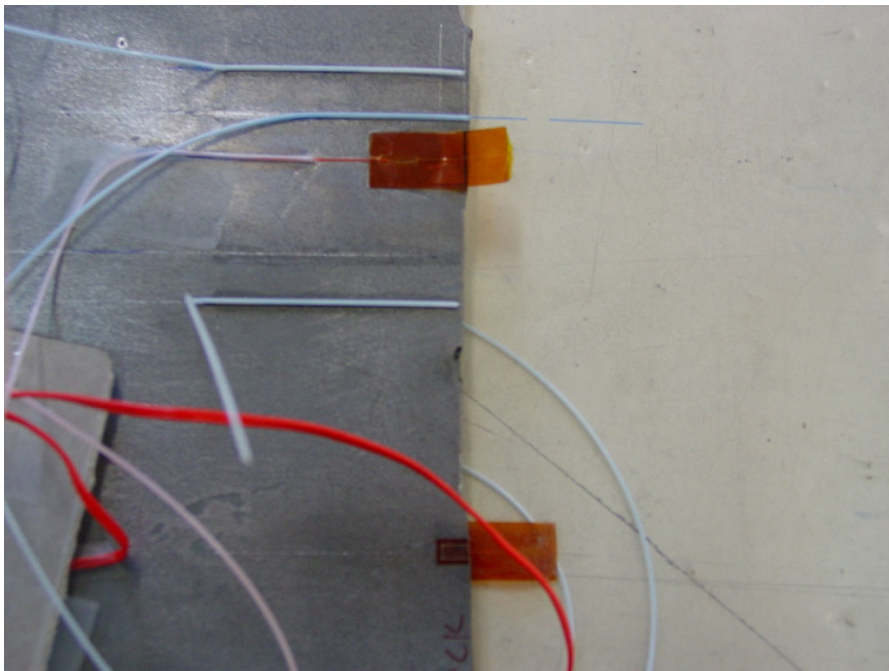
σχήμα 6.6

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η πίσω όψη του δοκιμίου, με τους αντίστοιχους αισθητήρες (FBG και strain gauge).



σχήμα 6.7

Στα σχήματα 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται τα θραυσμένα τμήματα του δοκιμίου, μετά το τέλος του πειράματος. Οι επιφάνειες θραύσης είναι χαρακτηριστικές δοκιμίου, το οποίο αστόχησε από ψαθυρή θραύση λόγω κόπωσης. Διακρίνονται, ακόμη, οι αισθητήρες, από τους οποίους άλλοι έχουν κοπεί στη μέση, ενώ άλλοι απλά έχουν ξεκολλήσει από ένα τμήμα του δοκιμίου και παραμένουν κολλημένοι στο άλλο.



σχήμα 6.8

6.4

Ανάλυση πειραματικών δεδομένων (data analysis)

Χαρακτηριστικά Πειράματος

Εναλλασσόμενη τάση 100 MPa

$$\sigma_m = 0 \text{ MPa}$$

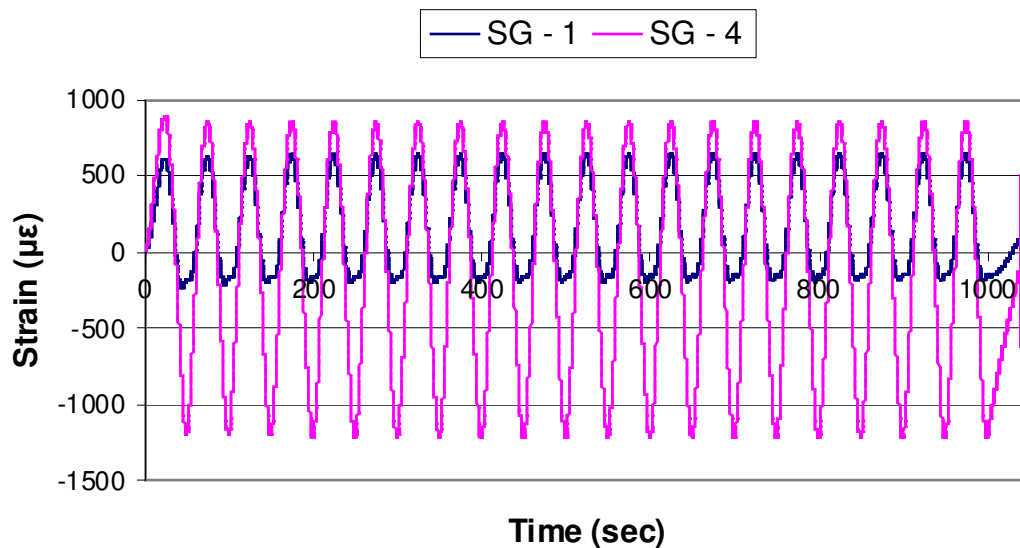
$$\sigma_a = 100 \text{ MPa}$$

Σενάριο φόρτισης

- 20 κύκλοι με συχνότητα 0.02 Hz
- υπόλοιποι κύκλοι με συχνότητα 2 Hz

Δεδομένα από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (Strain Gauges)

1.



σχήμα 6.9

Το παραπάνω διάγραμμα αναπαριστά τις παραμορφώσεις ως συνάρτηση του χρόνου που αναπτύχθηκαν στο δοκίμιο στη θέση κοντά στην τεχνητή ρωγμή. Στη συγκεκριμένη θέση τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρες ένας στην μπροστά όψη και ένας στην πίσω. Με μπλε

χρώμα είναι ο αισθητήρας στην μπροστά όψη (front), ενώ με ροζ χρώμα ο αισθητήρας που ήταν τοποθετημένος στην πίσω όψη (back).

Το δοκίμιο φορτιζόταν με εναλλασσόμενη τάση 100 MPa. Δηλαδή αναπτύσσονταν 100 MPa εφελκυστικής τάσης και -100 MPa θλιπτικής τάσης. Θα περιμέναμε λοιπόν και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις να είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα του χρόνου. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει. Θα γίνει ανάλυση στις δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης (εφελκυσμός/θλίψη).

Εφελκυσμός

Πρώτα θα ασχοληθούμε με τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τον εφελκυσμό. Όταν σε μια πλάκα εφαρμόζεται ομοιόμορφη εφελκυστική τάση στα δύο άκρα της, τότε σε όλα τα σημεία εφαρμόζεται η ίδια τάση. Παρατηρούμε, όμως, από το διάγραμμα ότι ο αισθητήρας στην πίσω όψη δέχεται μεγαλύτερες παραμορφώσεις (περίπου 220 με, 26% της μέγιστης παραμόρφωσης) άρα και τάσεις. Αυτό οφείλεται στους εξής παράγοντες :

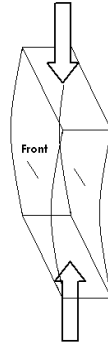
- Το δοκίμιο δεν ήταν τοποθετημένο στη μηχανή κοπώσεως κατακόρυφα όπως και θα έπρεπε αλλά είχε μια μικρή κλίση. Αυτή η κλίση είχε ως αποτέλεσμα, η τάση που εφαρμοζόταν στα άκρα να μην είναι εντελώς ομοιόμορφη, άρα και οι παραμορφώσεις να διαφέρουν.

- Ο κυριότερος παράγοντας για τη μεγάλη διαφορά στις μετρούμενες παραμορφώσεις είναι η συγκέντρωση τάσεων που υπάρχει κοντά στη ρωγμή. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 mm από το άκρο της ρωγμής, κοντά στην πλαστική ζώνη της ρωγμής. Η περιοχή κοντά στα άκρα της ρωγμής είναι περιοχή που έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων λόγω της κατεργασίας κατά τη διάνοιξη της ρωγμής. Αλλά και κατά τη διάρκεια της φόρτισης οι τάσεις που αναπτύσσονται στα σημεία κοντά στη ρωγμή δεν είναι ίδιες με εκείνες που εμφανίζονται σε όλα τα σημεία του δοκιμίου. Οι τάσεις εκεί αποκτούν μεγάλες τιμές και μπορεί να διαφέρουν στην μπροστά και στην πίσω όψη.

Θλίψη

Ακολουθώς θα επεξεργαστούμε τα στοιχεία για τις θλιπτικές παραμορφώσεις. Εδώ παρατηρούμε πολύ μεγάλες αποκλίσεις (που φτάνουν έως και τα 1050 με, 86% της μέγιστης παραμόρφωσης) ανάμεσα στις δύο όψεις. Όπως και στον εφελκυσμό, έτσι και στη θλίψη όλα τα σημεία του δοκιμίου δέχονται την ίδια τάση. Όμως οι παραμορφώσεις στην πίσω όψη είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες στη μπροστά όψη. Αυτό συμβαίνει διότι :

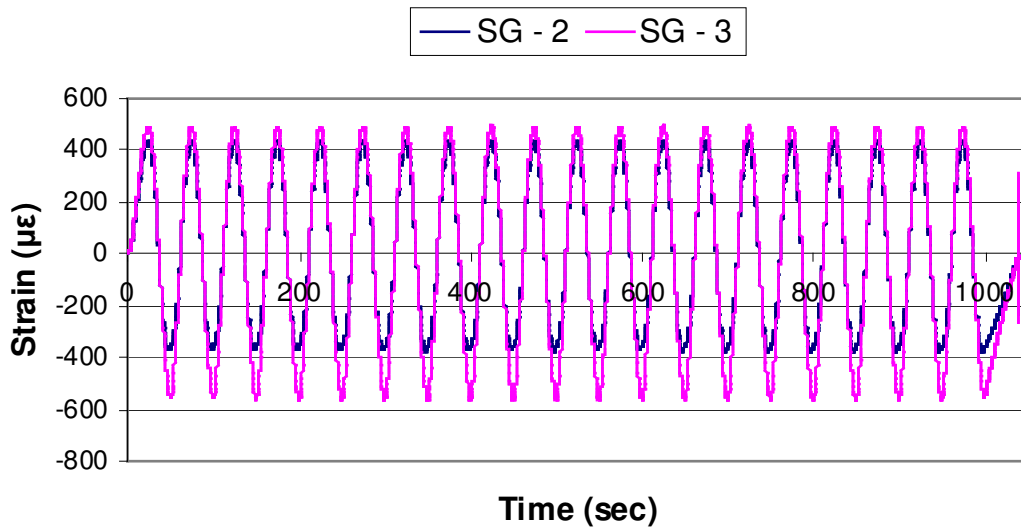
- Επειδή το δοκίμιο είχε μεγάλο μήκος είναι πολύ εύκολο η αναπτυσσόμενη θλιπτική φόρτιση να μην εφαρμόζεται τελείως παράλληλα, κατά τον «ιδεατό» άξονα της ράβδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φορτίο να ασκείται έκκεντρα και να αναπτύσσονται καμπτικές ροπές. Δηλαδή, έχουμε το φαινόμενο του λυγισμού στο δοκίμιο. Παρατηρήθηκε, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος, ότι το δοκίμιο καμπτόταν προς της μεριά της μπροστά όψης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.10.



σχήμα 6.10

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.10, η μπροστά όψη εφελκύεται, ενώ η πίσω όψη θλίβεται ακριβώς όπως συμβαίνει και στην απλή κάμψη δοκών. Δηλαδή τα σημεία που βρίσκονται στην μπροστά όψη δεν δέχονται όλο το θλιπτικό φορτίο, διότι μέρος του αναιρείται από τις εφελκυστικές τάσεις. Αντιστοίχως, στην πίσω όψη οι θλιπτικές τάσεις αυξάνονται, διότι σε αυτή την περίπτωση προστίθενται και οι επιπλέον θλιπτικές τάσεις που προκύπτουν από το λυγισμό. Για αυτό το λόγο προκύπτει και η έντονη διαφορά στις παραμορφώσεις του δοκιμίου ανάμεσα στις δύο όψεις.

2.



σχήμα 6.11

Το σχήμα 6.11 αναπαριστά τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο δοκίμιο σε σημεία που βρίσκονταν μακριά (150 mm) από την τεχνητή ρωγμή. Εδώ οι διαφορές είναι πιο περιορισμένες. Οι λόγοι για τις διαφορές είναι αυτοί που περιγράφηκαν παραπάνω. Αξίζει απλά να παρατηρήσουμε για τις εφελκυστικές παραμορφώσεις ότι:

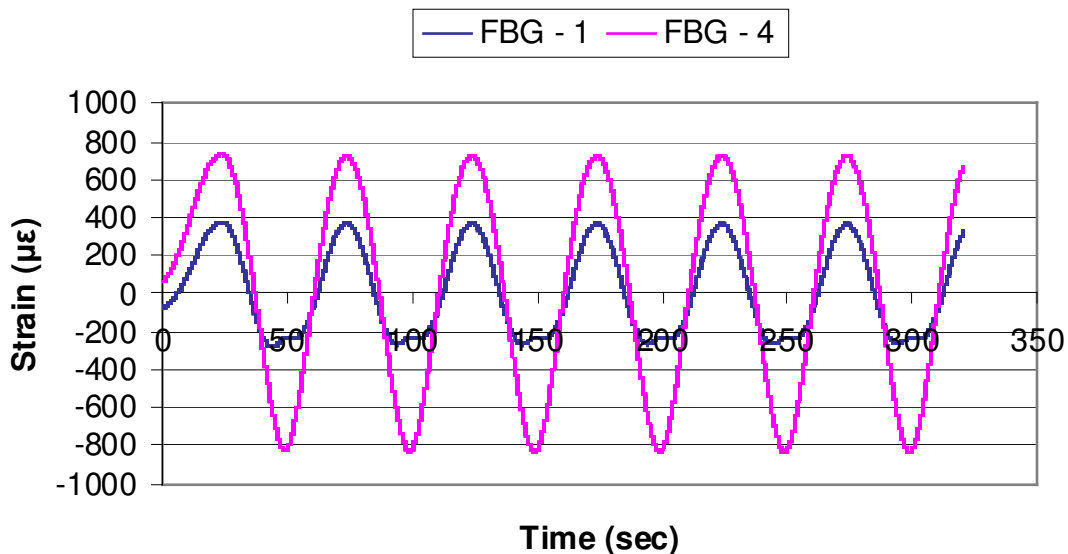
- Η διαφορά ανάμεσα στην μπροστά και την πίσω όψη είναι σχετικά μικρή (~55 με, 12% της μέγιστης παραμόρφωσης). Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή τα σημεία που είναι μακριά από τη ρωγμή δεν επηρεάζονται από τις τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων που υπάρχουν κοντά στα άκρα. Άρα η μικρή διαφορά οφείλεται στους άλλους δύο λόγους που αναφέρθηκαν.

Όσον αφορά τις θλιπτικές παραμορφώσεις :

- Και εδώ η διαφορά είναι αρκετά περιορισμένη (~200 με, 36% της μέγιστης παραμόρφωσης) σε σχέση με τους αισθητήρες κοντά στη ρωγμή. Αυτό συμβαίνει διότι κατά το λυγισμό το μέγιστο βέλος κάμψης εμφανίζεται στο μέσο του δοκιμίου (εκεί που βρίσκεται και η ρωγμή), ενώ είναι κατά πολύ μικρότερο σε σημεία μακριά από τη μέση. Για αυτό το λόγο οι επιπλέον τάσεις που δέχονται οι αισθητήρες στα σημεία μακριά από τη ρωγμή είναι μικρές και δεν αλλοιώνουν σημαντικά τις τάσεις από τη θλιπτική φόρτιση.

Δεδομένα από τους οπτικούς αισθητήρες (FBGs)

1.



σχήμα 6.12

Στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου στην μπροστά και πίσω όψη του δοκιμίου στη θέση κοντά στη ρωγμή. Τα δεδομένα αφορούν αποκλειστικά τις μετρήσεις από τους οπτικούς αισθητήρες. Το σχήμα

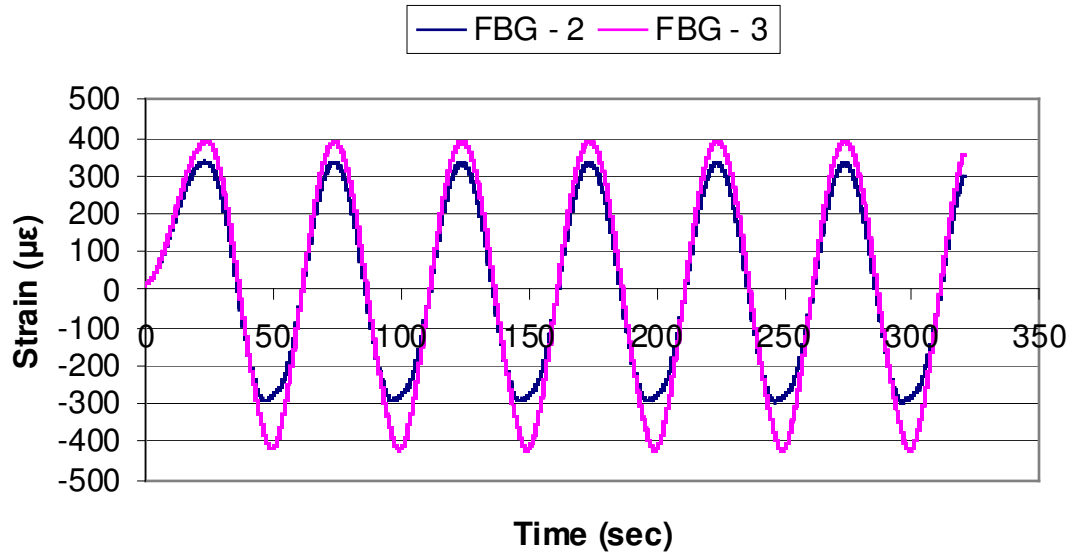
αυτό βρίσκεται σε αντιστοιχία με το σχήμα 6.9 που αφορούσε τα strain gauges. Παρατηρείται και εδώ επίσης ότι:

- Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες στην πίσω όψη
- Οι θλιπτικές παραμορφώσεις είναι πολύ μικρότερες στην πίσω όψη σε σχέση με εκείνες στη μπροστά επιφάνεια

Ακόμη στην παρούσα περίπτωση οι διαφορές ανάμεσα στη μπροστά και στην πίσω όψη δεν είναι οι ίδιες με εκείνες που μετρήθηκαν στο σχήμα 6.9 . Δηλαδή στην μπροστά όψη η μέγιστη διαφορά κυμαίνεται στα 350 με, 50% της μέγιστης (σε σχέση με τα 220 με, 26% της μέγιστης) και στην πίσω όψη η διαφορά είναι περίπου 600 με, 72% της μέγιστης (σε σχέση με τα 1050 με, 86% της μέγιστης). Δηλαδή, η διαφορά είναι περισσότερο «μοιρασμένη» ανάμεσα στην μπροστα και την πίσω όψη.

Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνουν αυτές οι διαφορές είναι οι ίδιοι που αναφέρθηκαν και στην περίπτωση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων στο σχήμα 6.9, καθώς επίσης και στη συμπεριφορά των οπτικών αισθητήρων και στη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν από τις πραγματικές τιμές, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 5.

2.



σχήμα 5.13

Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις συναρτήσει του χρόνου στους οπτικούς αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι μακριά από τη ρωγμή στην μπροστά και πίσω επιφάνεια αντιστοίχως. Οι τιμές είναι παρόμοιες με εκείνες του σχήματος 6.11. Οι

διαφορές επίσης ανάμεσα στην μπροστά και πίσω όψη στον εφελκυσμό είναι περίπου 57 με, 15% της μέγιστης (σε σχέση με τα 55 με, 12% της μέγιστης, του σχ 6.11) και στη θλίψη περίπου 140 με, 34% της μέγιστης (σε σχέση με τα 200 με, 36% της μέγιστης, του σχ 6.11). Παρατηρείται δηλαδή ότι η μορφή του σχήματος 6.13 είναι αρκετά κοντά με εκείνη του 6.11.

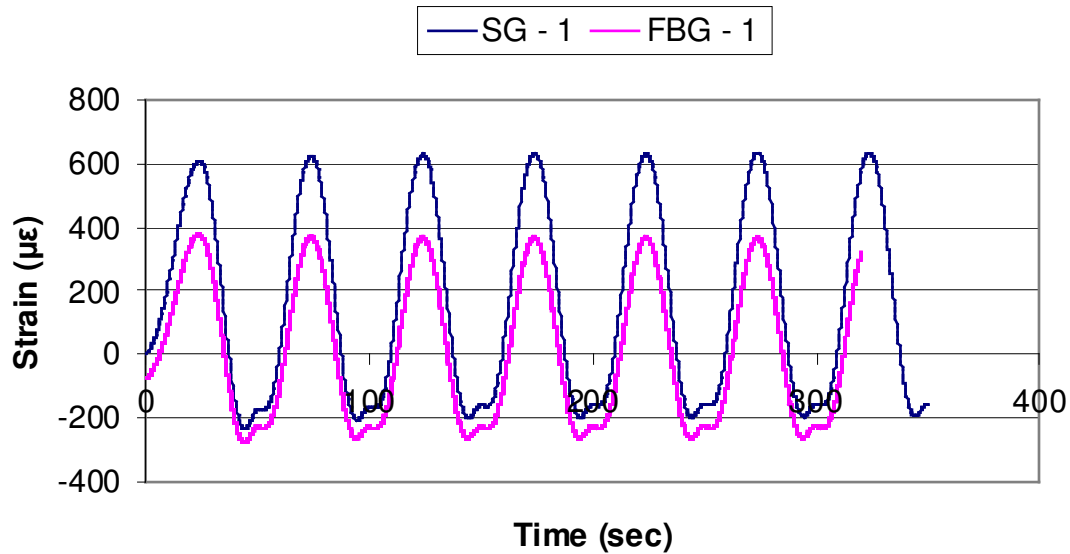
Οι διαφορές που εμφανίζονται και εδώ ανάμεσα στον αισθητήρα στην μπροστά και στην πίσω επιφάνεια, είναι οι ίδιες που εξηγήθηκαν και στα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα και είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις διαφορές που προκύπτουν στα strain gauges. Αυτό συμβαίνει διότι οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρής τάξης μεγέθους (δεν υπερβαίνουν τα 500 με). Όπως είδαμε και σε σχήματα στο κεφάλαιο 5, όσο μικρότερες είναι οι παραμορφώσεις τόσο πιο κοντά βρίσκονται οι τιμές των FBG με τις πραγματικές. Αν οι παραμορφώσεις ξεπεράσουν τα 150 με, τότε πλέον οι οπτικοί αισθητήρες δεν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Περαιτέρω σύγκριση των strain gauges με τα FBG στην αμέσως επόμενη παράγραφο θα δώσει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα.

Συγκριτικά διαγράμματα

Στις προηγούμενες δυο παραγράφους έγινε ανάλυση των δεδομένων από τα strain gauges και από τα FBG ξεχωριστά. Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχε η ίδια παραμόρφωση στον εφελκυσμό και στη θλίψη, ιδιαίτερα στη θέση κοντά στη ρωγμή. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τα δυο είδη αισθητήρων. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει η σύγκριση στην ίδια θέση των δυο ειδών αισθητήρων. Δηλαδή, η διαφορά στις τιμές των οπτικών αισθητήρων σε σχέση με τα strain gauges. Έτσι θα επικεντρωθεί η προσοχή στη σύγκριση των τιμών τους και όχι στην ερμηνεία του φαινομένου που συνέβη στο πείραμα της κόπωσης, η οποία έχει εξάλλου ήδη δοθεί στις προηγούμενες παραγράφους.

1.

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζονται οι δυο γραφικές παραστάσεις από τις τιμές των δυο ειδών αισθητήρων στη θέση κοντά στη ρωγμή και στη μπροστά επιφάνεια. Εκ πρώτης όψεως παρατηρείται ότι η μορφή των δυο καμπύλων είναι η ίδια, χωρίς όμως αυτές να συμπίπτουν. Οι δύο καμπύλες δεν είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα των χρόνων. Δηλαδή, οι εφελκυστικές τιμές (θετικές) είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις θλιπτικές (αρνητικές).



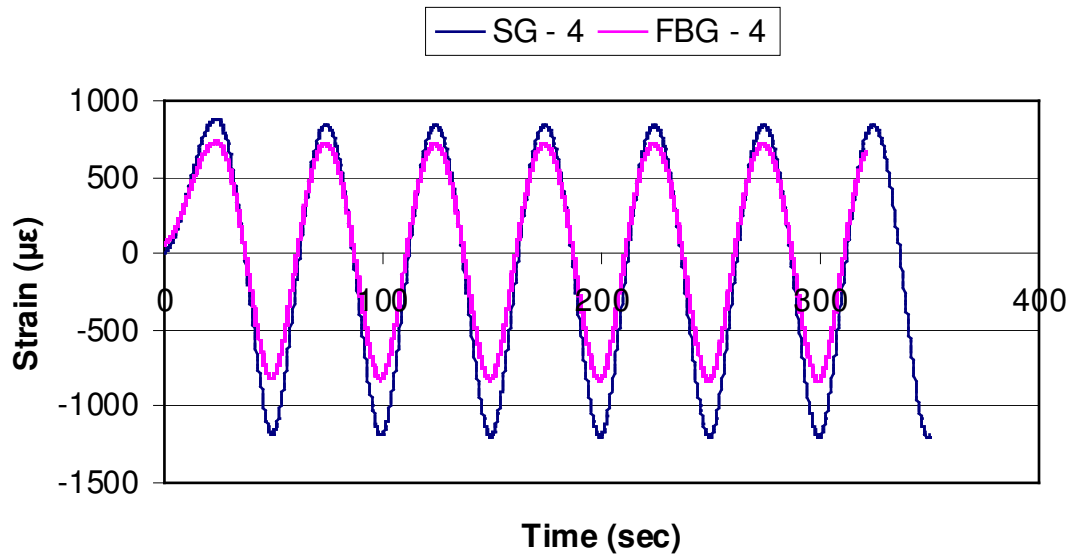
σχήμα 6.14

Οι μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στους δυο αισθητήρες βρίσκονται στον εφελκυσμό και φτάνουν τα 260 με, 40% της μέγιστης τιμής. Όταν εφαρμόζονται θλιπτικές παραμορφώσεις οι διαφορές στους δυο αισθητήρες φτάνουν τα 70 με, 38% της μέγιστης τιμής. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στους εξής παράγοντες:

- Όπως διαπιστώθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, υπήρχαν πολύ μεγάλες διαφορές στις τιμές των αισθητήρων ακόμα και όταν αυτοί ήταν ίδιου τύπου (π.χ. μόνο strain gauges) λόγω της διαφορετικής θέσης που βρίσκονταν και λόγω των διαφορετικών παραμορφώσεων που εφαρμόζονταν σε κάθε θέση. Έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί και οι δύο αισθητήρες να βρίσκονται στην μπροστά επιφάνεια δεν είναι όμως στην ίδια θέση αφού βρίσκονται εκατέρωθεν της ρωγμής. Αποτέλεσμα αυτού είναι να λαμβάνουν διαφορετικές τιμές.
- Από το κεφάλαιο 5 βγήκε το συμπέρασμα ότι οι οπτικοί αισθητήρες δίνουν αποτελέσματα πολύ πιο κοντά στις πραγματικές τιμές όταν οι παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν τα 150 με. Έτσι λοιπόν και στη συγκεκριμένη περίπτωση η διαφορά στην περιοχή του εφελκυσμού είναι πολύ μεγαλύτερη διότι οι τάσεις εκεί (σύμφωνα και με τα strain gauges) είναι λίγο μεγαλύτερες των 600 με. Ενώ στην περιοχή της θλίψης, που οι τάσεις είναι λίγο μεγαλύτερες από τα 200 με, η απόλυτη διαφορά των δυο ειδών αισθητήρων είναι σχετικά μικρότερη.

2.

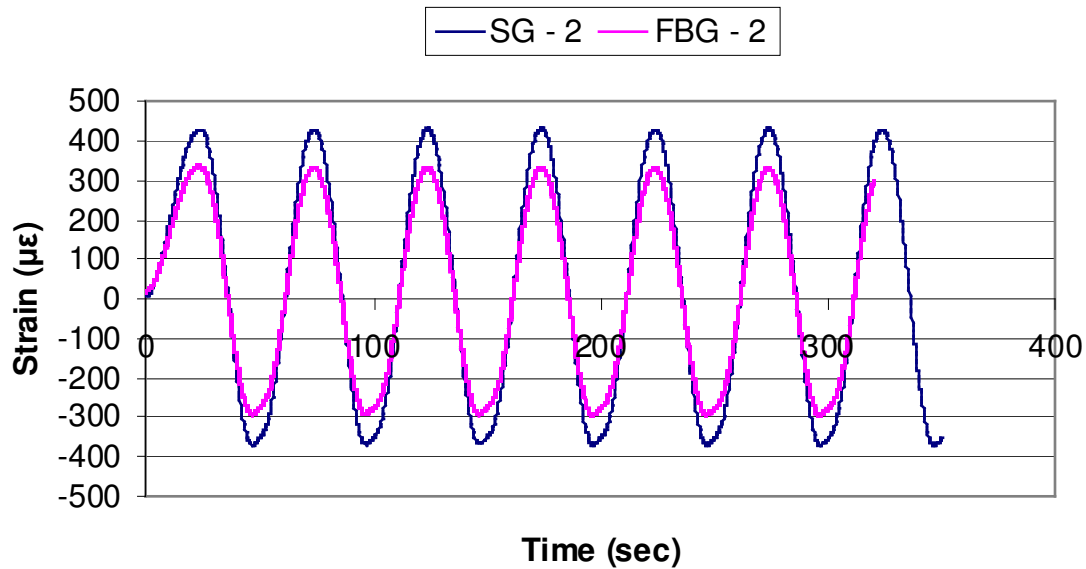
Στο σχήμα 6.15 παρουσιάζονται οι καμπύλες από τις τιμές των αισθητήρων οπτικών ινών και των strain gauges στη θέση κοντά στη ρωγμή στην πίσω επιφάνεια. Οι δυο καμπύλες δεν είναι και σε αυτή την περίπτωση συμμετρικές, χωρίς όμως να αποκλίνουν πολύ από τον άξονα x.



σχήμα 6.15

Επίσης, η μορφή τους πλησιάζει πολύ περισσότερο στην αναμενόμενη μορφή που θα έπρεπε να είχαν τα αποτελέσματα από ένα πείραμα κόπωσης. Ο οπτικός αισθητήρας έχει πιο ομαλή συμπεριφορά και περισσότερη συμμετρία σε σχέση με το strain gauge που εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις. Οι διαφορές ανάμεσα στους δυο αισθητήρες στην περιοχή του εφελκυσμού είναι 125 με, 15% της μέγιστης τιμής και στην περιοχή της θλίψης 375 με, 29% της μέγιστης τιμής. Εμφανίζεται δηλαδή το ίδιο φαινόμενο που υπήρχε και στο προηγούμενο σχήμα, μόνο που σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές γίνονται πιο έντονες στην περιοχή της θλίψης, όπου εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τιμές των παραμορφώσεων.

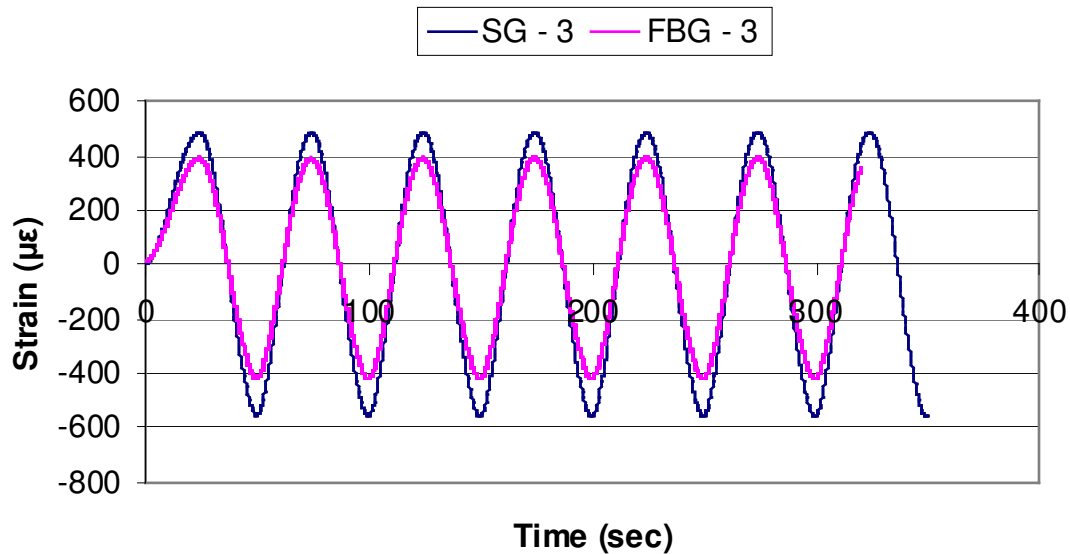
3.



σχήμα 6.16

Στα τελευταία δυο σχήματα υπάρχουν τα διαγράμματα με τη σύγκριση των οπτικών αισθητήρων με τα strain gauges, στη θέση μακριά από τη ρωγμή. Το σχήμα 6.16 αναφέρεται στην μπροστά επιφάνεια. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, οι καμπύλες σε αυτή τη θέση είναι πολύ πιο ομαλές σε σχέση με εκείνες στη ρωγμή. Οι μέγιστες διαφορές φτάνουν τα 100 με, 23% της μέγιστης παραμόρφωσης στην περιοχή του εφελκυσμού και τα 75 με, 21% της μέγιστης παραμόρφωσης, στην περιοχή της θλίψης. Είναι φανερό ότι η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των δύο αισθητήρων είναι αρκετά μικρότερη στη συγκεκριμένη θέση. Ομοίως, στο σχήμα 6.17 τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια. Οι μέγιστες διαφορές φτάνουν τα 100 με, 20% της μέγιστης παραμόρφωσης στον εφελκυσμό και τα 140 με, 25% της μέγιστης παραμόρφωσης, στη θλίψη. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι οι οπτικοί αισθητήρες αποκρίνονται πολύ καλύτερα λόγω των αρκετά μικρότερων αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε αυτή τη θέση. Έτσι τα αποτελέσματά τους είναι πιο αξιόπιστα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.



σχήμα 6.17

Ανίχνευση της εξέλιξης της ρωγμής

Πέρα από τους οπτικούς αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα της κόπωσης για τη σύγκριση τους με τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, έγινε και η χρήση οπτικών ινών χωρίς αισθητήρες για την ανίχνευση της εξέλιξης της ρωγμής. Έτσι, ακολουθώντας ένα πολύ πιο απλό σύστημα χωρίς τη μέτρηση παραμορφώσεων, απλά παρακολουθώντας την ένταση του φωτός στην οπτική ίνα, έγινε δυνατός ο προσδιορισμός της στιγμής που πραγματοποιήθηκε η θραύση.

Οι τέσσερις ίνες ήταν συνδεδεμένες με 4 FBG αναφοράς, τα οποία δεν ήταν προσαρτημένα πάνω στο δοκίμιο. Η χρήση των επιπρόσθετων bragg έγινε για να μετρηθεί η ακεραιότητα των ινών με την ίδια πειραματική διάταξη. Πιο αναλυτικά, ένας interrogator παρακολουθούσε τα μήκη κύματος που επέστρεφαν οι αισθητήρες. Για την περίπτωση των 4 οπτικών αισθητήρων, κατέγραφε την αλλαγή του μήκους λόγω των ασκούμενων παραμορφώσεων. Για τα 4 FBG αναφοράς απλά κατέγραφε την ύπαρξή τους. Πιο αναλυτικά, όταν έσπαγε η ίνα λόγω της διάδοσης της ρωγμής, το μήκος κύματος του αντίστοιχου FBG αναφοράς δεν καταγραφόταν από τον interrogator και συνεπώς μπορούσε να καταγραφεί η ακριβή χρονική στιγμή της θραύσης. Στο παρακάτω πίνακα υπάρχουν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις οπτικές ίνες.

Οπτική ίνα	Αρχή της θραύσης (sec)	Οριστική θραύση (sec)
Optic fibre - 1	10420	10423
Optic fibre - 3	23216	23229
Optic fibre - 4	23229	23236

Πίνακας 6.3

Ως αρχή της θραύσης θέτουμε το χρονικό σημείο που πλέον οι ενδείξεις που λαμβάνουμε είναι σποραδικές, δηλαδή ο interrogator δεν λαμβάνει όλες τις τιμές για την κάθε ίνα λόγω ραγδαίας αύξησης των απωλειών της. Πιο αναλυτικά, η ίνα έχει αρχίσει να καταστρέφεται, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις που λαμβάνονται να παρουσιάζουν κενά. Ως οριστική θραύση σημειώνεται η χρονική στιγμή που η καταστροφή της ίνας είναι πλήρης, άρα δεν υπάρχει πλέον καμία μέτρηση.

Απο τα δεδομένα του πίνακα 6.3 είναι φανερό ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ανίχνευση της εξέλιξης της ρωγμής. Παρατηρείται ότι η πρώτη ίνα που έσπασε είναι αυτή που βρίσκεται πάνω στη ρωγμή, όπως ήταν και αναμενόμενο. Ακολούθως έσπασαν οι ίνες με τη σειρά που είχαν τοποθετηθεί από το κέντρο της ρωγμής και προς τις άκρες του δοκιμίου. Η μικρή χρονική διαφορά που εντοπίζεται ανάμεσα στις δυο τελευταίες ίνες οφείλεται στη μικρή απόσταση που είχαν μεταξύ τους (10 mm) και στη γρήγορη διάδοση της ρωγμής που οφειλόταν σε ασταθή θραύση. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι το χρονικό διάστημα για να αρχίσουν να θραύονται οι ίνες που δεν ήταν πάνω στη ρωγμή, είναι περίπου διπλάσιο από εκείνης που ήταν πάνω στη ρωγμή. Δηλαδή, ενώ το δοκίμιο ταλαντωνόταν για αρκετό χρονικό διάστημα, η ρωγμή δεν αυξάνονταν γραμμικά, ενώ μετά από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων η ρωγμή διαδόθηκε πολύ γρήγορα και συνέβη ψαθυρή θραύση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις επιφάνειες θραύσης που φαίνονται στα σχήματα 6.7 και 6.8, όπου είναι ξεκάθαρο ότι δε συνέβη όλκιμη θραύση. Τέλος, αναφέρεται ότι η μια ίνα που ήταν τοποθετημένη πάνω στη ρωγμή δεν δούλεψε κατά τη διάρκεια του πειράματος και δεν ελήφθησαν καθόλου δεδομένα.

6.5

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 6 έγινε περιγραφή και ανάλυση του πειράματος της κόπωσης. Δοκίμιο με τεχνητή ανωμαλία (ρωγμή) υποβλήθηκε σε εναλλασσόμενη καταπόνηση μέχρι τη θραύση του. Πάνω στο δοκίμιο ήταν τοποθετημένα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauges), αισθητήρες οπτικών ινών (FBG) και οπτικές ίνες (optic fibres) με σκοπό την καλύτερη και πιο ουσιαστική σύγκριση των δυο ειδών. Στο πείραμα αυτό επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 5, αφού έγινε πιο ξεκάθαρη η απόκριση των αισθητήρων σε διαφορετικούς τρόπους φόρτισης. Πιο αναλυτικά, οι αισθητήρες οπτικών ινών (Fiber Bragg Grating):

- Δίνουν λανθασμένη εικόνα της πραγματικής παραμορφωσιακής κατάστασης. Πιο αναλυτικά, τα FBG έχουν μη γραμμική συμπεριφορά με την αύξηση των παραμορφώσεων και οι τιμές τους δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές. Δηλαδή, ενώ για μικρές τιμές παραμόρφωσης οι μετρήσεις συμπίπτουν με τις πραγματικές, όσο αυξάνονται οι τιμές των παραμορφώσεων τόσο μεγαλώνει και η απόκλισή τους. Όταν οι παραμορφώσεις κυμαίνονται έως 150 με, οι μετρούμενες τιμές είναι αρκετά ακριβείς (σφάλμα έως 10%) και πλησιάζουν τις πραγματικές. Όταν οι τιμές των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες από 150 με, τότε οι οπτικοί αισθητήρες εμφανίζουν σφάλμα που φτάνει έως και 40% των πραγματικών τιμών. Ακόμη πιο σύνθετο γίνεται το πρόβλημα,

αφού οι αισθητήρες δεν εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά για ίδιες τιμές παραμόρφωσης. Δηλαδή, σε δύο διαφορετικές καταστάσεις, που υπάρχει παραμόρφωση 1000 με, μπορεί το σφάλμα να κυμαίνεται από 15% έως 40%. Αυτό δείχνει, ότι δεν υπάρχει γραμμικότητα στη συμπεριφορά του οπτικού αισθητήρα και ότι είναι πιθανόν, ο αισθητήρας να επηρεάζεται από ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων, χωρίς να γίνεται σαφής ο ακριβής τρόπος.

- Παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία από επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος που μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των μετρήσεων.

Όσον αφορά στις οπτικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση της διάδοσης της ρωγμής, τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά. Δεν μπορούμε, όμως, να είμαστε εντελώς σίγουροι, αφού δεν έγινε σύγκριση με κάποιον άλλο αισθητήρα, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν όντως τα αποτελέσματα είναι σωστά.

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρήση των οπτικών ινών στα πλοία. Η πλέον συνηθισμένη εφαρμογή, είναι οι αισθητήρες οπτικών ινών με την ονομασία Fiber Bragg Gratings. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν και μετρούν την παραμόρφωση, μέσω αλλαγών που προκύπτουν στο μήκος κύματος της ίνας. Για να εξεταστεί η συμπεριφορά των αισθητήρων οπτικών ινών, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα, στα οποία έγινε η σύγκριση με συμβατικούς αισθητήρες (strain gauges). Το πρώτο, ήταν πείραμα κάμψης τριών σημείων και χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο με οπή, ενώ το δεύτερο, ήταν πείραμα κόπωσης με εναλλασσόμενη τάση 100 MPa σε δοκίμιο με κεντρική διαμερή ρωγμή.

Η σύγκριση των δύο ειδών αισθητήρων στο πείραμα της κάμψης έδειξε ότι, οι τιμές που ελήφθησαν από τους οπτικούς αισθητήρες ήταν μικρότερες από εκείνες των συμβατικών αισθητήρων. Αυτό διαπιστώθηκε σε δύο διαφορετικές θέσεις, οι οποίες είχαν και διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων. Εκτός από το γεγονός όμως, των μικρότερων απόλυτων τιμών, δε διαπιστώθηκε γραμμικότητα στις τιμές του σφάλματος, σε σχέση με τις τιμές των παραμορφώσεων. Δηλαδή, ενώ για τιμές παραμορφώσεων 1000 με, το σφάλμα ήταν 21%, σε άλλη θέση αισθητήρας που λάμβανε τιμές παραμορφώσεων 1500 με, το σφάλμα ήταν 15%. Αυτό που εξακριβώθηκε, είναι το γεγονός ότι, και οι δύο οπτικοί αισθητήρες εμφάνιζαν μικρότερο σφάλμα (έως 10%), για τιμές παραμορφώσεων έως 150 με.

Στο πείραμα της κόπωσης τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, ήταν παρόμοια με εκείνα του πειράματος της κάμψης. Δηλαδή, οι οπτικοί αισθητήρες είχαν τιμές μικρότερες από τις κανονικές. Στο σφάλμα υπήρχε μεγάλη διακύμανση. Κυμαινόταν από 15% έως 40%, χωρίς να σχετίζεται με το μέγεθος των αντίστοιχων παραμορφώσεων. Άρα δεν μπορούσε να γίνει εκ των προτέρων εκτίμηση του μεγέθους του σφάλματος

Άρα, από τα δεδομένα που προέκυψαν, διαπιστώθηκε πως η συμπεριφορά των οπτικών αισθητήρων δεν ήταν η αναμενόμενη, σύμφωνα με τα πλεονεκτήματα και τον πρωτοποριακό τρόπο λειτουργίας τους, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Πρέπει, επίσης, να τονισθεί ότι η όλη διαδικασία εγκατάστασης του συστήματος ήταν ιδιαίτερα δύσκολη, περίπλοκη και ευαίσθητη σε επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος. Και στα δύο πειράματα που έγιναν, δεν δούλεψε κάποιος αισθητήρας λόγω μη αναγνώρισής του από τον interrogator, παρά τις όποιες προσπάθειες που έγιναν για τη διόρθωση του προβλήματος.

Από όλα τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι οπτικοί αισθητήρες δεν μπορούν άμεσα να αντικαταστάσουν τους κλασικούς λόγω των προαναφερθέντων προβλημάτων. Το μόνο πεδίο εφαρμογών που μπορεί να είναι χρήσιμοι είναι σε περιοχές που κυριαρχούν έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τις τιμές

των κλασικών αισθητήρων, καθώς και σε πολύ εύφλεκτα περιβάλλοντα, αφού και πάλι δε συστήνεται η χρήση των strain gauges. Κάτι τέτοιο, όμως, μένει να διερευνηθεί πειραματικά για να επιβεβαιωθεί η ανωτερότητα των FBG στο συγκεκριμένο περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. Staszewski, C. Boller, G. Tomlinson, “Health Monitoring of Aerospace Structures”, Wiley, Chichester, 2004
- [2] Β. Παπάζογλου , “Ναυπηγική Τεχνολογία” , ΕΜΠ, Αθήνα, 1995
- [3] D. Jaramillo, C. Cabos, P. Renard, “Efficient Data Management for Hull Condition Assessment”, Germanischer Lloyd, Hamburg, 2003
- [4] S. Steen, W. Kauczynski, “Integrated Systems of Ship Handling and Monitoring of Hull Loads”, MARINTEK, Trondheim, 2001
- [5] Jeff Hecht, “Understanding Fiber Optics”, 4th ed , Prentice Hall , New Jersey , 2002
- [6] T.H.T. Chan , L. Yu, H.Y. Tam, Y.Q. Ni, S.Y. Liu, W.H. Chung, L.K. Cheng, “Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge : Background and experimental observation” , Engineering Structures, 2005
- [7] G. Zhou, L.M. Sim, “Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors”, Institute of Physics, Loughborough, 2002
- [8] K. Pran, G.B. Havsgard, G. Safvolden, O. Farsund, G. Wang, “Wavelength multiplexed fibre Bragg grating system for high-strain health monitoring applications”, Institute of Physics, Kjeller, 2002
- [9] Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, “Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”, Αθήνα, 1996