

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά	1
1.2 Πρωτότυπα	4
1.3 Σκοπός και αντικείμενο της μελέτης	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Αρχές της Μεθόδου	10
2.2 Βασικές Παράμετροι για την κατασκευή μοντέλων Στερεολιθογραφίας	11
2.3 Η διαταραχή <i>curl</i>	14
2.4 Πάχος στρωμάτων	15
2.5 <i>Postcuring</i>	17
2.6 Εφαρμογές της μεθόδου	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MOIRE. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ MOIRE

3.1 Εισαγωγικά	21
3.2 Μετρήσεις μετατόπισης για την περίπτωση <i>out-of-plane</i>	24
3.3 Ορισμός πεδίου μετατόπισης με τη χρήση του φαινομένου <i>moiré</i> .	26
3.4 Η γεωμετρική προσέγγιση του φαινομένου <i>moiré</i>	29
3.5 Χαρακτηρισμός της ρητίνης με τη χρήση του φαινομένου <i>moiré</i>	34
3.6 Ανάλυση της συρρίκνωσης των πλακών της ρητίνης	34
3.7 Πειραματική διαδικασία	39
3.8 Ανάλυση και περιγραφή αποτελεσμάτων	41
3.9 Πλεονεκτήματα της ανάλυσης <i>moiré</i>	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΩΡΙΑ SIMILARITY. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

<i>4.1 Εισαγωγή</i>	50
<i>4.2 Πειραματική διαδικασία</i>	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ

<i>5.1 Η φύση του φωτός</i>	62
<i>5.2 Η κυματική εξίσωση</i>	63
<i>5.3 Υπέρθεση κυμάτων</i>	66
<i>5.4 Διάθλαση και ανάκλαση φωτός</i>	70
<i>5.5 Wave plates</i>	72
<i>5.6 Ο νόμος stress optic</i>	74
<i>5.7 Ένταση του φωτός</i>	79
<i>5.8 Πολωμένο φως</i>	80
<i>5.9 Πολαροσκόπια</i>	82
<i>5.10 Επίπεδο πολαροσκόπιο</i>	82
<i>5.11 Κυκλικό πολαροσκόπιο (Circular polariscope)</i>	87
<i>5.12 Χρήση φακών στο πολαροσκόπιο</i>	90
<i>5.13 Ισοκλινείς γραμμές (Isoclinic fringes)</i>	91
<i>5.14 Ισοχρωματικές γραμμές (Isochromatic fringes)</i>	93
<i>5.15 Φωτοελαστική σταθερά</i>	95
<i>5.16 Καταλληλότητα υλικών για φωτοελαστική ανάλυση δύο διαστάσεων</i>	96
<i>5.17 Διαχωρισμός των κυρίων τάσεων</i>	98

<i>5.18 Μέθοδος διαφοράς διατμήσεων</i>	99
<i>5.19 Μέθοδοι βασισμένες στις εξισώσεις συμβατότητας</i>	100
<i>5.20 Πειράματα φωτοελαστικότητας σε δοκίμια στερεολιθογραφίας- Βαθμονόμηση της ρητίνης με εφελκυσμό</i>	100
<i>5.21 Επιπτώσεις του διαφορετικού προσανατολισμού του πρωτοτύπου</i>	104
<i>5.22 Ερπυσμός: Πειραματική διαδικασία</i>	105
<i>5.23 FEA Simulation</i>	108
<i>5.24 Δοκιμές επαλήθευσης της φωτοελαστικής σταθεράς</i>	108
<i>5.25 Πειραματική διαδικασία</i>	113
<i>5.26 Συμπεράσματα</i>	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

<i>6.1 Εισαγωγικά</i>	118
<i>6.2 Σχεδιασμός μηχανικών εξαρτημάτων: μια καινοτομική προσέγγιση</i>	120
<i>6.3 Εφαρμογές</i>	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΗΜΑΤΑ

1.1	Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος	3
1.2	Διάγραμμα που καταδεικνύει την απότομη αύξηση του κόστους όταν οι αλλαγές στο σχεδιασμό γίνονται σε μια ύστερη φάση της διαδικασίας ανάπτυξης. [Πηγή Krouse Associates, USA]	3
1.3	Σχηματική απεικόνιση των αλλαγών που επιφέρει στη διαδικασία ανάπτυξης η κατασκευή ενός πρωτότυπου	5
1.4	Αναπαράσταση πυραμίδας σε τομές και στρώματα	6
2.1	Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της στερεολιθογραφίας	11
2.2	Σχηματική αναπαράσταση του πώς δημιουργείται το curl 1) Το πρώτο στρώμα της δοκού 2) Το δεύτερο στρώμα και τέλος 3) Μετά από πολλά στρώματα	16
2.3	Διατομή της πολύ-στρωματικής κατασκευής του δοκιμίου ρητίνης	19
3.1	Μέθοδος μοιρέ για μετρήσεις out-of-plane	26
3.2	Γραμμές μοιρέ σε ένα τυχαίο σημείο στο υπό τάση δοκίμιο	27
3.3	Γεωμετρία του γραμμών μοιρέ με βάση την μεταξύ τους απόσταση	31
3.4	Γεωμετρία του γραμμών μοιρέ με βάση τη γωνία κλίσης τους	32
3.5	Οι παραμένουσες τάσεις στο πρώτο στρώμα προκαλούν την εμφάνιση	43

κυρτώσεων με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα

3.6	Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος για τη μέτρηση των out-of-plane παρεκτροπών	44
4.1	Συνολική διαδικασία της μεθόδου ομοιότητας (similarity method)	54
4.2	Διαγράμματα με τα αποτελέσματα πειράματος θλίψης που έγινε και για τα δύο δοκίμια	59
4.3	Ανάλυση FEA για το δοκίμιο της ρητίνης για φορτίο 2500 Nt	60
4.4	Ανάλυση FEA για το δοκίμιο του αλουμινίου για φορτίο 8500 Nt	61
5.1	Γραφική αναπαράσταση του διανύσματος του φωτός σαν συνάρτηση της θέσης του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης του.	65
5.2	Μέτρο του διανύσματος φωτός σαν συνάρτηση της θέσης του στον άξονα μετάδοσης για δύο κύματα που έχουν ίδιο πλάτος και συχνότητα αλλά διαφορετική αρχική φάση.	69
5.3	Δύο γραμμικά πολωμένα κύματα φωτός που έχουν την ίδια συχνότητα και κάθετα μεταξύ τους επίπεδα δόνησης	69
5.4	Διάταξη επίπεδου πολυροσκοπίου	83
5.5	Πλήρης διάταξη απλού κυκλικού πολυροσκοπίου	88
5.6	Η ανάλυση του διανύσματος του φωτός καθώς αυτό εισέρχεται στο υπό	89

φόρτιση μοντέλο σε ένα επίπεδο πολαροσκόπιο

5.7	Οι συνιστώσες των διανυσμάτων φωτός που περνάνε μέσα από τον αναλυτή σε ένα επίπεδο πολαροσκόπιο	89
5.8	Ισοκλινείς γραμμές από δακτύλιο που δέχεται θλιπτικό φορτίο, όπως αυτές διαμορφώνονται για 6 διαφορετικές γωνίες μεταξύ αναλυτή – πολωτή. [48 σελ. 9]	92
5.9	α) Διαμόρφωση του χάρτη των ισοκλινών για κάθε μια από τις 6 γωνίες από 0 έως 90 μοίρες με διαφορά 15 μοιρών. β) Χάρτης των ισοστατικών γραμμών όπως αυτός διαμορφώνεται από τις ισοκλινείς [48 σελ. 9]	94
5.10	Τυπική ευθεία βαθμονόμησης όπως αυτή εξάγεται από τον εφελκυσμό του δοκιμίου	97
5.11	Ευθεία βαθμονόμησης για δοκίμιο ρητίνης	104
5.12	Τα δύο δοκίμια όπως κατασκευάζονται σε σχέση με τη πλατφόρμα	105
5.13	Ανάλυση Intensity για το δακτύλιο. Οι περιοχές με το ίδιο χρώμα παρουσιάζουν ίδια διαφορά μεταξύ κυρίων τάσεων	111
5.14	Ανάλυση Shear XY. Υπάρχει φανερή ομοιότητα με την αντίστοιχη εικόνα από το επίπεδο πολαροσκόπιο	112
5.15	Ο κánaβος που δημιούργησε το ANSYS για τη φλάντζα	115
5.16	Ανάλυση Intensity για τη φλάντζα. Οι περιοχές με το ίδιο χρώμα παρουσιάζουν ίδια διαφορά μεταξύ κυρίων τάσεων	116
6.1	Φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος και οι τρόποι που αυτές	119

αλληλεπιδρούν μεταξύ τους

6.2 Σχηματική αναπαράσταση της βελτιωμένης διαδικασίας ανάπτυξης

121

ΠΙΝΑΚΕΣ

3.1	Μέτρηση των τροπών της συρρίκνωσης λόγω πολυμερισμού	49
5.1	Χαρακτηριστικά των ισοχρωματικών γραμμών (Isochromatic fringes)	96
5.2	Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μεθόδου της φωτοελαστικότητας και των FEA για τον δακτύλιο. Η ανοιχτή πράσινη περιοχή των FEA αντιστοιχεί σε fringe order 2,35, ενώ η σκούρα πράσινη αντιστοιχεί σε fringe order 2,5.	112
5.3	Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μεθόδου της φωτοελαστικότητας και των FEA. Η γαλάζια περιοχή των FEA αντιστοιχεί σε fringe order 1, ενώ η ανοιχτή πράσινη αντιστοιχεί σε fringe order 1,22.	116

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

3.1	Φωτογραφία της πλάκας στην οποία φαίνονται τα δύο στρώματα	44
3.2	Η εικόνα που παίρνουμε για το πρώτο στρώμα μετά την ολοκλήρωση του πολυμερισμού με διαδικασία postcuring. Δεν υπάρχουν γραμμές, κάτι που δείχνει ότι είναι επίπεδο	45
3.3	Γραμμές moiré για το δοκίμιο των δύο στρωμάτων πριν το postcuring με UV	46
3.4	Γραμμές moiré για δοκίμιο δύο στρωμάτων μετά το postcuring με UV	47
3.5	Γραμμές moiré για δοκίμιο δύο στρωμάτων πριν το postcuring με θερμότητα	48
3.6	Γραμμές moiré για δοκίμιο δύο στρωμάτων μετά το postcuring με θερμότητα	48
4.1	Δοκίμια από ρητίνη και αλουμίνιο	59
5.1	Δοκίμια από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη. Το (α) είναι φτιαγμένο με τη μεγάλη επιφάνεια να είναι παράλληλη στη πλατφόρμα της μηχανής στερεολιθογραφίας ενώ το (β) η μεγάλη πλευρά από τις πλάγιες είναι παράλληλη με τη πλατφόρμα της στερεολιθογραφίας	106
5.2	Δοκίμια από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη	107
5.3	Δοκίμιο από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη. Στο σημείο A είναι εύκολο από τη θεωρία να υπολογιστεί η μη μηδενική κύρια τάση	109
5.4	Δακτύλιος υπό θλιπτικό φορτίο 500 Nt	110

5.5	Δακτύλιος υπό θλιπτικό φορτίο 500 Nt σε κυκλικό πολαροσκόπιο	111
5.6	Στην αριστερή πλευρά η πρωτότυπη φλάντζα και δεξιά το αντίγραφο της κατασκευασμένο με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας.	114
5.7	Fringe pattern όπως αποτυπώθηκε με τη βοήθεια ψηφιακής μηχανής. Το δοκίμιο υφίσταται φορτίο 65 Nt.	115

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Χρήση Μοντέλων Στερεολιθογραφίας για τη διερεύνηση της Λειτουργικής/Μηχανικής Συμπεριφοράς Προϊόντων κατά τα διάφορα Στάδια Ανάπτυξης

Από τον

Αγγελόπουλο Άγγελο

Η μέθοδος της στερεολιθογραφίας, μαζί με έναν αριθμό από άλλες πρακτικές αποτελούν μια ομάδα αναδυόμενων τεχνολογιών ταχείας πρωτοτυποποίησης που αναμένεται να παίξουν ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο στο μέλλον κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ανάπτυξης και παραγωγής προϊόντων.

Σκοπός αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση των πιθανών δυνατοτήτων χρησιμοποίησης πρωτοτύπων φτιαγμένων με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για την εκτίμηση-πρόβλεψη της μηχανικών επιδόσεων των υποψήφιων προς παραγωγή προϊόντων, ή μηχανικών εξαρτημάτων.

Χρησιμοποιήθηκε το φαινόμενο μοιρέ για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των διαστάσεων των δοκιμίων που παράγονται από τη στερεολιθογραφία. Εφαρμόστηκε η θεωρία της φωτοελαστικότητας και, μετά την απαραίτητη διερεύνηση των οπτικών ιδιοτήτων της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε, με τη βοήθεια πολαροσκοπίου πάρθηκαν φωτογραφίες οι οποίες καταδεικνύουν της περιοχές των δοκιμίων στις οποίες αναπτύσσονται μεγάλες διαφορές κυρίων τάσεων κατά τη φόρτιση. Τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με τα αριθμητικά δεδομένα που αποκομίσθηκαν από τη μέθοδο Finite Elements Analysis (FEA). Τα αποτελέσματα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό.

Επίσης μελετήθηκε η δυνατότητα μοντελοποίησης υπό κλίμακα με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για ένα απλό μοντέλο. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μοντέλου από αλουμίνιο σε συνθήκες φόρτισης υπήρξε ικανοποιητική.

ABSTRACT

“Usage of stereolithography models for the study of Functional/Mechanical behaviour of products through various development stages.”

Angelos Angelopoulos

Stereolithography method, along with a group of other practices are forming a group of emerging technologies of rapid prototyping that are expected to play a significant role in the future of product design and development process

The aim of this thesis is the investigation of possible ability of using prototypes made by stereolithography, for the assessment and prediction of the mechanical behaviour of the designs that are candidates to enter the production phase.

Moiré effect was used to test the accuracy of specimens' size that are produced through stereolithography. The theory of photoelasticity was applied and, after the necessary investigation of the optical properties of the resin that was used, a polariscope was used to take pictures that point out the specific areas of the specimen in which great principal stress differences occur, due to external loading. The experimental data were compared to those obtained from the Finite Elements Analysis (FEA) and they are in agreement in a great extend. The ability of scale prototyping was also studied for a simple model. The aluminium models behaviour prediction was satisfactory.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

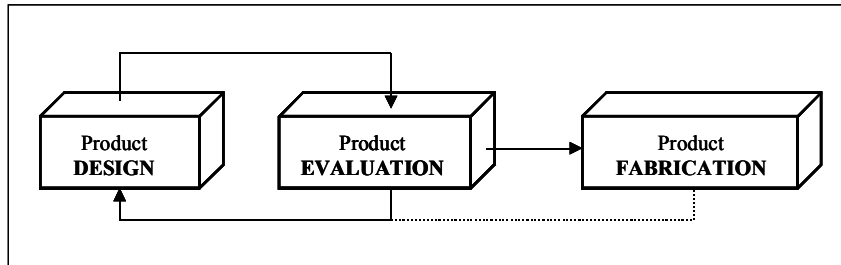
1.1 Γενικά

Μιλώντας για τη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντος θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ένα σύνολο από δραστηριότητες που ξεκινάει από την αντίληψη μιας ευκαιρίας στην αγορά και τελειώνει με τη παραγωγή, πώληση και παράδοση ενός προϊόντος. Από τη σκοπιά των επενδυτών σε μια μη κερδοσκοπική εταιρία, η επιτυχημένη ανάπτυξη προϊόντων, έχει σαν αποτέλεσμα προϊόντα που μπορούν να παραχθούν και να πωληθούν κερδοφόρα, όμως η κερδοφορία είναι δύσκολο να επιτευχθεί γρήγορα και άμεσα. Μεγέθη όπως η ποιότητα το κόστος και χρόνος ανάπτυξης του προϊόντος καθώς επίσης και το κόστος του ίδιου του προϊόντος, είναι πολύ σημαντικά για την επίτευξη κέρδους και χρησιμοποιούνται επανειλημμένα για την εκτίμηση της απόδοσης μιας προσπάθειας ανάπτυξης προϊόντος.

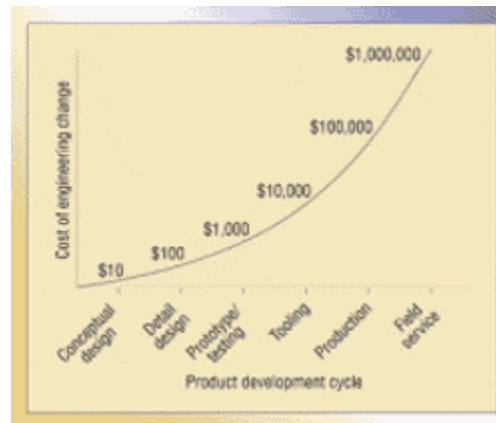
Η επίτευξη μιας καλής απόδοσης στα παραπάνω μεγέθη δεν είναι ένα μονοδιάστατο πρόβλημα με το οποίο ασχολείται αποκλειστικά ένας τομέας της επιχείρησης, όπως ας πούμε το marketing, ή ο σχεδιασμός ή η παραγωγή. Είναι ένα πρόβλημα ανάπτυξης του προϊόντος που περιλαμβάνει όλες αυτές τις λειτουργίες. Η αυξημένη ζήτηση στις αγορές απαιτεί από ολόένα και περισσότερες εταιρίες να υιοθετούν στρατηγικές και μεθοδολογίες για τη παραγωγή καλύτερων προϊόντων, σε μικρότερο χρόνο και με τον φθηνότερο τρόπο μέσα από μια επιταχυνόμενη διαδικασία.

ανάπτυξης. Ειδικότερα σε αγορές υψηλής ανάπτυξης με μικρούς κύκλους ζωής προϊόντων, η ταχύτητα της διαδικασίας ανάπτυξης των προϊόντων μπορεί να έχει ένα σημαντικό αντίκτυπο στην εμπορική επιτυχία του προϊόντος και κατ'επέκταση στα κέρδη της εταιρίας.

Μια τυπική διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος μπορεί να διαιρεθεί χονδρικά σε τρία στάδια: Σχεδίαση, αξιολόγηση και παραγωγή (Σχ. 1.1). Οι διαδικασίες σχεδιασμού και αξιολόγησης επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί η επιλογή ενός ικανοποιητικού σχεδίου. Μια από τις βασικές φάσεις στη διαδικασία ανάπτυξης, είναι η επιλογή του καλύτερου σχεδίου μέσα από ένα σύνολο επιλογών. Η οπτικοποίηση του υπό ανάπτυξη προϊόντος όπως και η ικανότητα πρόβλεψης της ολικής συμπεριφοράς του προϊόντος στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας του, στις αρχικές φάσεις της ανάπτυξης μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή ενός επιτυχημένου σχεδίου. Εάν ένα σχέδιο έχει εκτιμηθεί σωστά, η παραγωγή του προϊόντος μπορεί να ξεκινήσει χωρίς περαιτέρω αλλαγές. Στην αντίθετη περίπτωση, η φάση της παραγωγής μπορεί να αποκαλύψει απρόσμενες συμπεριφορές και φαινόμενα που μπορούν να διορθωθούν μόνο με ακριβές και μακροχρόνιες αλλαγές στα αρχικά σχέδια. Λόγω του ότι οι αλλαγές που γίνονται σε τελικά στάδια της ανάπτυξης του προϊόντος κοστίζουν και είναι δύσκολες στην εφαρμογή, είναι βασικό να γίνεται διεξοδική εκτίμηση και επανεξέταση του σχεδίου πριν την έναρξη της παραγωγής.



Σχήμα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα που καταδεικνύει την απότομη αύξηση του κόστους όταν οι αλλαγές στο σχεδιασμό γίνονται σε μια ύστερη φάση της διαδικασίας ανάπτυξης. [Πηγή Krouse Associates, USA]

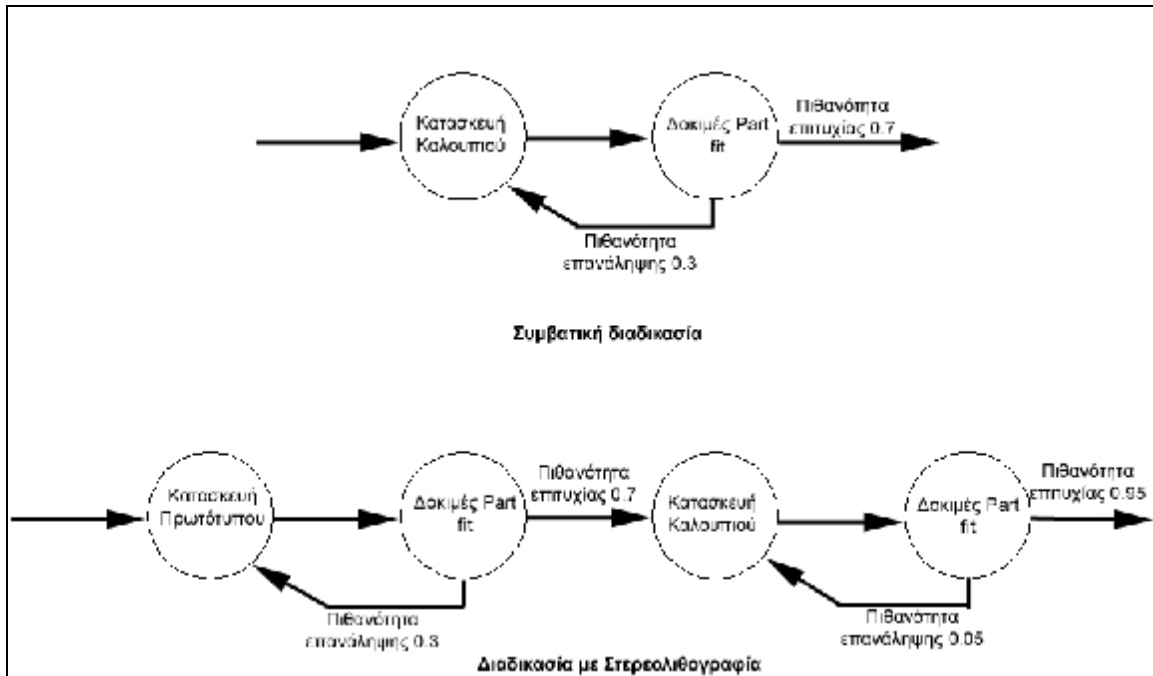
Σημαντική είναι η εξοικονόμηση πόρων που γίνεται φτιάχνοντας ένα μοντέλο, λόγω της μείωσης των δαπανηρών επαναλήψεων της κατασκευής του προϊόντος στη τελική του μορφή. Το να αφιερώνονται χρόνος και χρήματα για δοκιμές πάνω σε ένα πρωτότυπο μπορεί να επιτρέψει στην ομάδα που ασχολείται με το σχεδιασμό και την ανάπτυξη, να ανιχνεύσει προβλήματα που μπορούν να ανιχνευθούν μόνο μετά το πέρας μιας δραστηριότητας που μπορεί να είναι δαπανηρή, όπως π.χ. η κατασκευή ενός καλουπιού.

1.2 Πρωτότυπα

Ως πρωτότυπο θα μπορούσε να οριστεί «η προσέγγιση ενός προϊόντος, κατά μια ή περισσότερες διαστάσεις που μας ενδιαφέρουν». Η πρωτοτυποποίηση είναι η διαδικασία δημιουργίας τέτοιων προσεγγίσεων του προϊόντος.

Τα πρωτότυπα είναι ισχυρά και ευρέως διαδεδομένα μέσα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση σχεδίων για υποψήφια προς παραγωγή προϊόντα, και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η μία είναι πρωτότυπα που δημιουργούνται με τη βοήθεια Η/Υ που είναι τα αναλυτικά. Η άλλη είναι τα φυσικά πρωτότυπα, κατασκευασμένα με παραδοσιακές ή και καινούργιες μεθόδους. Σε αυτές τις καινούργιες μεθόδους εντάσσεται και η σχετικά νέα ομάδα τεχνολογιών της ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι ένα σύνολο από μεθόδους με τις οποίες παράγονται τρισδιάστατα μοντέλα-αντίγραφα σχεδίου που έχει γίνει με τη χρήση Η/Υ (CAD). Τα υλικά καθώς και οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτού του



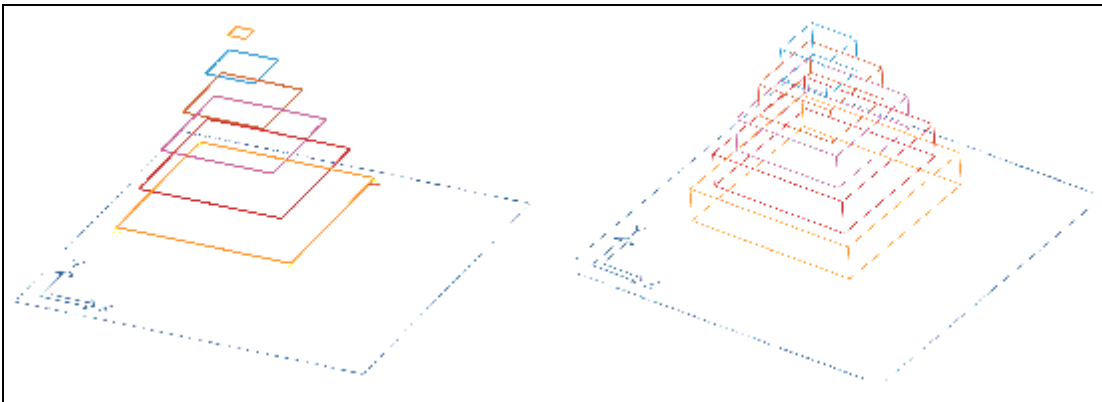
Σχήμα 1.3 Σχηματική απεικόνιση των αλλαγών που επιφέρει στη διαδικασία ανάπτυξης η κατασκευή ενός πρωτότυπου

σκοπού ποικίλουν. Ενδεικτικά αναφέρουμε τη χρήση διαφόρων τύπων κονιαμάτων όπως πλαστικών και μεταλλικών, χαρτιού, και διαφόρων άλλων υγρών και στερεών υλικών. Υπάρχει επίσης και ο διαχωρισμός των μεθόδων σε προσθετικές και αφαιρετικές, ανάλογα με το πώς διαμορφώνεται το υπό κατασκευή μοντέλο, είτε με την άθροιση δηλαδή υλικού, είτε με την σταδιακή αφαίρεση του από ένα προϋπάρχοντα όγκο.

Παρότι η μορφή της πρώτης ύλης διαφέρει αρκετά και ο αριθμός των αντίστοιχων τεχνολογιών είναι αρκετά μεγάλος, σε όλες της μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης ακολουθούνται τα ίδια βασικά τέσσερα στάδια. Η διαδικασία ξεκινάει με τον σχεδιασμό σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ενός τρισδιάστατου μοντέλου CAD (Computer Aided Design) του αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Για την περιγραφή της γεωμετρίας του κομματιού χρησιμοποιούνται επιφάνειες, οι οποίες πρέπει να σχηματίζουν ένα απόλυτα “κλειστό” μοντέλο έτσι ώστε να ορίζεται ξεκάθαρα

ο όγκος του υπό κατασκευή κομματιού. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό μετατρέπεται σε αρχείο STL, το οποίο αναπαριστά τις τρισδιάστατες επιφάνειες, ως μια ομάδα επίπεδων τριγώνων. Ο αριθμός των τριγώνων που απαιτούνται για την αναπαράσταση αυτή, είναι ανάλογος με το βαθμό καμπυλότητας των κλειστών επιφανειών και την απαιτούμενη ακρίβεια στην απόδοσή τους.

Στο δεύτερο στάδιο το STL αρχείο “τεμαχίζεται” σε λεπτές οριζόντιες εγκάρσιες τομές, υπολογίζονται δηλαδή με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο οι διαδοχικές τομές που πρέπει να κατασκευασθούν και να συγκολληθούν έτσι ώστε να παραχθεί το τελικό αντικείμενο. Αυτές αναπαράγονται κατά το τρίτο στάδιο με την διαδοχική κατασκευή - μέσω εναπόθεσης, κοπής, στερεοποίησης ή σύντηξης της πρώτης ύλης- και συγκόλληση των αντίστοιχων στρώματων, μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου.



Σχήμα 1.4 Αναπαράσταση πυραμίδας σε τομές και στρώματα

Τέλος ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται, συνήθως θα χρειασθεί και περαιτέρω επεξεργασία, προκειμένου να καθαριστεί από το επιπλέον υλικό και από τα

πιθανά στηρίγματα που το ενίσχυαν ή συγκρατούσαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του.

Η δυνατότητες των τεχνολογιών ταχείας πρωτοτυποποίησης, και ειδικά της στερεολιθογραφίας, και ο ρόλος που μπορούν να παίξουν στην αναμόρφωση της διαδικασίας σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων, έχουν γίνει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας. [1]-[3]. Επίσης έχουν μελετηθεί θέματα όπως η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων ταχείας πρωτοτυποποίησης [4], ο χρόνος κατασκευής πρωτοτύπων [5], και η πιθανή εφαρμογή της μεθόδου σε τομείς όπως η κατασκευή καλουπιών και η διαδικασία reverse engineering [6]-[12].

Αρκετή δουλειά έχει γίνει για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών που παράγονται κατά τις διαδικασίες ταχείας πρωτοτυποποίησης, καθώς και για τη διακρίβωση του βαθμού ακριβείας των παραγομένων πρωτοτύπων. Οι Fuh J.Y.H., Lu L., Tan C. C., Shen Z. X. και Chew έχουν ασχοληθεί εκτεταμένα με τη μελέτη του τρόπου πολυμερισμού των υλικών [13]-[16] καθώς και με τα αίτια των φαινομένων στρέβλωσης που παρατηρούνται στα πρωτότυπα τα οποία είναι υπεύθυνα για το μειωμένο βαθμό ακριβείας τους [17], [18]. Οι ίδιοι, όπως και οι Zhou J. G., Herscovici D. και Chen έχουν ασχοληθεί με την παραμετρική αντιμετώπιση των αποκλίσεων που παρατηρούνται [19], [20]. Οι διάφοροι τύποι ρητινών που διατίθενται στο εμπόριο μελετώνται ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες [23].

Προσπάθειες έχουν γίνει, για να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα στερεολιθογραφίας σε διαδικασίες λειτουργικών πειραμάτων (functional testing) σε συνδυασμό με τη θεωρία ομοιότητας (similarity theory), δίνοντας έτσι μια νέα διάσταση στη δυνατότητα

αξιοποίησης τους πέρα από τις δυνατότητες τρισδιάστατης εποπτείας οι οποίες αξιοποιούνται μέχρι στιγμής [31]-[33].

Από τη στιγμή που παρατηρήθηκαν οι φωτοελαστικές ιδιότητες των πρωτοτύπων από ρητίνη, έχει γίνει σημαντική ερευνητική προσπάθεια, περισσότερο για το καθορισμό των οπτικών χαρακτηριστικών της. Οι Curtis J.D., Hanna S. D., Patterson E. A. και Taroni M., έχουν ασχοληθεί με την μελέτη συγκεκριμένου τύπου ρητίνης, την SL 5170. με αντικείμενο την εύρεση της φωτοελαστικής της σταθεράς, και επίσης την αντιμετώπιση προβλημάτων ακρίβειας που προκύπτουν.[34]. Σε άλλες εργασίες που έχουν γίνει πάνω στο αντικείμενο, οι Zenina, A., Dupré, J. C. Και Lagarde, A., εφάρμοσαν το μετασχηματισμό Fourier για το διαχωρισμό ισοχρωματικών και ισοκλινών γραμμών,[35] ενώ οι Steinchen, W., Kramer, B. and Kupfer, G., αντιμετωπίζουν το θέμα της μείωσης του κόστους με τη χρήση της φωτοελαστικότητας σε πρωτότυπα στερεολιθογραφίας [36].

Οι παραπάνω εργασίες έχουν ασχοληθεί κυρίως με τη μελέτη συγκεκριμένου τύπου ρητινών. Αυτό είναι ένα βασικό πρόβλημα, αφού οι τύποι ρητινών είναι πολλοί και διαφορετικοί μεταξύ τους και τα συμπεράσματα που ισχύουν για ένα τύπο δεν είναι απαραίτητο ότι ισχύουν και για τους άλλους. Έτσι θα πρέπει να επαναλαμβάνεται μια βασική πειραματική διαδικασία για κάθε νέο τύπο ρητίνης που χρησιμοποιείται.

1.3 Σκοπός και αντικείμενο της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση των πιθανών δυνατοτήτων χρησιμοποίησης πρωτοτύπων φτιαγμένων με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για την εκτίμηση-πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υπονήφιων προς παραγωγή προϊόντων.

Το Κεφάλαιο 2 είναι μια γενική αναφορά στη μέθοδο της στερεολιθογραφίας και στις αρχές λειτουργίας της, καθώς και κάποιες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται πρωτότυπα.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται ο μηχανισμός που δημιουργεί το φαινόμενο μοιρέ και παρουσιάζονται συνοπτικά οι μαθηματικές/γεωμετρικές σχέσεις που το διέπουν. Αναλύεται η θεωρία διελασματικών που χρησιμοποιείται στη πειραματική μέτρηση της στρέβλωσης που παρουσιάζουν τα δοκίμια στερεολιθογραφίας.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μέθοδος της ομοιότητας και αναλύεται η χρήση της σε σχέση με τα πρωτότυπα στερεολιθογραφίας

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η θεωρία της φωτοελαστικότητας, ερευνώνται πειραματικά οι φωτοελαστικές ιδιότητες της ρητίνης Somos 7110, και υπάρχει πειραματική εφαρμογή της μεθόδου για το προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς μοντέλου. And ruin the in the

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται μια βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού προϊόντων που λαμβάνει υπόψη της τη χρήση πρωτοτύπων στερεολιθογραφίας σε συνδυασμό και σύγκριση με αναλυτικά μοντέλα.

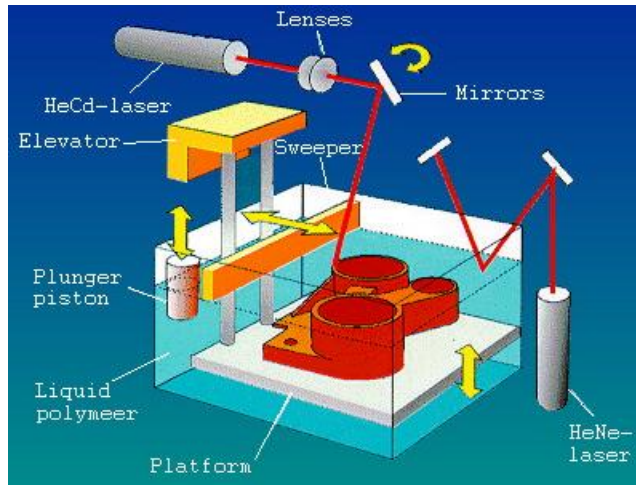
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Αρχές της Μεθόδου

Η Στερεολιθογραφία είναι μια από τις πιο διαδεδομένες διαδικασίες ταχείας πρωτοτυποποίησης. Με την τεχνική αυτή, κατασκευάζονται τρισδιάστατα μοντέλα από υγρό φωτοευαίσθητο πολυμερές (ρητίνη), το οποίο στερεοποιείται όταν εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το αντικείμενο κτίζεται πάνω σε μία πλατφόρμα, η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα κάδο υγρής εποξειδικής ή ακρυλικής ρητίνης.

Η κατασκευή ξεκινά με τη πλατφόρμα ελάχιστα κάτω από τη στάθμη της ρητίνης. Ένα χαμηλής εντάσεως, αλλά υψηλής συγκέντρωσης UV Laser σαρώνει την πρώτη εγκάρσια τομή του αντικειμένου, στερεοποιώντας (πολυμερίζοντας) με αυτό τον τρόπο το πρώτο λεπτό στρώμα ρητίνης, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια παραμένει σε υγρή μορφή. Στη συνέχεια η πλατφόρμα βυθίζεται κατά ένα συγκεκριμένο βάθος (κυμαίνεται μεταξύ 0.10 και 0.25 mm) μέσα στη δεξαμενή και καλύπτεται από ένα νέο στρώμα υγρής ρητίνης. Ακολουθεί η σάρωση της δεύτερης τομής του αντικειμένου, έτσι ώστε να σχηματισθεί το δεύτερο στρώμα στερεοποιημένης ρητίνης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ώσπου το μοντέλο να ολοκληρωθεί μέσα στο κάδο της ρητίνης. Τέλος το πρωτότυπο αποκολλάται από τη πλατφόρμα, καθαρίζεται από τα υπολείμματα ρητίνης και τοποθετείται σε ένα φούρνο υπεριωδών ακτίνων για περαιτέρω ωρίμανση (post-cure).



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου της στερεολιθογραφίας

2.2 Βασικές Παράμετροι για την κατασκευή μοντέλων Στερεολιθογραφίας

Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζονται τα κομμάτια με την τεχνική της στερεολιθογραφίας, επηρεάζεται από κάποιες βασικές παραμέτρους, που αφορούν κυρίως τη λειτουργία του laser. Αυτές είναι:

1) Έκθεση του laser (laser exposure)

Η στερεοποίηση της υγρής ρητίνης εξαρτάται από την οπτική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ή αλλιώς «έκθεση» (exposure) που επέρχεται από την κίνηση του

εστιασμένου laser πάνω στην επιφάνεια της ρητίνης. Αν αυτό το σημείο σαρώνει την επιφάνεια της ρητίνης με ταχύτητα V_s τότε η ισχύς P_L του laser επιφέρει μια μέγιστη έκθεση, E_{\max} που δίδεται από το τύπο:

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2}{p}} \frac{P_L}{W_o V_s} \quad \text{Εξ. 2.1}$$

Κατά τη διαδικασία της Στερεολιθογραφίας, το αρχικό υλικό είναι ένα υγρό σε ένα βαθύ κάδο, που μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει άπειρο βάθος. Το πρώτο στρώμα των στηρίξεων (supports) εδράζεται πάνω στη μεταλλική πλατφόρμα, και τα ακόλουθα στρώματα επικολλούνται πάνω σε προηγούμενες διατομές. Σε αυτή τη διαδικασία, το πάχος του στρώματος που πρέπει να πολυμεριστεί δίδεται από το ποσό του υγρού που έχει απλωθεί πάνω στο μοντέλο, και οποιαδήποτε περίσσια ακτινοβολία laser διαπεράσει αυτό το στρώμα συμβάλλει στην αύξηση του πολυμερισμού των προηγούμενων στρωμάτων.

Σύμφωνα με το νόμο απορρόφησης των Beer-Lambert, η έκθεση laser $E(\frac{mJ}{cm^2})$

μειώνεται εκθετικά ανάλογα με το βάθος z με τον ακόλουθο τρόπο:

$$E(z) = E_o \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right)$$

όπου το D_p είναι το «βάθος διείσδυσης» (penetration depth) της ρητίνης στο μήκος κύματος του laser και το E_o είναι η έκθεση του laser στην επιφάνεια της ρητίνης όπου $z = 0$. Στη πράξη, ο πολυμερισμός δεν προχωράει πέρα από ένα περιορισμένο βάθος όπου η έκθεση του laser είναι κάτω από ένα όριο, και είναι πολύ αδύναμη για να προκαλέσει πολυμερισμό. Το όριο πάνω από το οποίο η υγρή ρητίνη παίρνει ζελατινώδη μορφή, είναι γνωστό ως «κρίσιμη έκθεση» (critical exposure) E_c .

Η έκθεση (exposure) είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια ανά επιφάνεια. Είναι ανάλογη με την δύναμη του laser (που συνήθως είναι σταθερή, με μικρές διακυμάνσεις), και αντιστρόφως ανάλογη με τη παράγωγο του πλάτους της ακτίνας laser στην υγρή επιφάνεια και την ταχύτητα σάρωσης του laser.

2) Βάθος πολυμερισμού (curing depth)

Περνώντας μια ακτίνα laser πάνω από μια επιφάνεια ρητίνης παράγεται μια ίνα πολυμερισμένης ρητίνης πάχους L_w και βάθους πολυμερισμού C_d (cure depth). Και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από την μέγιστη ακτινοβολία που εκπέμπεται και από τη ταχύτητα της σάρωσης.

Το βάθος πολυμερισμού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά απορρόφησης του φωτοπολυμερούς. Από την εξίσωση 2 βλέπουμε ότι η έκθεση που επέρχεται σε βάθος z είναι:

$$E(z) = E_{\max} * \exp\left(\frac{-z}{D_p}\right) \quad \text{Εξ. 2.3}$$

Για να πάρει η ρητίνη ζελατινώδη μορφή, η τιμή του $E(z)$ θα πρέπει να αγγίξει τουλάχιστον ένα συγκεκριμένο όριο έκθεσης E_c , όταν έχουμε $z = C_d$

$$E(C_d) = E_{\max} * \exp\left(\frac{C_d}{D_p}\right) = E_c \quad \text{Εξ. 2.4}$$

από το οποίο προκύπτει η εξάρτηση του C_d από την μέγιστη έκθεση στην επιφάνεια της ρητίνης:

$$C_d = D_p \ln\left(\frac{E_{\max}}{E_c}\right) \quad \text{Εξ. 2.5}$$

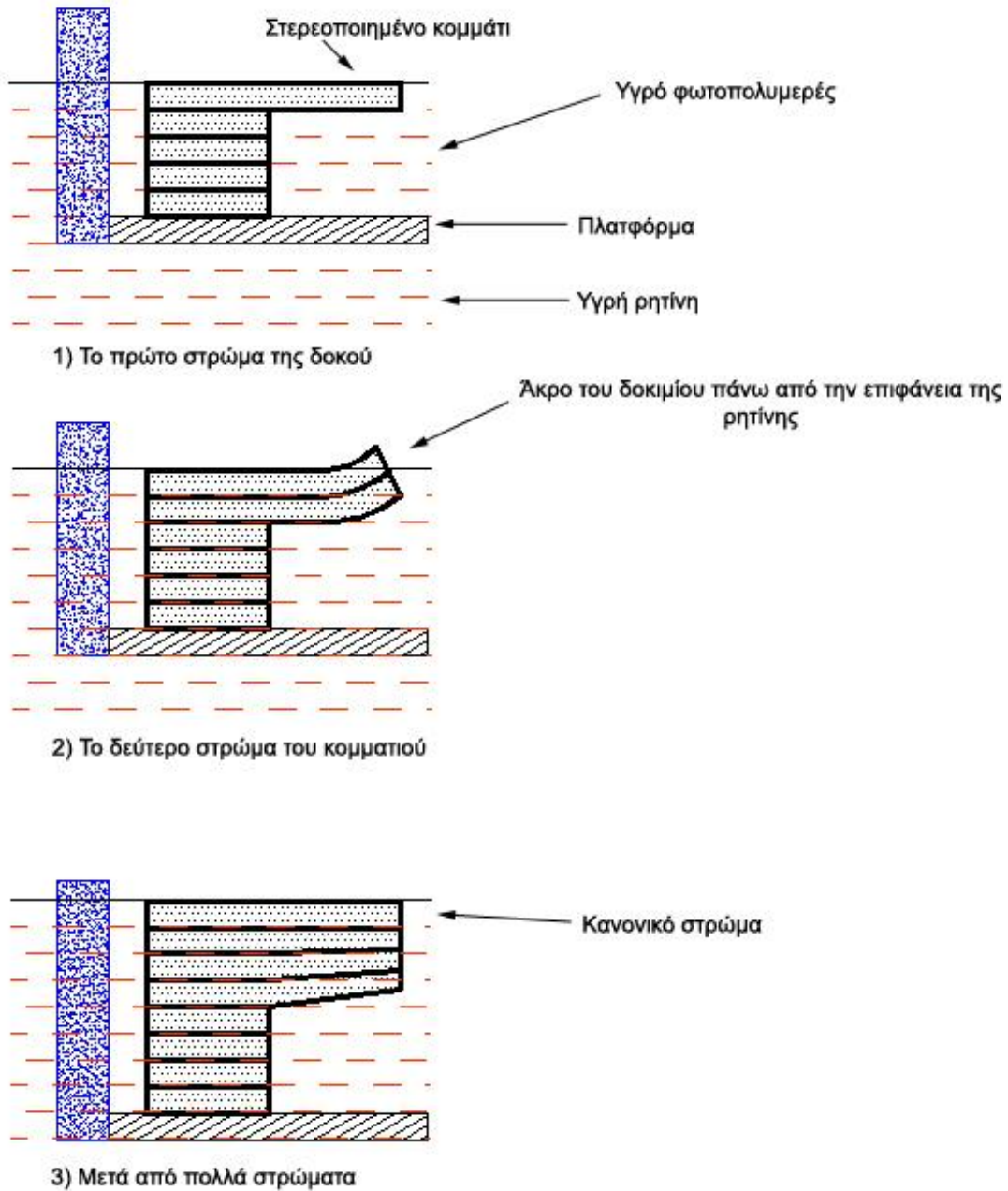
2.3 Η διαταραχή curl

Το “curl” είναι ένα είδος διαταραχής που μπορεί να εμφανιστεί σε όλες τις διαδικασίες ταχείας πρωτοτυποποίησης που χρησιμοποιούν διαδοχικά στρώματα για τη κατασκευή κομματιών, όπου το υγρό που στερεοποιείται υφίσταται συρρίκνωση. Η

Εικόνα 1 μας δείχνει τη σειρά των βημάτων που οδηγούν στη διαταραχή “curl”. Από πειράματα έχει αποδειχθεί ότι το πρώτο στρώμα που δημιουργείται, για το σχηματισμό μιας μη υποστηριζόμενης προεξέχουσας δοκού, δεν θα δείξει αρχικά κάποια παραμόρφωση προς τα πάνω. Αντίθετα, για το αρχικό στρώμα, οι δυνάμεις συρρίκνωσης θα τείνουν να το παραμορφώνουν ελαφρά προς τα κάτω, ειδικά σε μεγάλες εκθέσεις. Το στρώμα που είναι μόνο του, χωρίς υποστήριξη, είναι ελεύθερο να συρρικνωθεί χωρίς να επιφέρει αλλού είδους παραμορφώσεις. Όμως το δεύτερο και όλα τα επακόλουθα στρώματα επικολλώνται όλα στο αμέσως από κάτω στρώμα. Αν υπάρχει κάποια συρρίκνωση μετά τη επικόλληση των υπερκείμενων στρωμάτων, αναπτύσσεται καμπτική ροπή, που μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση των μη υποστηριγμένων άκρων των στρωμάτων.

2.4 Πάχος στρωμάτων

Το πρόγραμμα τεμαχισμού μετατρέπει τα τρισδιάστατα αρχεία STL σε διατομές δύο διαστάσεων. Αυτές οι διατομές μπορούν να γίνουν με βάση οποιονδήποτε από τους άξονες του CAD, δηλαδή τους x, y και z. Ο άξονας τεμαχισμού είναι λοιπόν εξορισμού κάθετος στα επίπεδα που δημιουργούνται από αυτή τη διαδικασία. Στη διαδικασία αυτή ανατίθεται σαν παράμετρος το πάχος του στρώματος με βάση το οποίο γίνεται η κατάτμηση. Το πραγματικό πάχος των στρωμάτων δημιουργείται από την κίνηση της πλατφόρμας κατά το ίδιο μήκος για κάθε στρώμα. Αυτή η κίνηση μετατρέπει τις διατομές δύο διαστάσεων σε στρώματα τριών διαστάσεων των πραγματικών προτοτύπων.



Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση του πως δημιουργείται το curl 1) Το πρώτο στρώμα της δοκού 2) Το δεύτερο στρώμα και τέλος 3) Μετά από πολλά στρώματα

Το πάχος στρώματος (layer thickness) ξεκινάει από τα 0.1 mm φτάνει τα 0.2 mm. Ο χρόνος κατασκευής ενός κομματιού δεν γίνεται μικρότερος όσο αυξάνεται το πάχος στρώματος.

Τα πρώτα στρώματα που δεν είναι πολύ καλά υποστηριγμένα, έχουν τη τάση να υπερβαίνουν τη επιφάνεια της ρητίνης καθώς συρρικνώνονται. Καθώς έχουμε την πρόσθεση περισσότερων στρωμάτων παρατηρείται ένα φαινόμενο αυτοδιόρθωσης, καθώς λιγότερη υγρή ρητίνη μένει πάνω από τα σημεία που παρατηρείται έντονα το φαινόμενο, και το ήδη συμπαγές κομμάτι που βρίσκεται από κάτω μπορεί να αντέξει καλύτερα τις δυνάμεις που αναπτύσσονται.

Ο χρόνος που χρειάζεται για να φτιαχτεί ένα κομμάτι εξαρτάται από ορισμένα χαρακτηριστικά της ρητίνης που χρησιμοποιείται, τη ταχύτητα των καθρεφτών που χρησιμοποιούνται στο μηχανισμό, την ισχύ και το μήκος κύματος του laser και τη ταχύτητα του περάσματος της λεπίδας πάνω από το δοκίμιο που εξαρτάται από το ιξώδες της ρητίνης, της τάσεις που υπάρχουν στην επιφάνεια της και γενικά από τα χαρακτηριστικά του συστήματος του recoating.

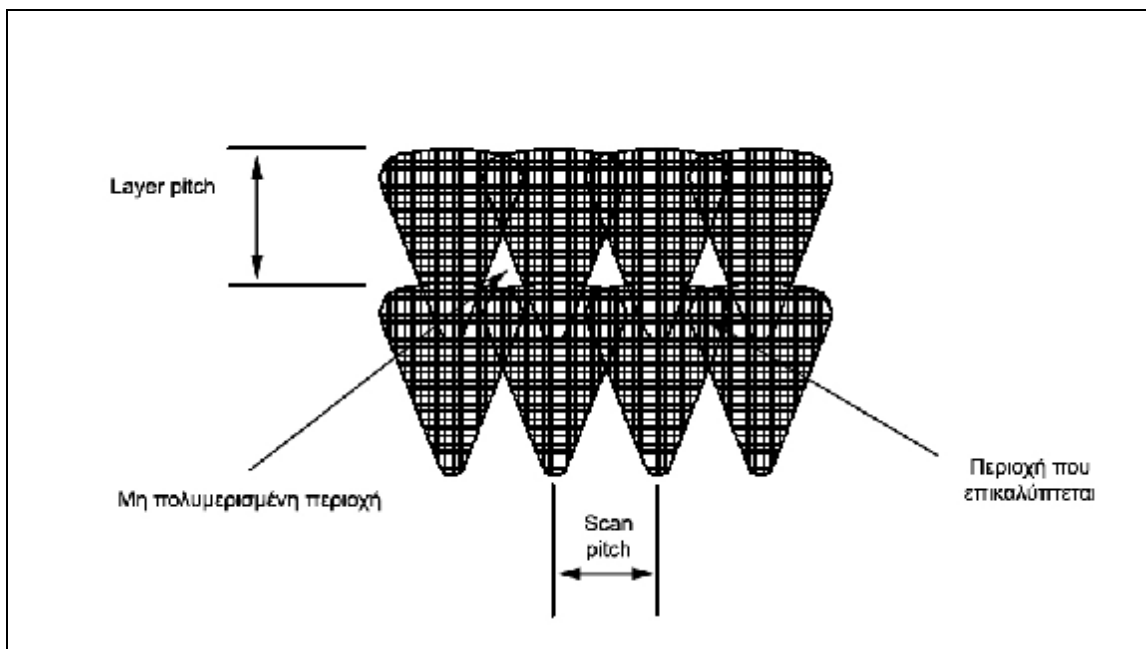
2.5 Postcuring

Μετά την έξοδο του από τη μηχανή της στερεολιθογραφίας, το μοντέλο δεν έχει πολυμεριστεί ακόμα σε επαρκή βαθμό, και έτσι βρίσκεται σε μια κατάσταση που ονομάζεται “green”. Μεγάλο μέρος της δύναμης ενός μοντέλου στερεολιθογραφίας αποκτάται με επιπρόσθετες του λέιζερ εκθέσεις. Έτσι τα green μοντέλα υφίστανται μια περαιτέρω επεξεργασία που λέγεται postcuring για να ολοκληρωθεί η διαδικασία του πολυμερισμού τους και για να βελτιώσουν την τελική μηχανική αντοχή του πρωτοτύπου.

Το postcuring επιτυγχάνεται με τη χρήση συνεχούς υπεριώδους φωτός. Το μοντέλο τοποθετείται σε ειδικό θάλαμο όπου δέχεται υπεριώδη ακτινοβολία για κάποιες ώρες (1-2 ώρες για τα μικρά κομμάτια, έως 10 ώρες για τα μεγάλα). Επίσης το postcuring γίνεται με φυσικό τρόπο αν το κομμάτι αφεθεί σε μέρος όπου υπάρχει ηλιακό φως για μία με δύο εβδομάδες.

Κατά τη διαδικασία του post-curing εμφανίζονται προβλήματα συρρίκνωσης των πρωτοτύπων. Αυτό οφείλεται στο ότι μη πολυμερισμένη ρητίνη που έχει παγιδευτεί σε θύλακες μέσα στο πρωτότυπο αρχίζει να πολυμερίζεται λόγω της έκθεσης στις ακτίνες UV, που προκαλούν επίσης και αύξηση της θερμικής επέκτασης και της συρρίκνωσης. Έχει βρεθεί ότι το μέγεθος της συρρίκνωσης που οφείλεται στο post-curing μειώνεται όταν αυξάνεται ο βαθμός πολυμερισμού κατά τη διάρκεια μορφοποίησης του πρωτοτύπου [8]. Έχει βρεθεί επίσης ότι η συρρίκνωση που εμφανίζεται συσχετίζεται με το ρυθμό σάρωσης του ίδιου του laser [23], καθώς επίσης και με το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ των εκθέσεων στο laser [26]. Γενικά μεγάλος χρόνος κατασκευής ενός κομματιού ισοδυναμεί με καλύτερη τελική ποιότητα, αλλά αυτό έρχεται σε αντίθεση με το χαρακτήρα της «ταχύτητας» που έχει η συγκεκριμένη πρακτική.

Τα προβλήματα αυτά γίνεται προσπάθεια να επιλυθούν με τη δημιουργία νέων draw styles [28].



Σχήμα 2.3 Διατομή της πολύ-στρωματικής κατασκευής του δοκιμίου ρητίνης

2.6 Εφαρμογές της μεθόδου

Η στερεολιθογραφία παράγει τρισδιάστατα πρωτότυπα από ένα ηλεκτρονικό σχέδιο. Αυτό υπαγόρευσε ουσιαστικά και την πρώτη και πιο διαδεδομένη χρήση αυτού του είδους των πρωτοτύπων, την τρισδιάστατη οπτική, απτή αναπαράσταση του σχεδίου για εποπτικούς λόγους, με εφαρμογή σε διαδικασίες σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων [54]. Έκτοτε, και παράλληλα με αυτή τη χρήση, έχουν γίνει προσπάθειες για επέκταση και σε άλλα πεδία. Μια βασική κατεύθυνση είναι η χρήση των πρωτοτύπων σε λειτουργικά πειράματα για να διαπιστωθεί ο τρόπος λειτουργίας και η απόδοση των προτεινόμενων σχεδίων και εξ' αυτών η αξιολόγησή τους. Η διαδικασία σε αυτή τη περίπτωση είναι κοινή: το πρωτότυπο υφίσταται κάποια μηχανική καταπόνηση που σχετίζεται με την αναμενόμενη που θα υποστεί το τελικό εξάρτημα, μετρώνται η

επιδόσεις του και στη συνέχεια με βάση αυτές τις επιδόσεις, επιχειρείται η πρόβλεψη των αντίστοιχων επιδόσεων του τελικού εξαρτήματος, με τη χρήση της θεωρίας της ομοιότητας (similarity theory) [39]-[42].

Μια άλλη βασική κατεύθυνση είναι η συμμετοχή πρωτοτύπων για κατασκευή καλουπιών, κυρίως σε συνδυασμό με τη μέθοδο του vacuum casting, για μικρές παρτίδες ενός προϊόντος, με εφαρμογή της αντίστροφης μηχανικής [8]. Τέλος, τα πρωτότυπα ταχείας πρωτοτυποποίησης έχουν μια αυξανόμενη συμμετοχή στην εκπαίδευση, με διάφορους τρόπους [13], [51], [53].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MOIRE. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΡΗΤΙΝΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ MOIRE.¹

3.1 Εισαγωγικά

Το φαινόμενο moiré παρουσιάζεται όταν δύο αρκετά όμοιες αλλά όχι ακριβώς ίδιες σειρές γραμμών, που ισαπέχουν μεταξύ τους, τοποθετούνται στο χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε η μια να είναι ορατή μέσα από την άλλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παρουσία ενός οπτικού φαινομένου κατά το οποίο παρουσιάζονται γραμμές.

Οι σειρές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γραμμών μπορούν να είναι ένα σύνολο από παράλληλες γραμμές, ένα σύνολο από ακτινικές γραμμές που ξεκινάνε από ένα κοινό σημείο, μια σειρά από ομόκεντρους κύκλους, ή ένα σχήμα από τελείες. Στην ανάλυση τάσεων, ο κύριος τύπος γραμμών που χρησιμοποιείται είναι οι παράλληλες γραμμές. Αυτό το σύνολο γραμμών λέγεται *πλέγμα (grating)*. Η πυκνότητα των γραμμών που χρησιμοποιείται σε αυτή τη τεχνική ποικίλει, αλλά θα πρέπει οπωσδήποτε να είναι μεγαλύτερη από 18 γραμμές ανά εκατοστό.

Για να παρουσιαστεί το φαινόμενο moiré, θα πρέπει να έχουμε δύο τέτοιες σειρές γραμμών τη μια πάνω στην άλλη. Αυτή η επικάλυψη μπορεί να γίνει είτε με οπτικά είτε με μηχανικά μέσα. Από τα δύο αυτά gratings, το ένα αναφέρεται ως model ή specimen grating και το άλλο αναφέρεται ως master ή reference grating. Αρκετά συχνά το model grating σχηματίζεται πάνω στο μοντέλο με τη βοήθεια φωτογραφικού υλικού,

¹ Η Θεωρία που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο προέρχεται κυρίως από το βιβλίο “Experimental Stress Analysis” [57].

με το οποίο επικαλύπτεται η επιφάνεια του μοντέλου, ενώ το reference grating χρησιμοποιείται ως αρνητικό.

Η απόσταση από το κέντρο της μιας γραμμής ως το κέντρο της επόμενης λέγεται βήμα (pitch), το οποίο συμβολίζεται ως p για το master grating και ως p' για το model grating.

Αν το model και το master grating είναι ίδια και αν είναι τοποθετημένα έτσι ώστε οι αδιαφανείς γραμμές του ενός συμπίπτουν με τις αδιαφανείς γραμμές του άλλου, τότε το φως θα μεταδοθεί σε μια σειρά από δεσμίδες που θα έχουν πλάτος ίσο με το ένα δεύτερο του πλάτους του pitch των gratings. Παρ'όλαυτα, χάρη στη διάθλαση και την αναλυτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού, αυτή η σειρά από γραμμές θα εμφανιστεί σαν ένα ομογενές γκριζό πεδίο με ένταση ίση περίπου με το μισό του φωτός που πέφτει πάνω στα gratings.

Αν το μοντέλο υποστεί μια ομοιογενή παραμόρφωση, θα μεταβληθεί το p' του model grating. Η μετάδοση του φωτός μέσα από τα δύο gratings θα εμφανιστεί σε μια σειρά από δέσμες διαφορετικού πλάτους που θα εξαρτάται από την επικάλυψη των σκοτεινών γραμμών με ένα διαφανές μεσοδιάστημα. Τότε, η ένταση του φωτός θα είναι συνάρτηση της θέσης, με μέγιστα στα σημεία που τα διαστήματα μεταξύ των γραμμών των δύο gratings συμπίπτουν μεταξύ τους.

Η παρατήρηση των αδιαφανών περιοχών μας αποκαλύπτει ότι μια γραμμή μοιρέ σχηματίζεται, μέσα σε ένα δεδομένο διάστημα μέτρησης, όταν το πλέγμα του μοντέλου στα όρια του διαστήματος μέτρησης παραμορφώνεται κατά την διεύθυνση της άσκησης του φορτίου κατά p που είναι το βήμα του πλέγματος master.

Αν για παράδειγμα το πλέγμα master είναι 0.1 mm και σε διάστημα 1 cm έχουμε το σχηματισμό 5 γραμμών μοιρέ, τότε η αλλαγή στο μήκος του δοκιμίου για το διάστημα του 1 cm το οποίο παρατηρούμε είναι:

$$\Delta l = np = 5 * 0.01 = 0.05mm \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος του 1 cm που χρησιμοποιήσαμε για τη μέτρηση αντιπροσωπεύει το τελικό μήκος αυτού του κομματιού του δοκιμίου, μετά την εφαρμογή δύναμης και τη παραμόρφωση του. Έτσι, μηχανική παραμόρφωση για αυτό το διάστημα θα μπορούσε να εκφραστεί ως:

$$e = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{np}{(1 - np)} = \frac{0.05}{(1 - 0.05)} = 0.0526mm \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Μέχρι στιγμής παρουσιάσαμε το πώς διαμορφώνεται οι γραμμές μοιρέ λόγω επιμήκυνσης η συστολής ενός δοκιμίου, σε κατεύθυνση κάθετη με τις γραμμές του πλέγματος master. Απλά πειράματα με ένα ζεύγος ιδίων πλεγμάτων, μας δείχνουν ότι γραμμές μοιρέ διαμορφώνονται και με περιστροφή, με τη δημιουργία γωνίας μεταξύ των ευθείων γραμμών των δύο πλεγμάτων. Παρατηρούμε ότι οι γραμμές μοιρέ είναι διχοτόμοι της αμβλείας γωνίας που σχηματίζουν οι γραμμές των δύο πλεγμάτων. Η σχέση μεταξύ της γωνίας περιστροφής θ και της γωνίας κλήσης φ των γραμμών μοιρέ, μετρημένες και οι δύο στην ίδια κατεύθυνση και σε σχέση με τις γραμμές του πλέγματος master, εκφράζονται με τον τύπο:

$$q = 2f - p$$

Εξ. 3.3

$$f = \frac{p}{2}$$

3.2 Μετρήσεις μετατόπισης για την περίπτωση *out-of-plane*

Σε ορισμένα προβλήματα επίπεδης έντασης και σε μια ευρεία περιοχή προβλημάτων περιλαμβανομένων και των επίπεδα φορτιζόμενων πλακών, οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις w είναι σημαντικές και διερευνώνται. Μια μέθοδος μοιρέ για τον καθορισμό εκτός επιπέδου μετατοπίσεων έχει αναπτυχθεί από τον Θεοχάρη και έχει εφαρμοστεί σε ένα πλήθος τέτοιων προβλημάτων. Τα βασικά στοιχεία αυτής της μεθόδου, είναι ως εξής.

Για τη μέτρηση μετατοπίσεων εκτός επιπέδου, ένα πλέγμα master τοποθετείται εμπρός από το δοκίμιο, και μια δέσμη φωτός κατευθύνεται υπό γωνία πάνω στο πλέγμα, και διαπερνώντας το φτάνει πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η σκιά του πλέγματος όπως αυτή εμφανίζεται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου λειτουργεί σαν πλέγμα master. Αν παρατηρήσουμε το δοκίμιο από μια κάθετη σε αυτό διεύθυνση, τότε θα δούμε τις γραμμές μοιρέ να σχηματίζονται, σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γραμμών του πλέγματος master και της σκιών αυτών των γραμμών. Η μετατροπή της επιφάνειας του δοκιμίου σε αδιαφανή, κατά προτίμηση λευκή, τονίζει τις σκιές, δίνοντας μας έτσι τονισμένες γραμμές μοιρέ.

Από τη γεωμετρία που παρουσιάζεται στο Σχ. 3.1 Μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ του πλέγματος master και του δοκιμίου σε συγκεκριμένο σημείο, με το τύπο:

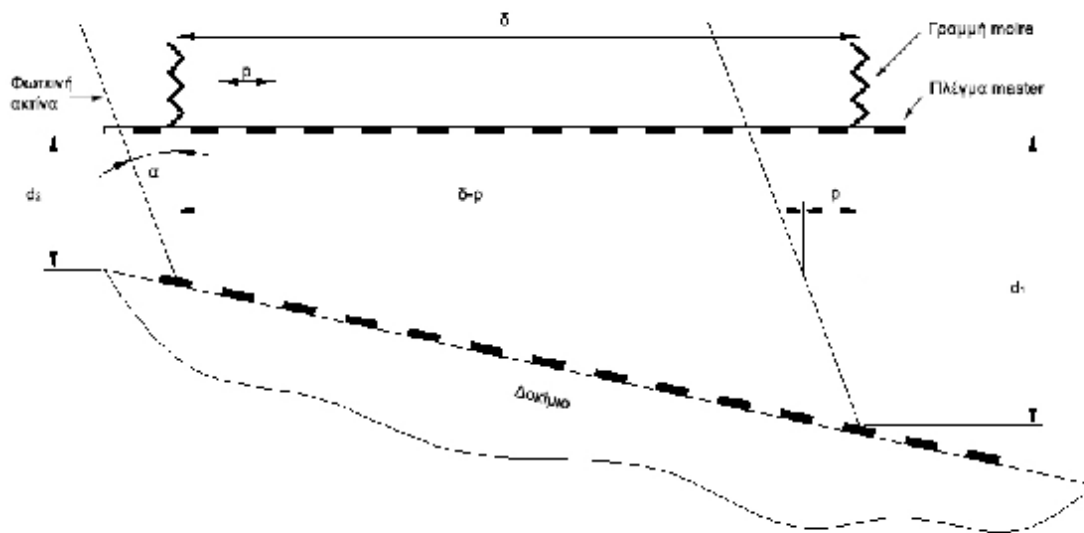
$$d_2 - d_1 = \frac{p}{\tan \alpha} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

όπου p είναι το βήμα του πλέγματος master και α είναι η γωνία της διεύθυνσης της φωτεινής ακτίνας και της επιφάνειας του πλέγματος master.

Στην πράξη, το πλέγμα master τοποθετείται σε μια μικρή απόσταση μακριά από το δοκίμιο για να διευκολύνει οποιαδήποτε πιθανή μετατόπιση του δοκιμίου προς το πλέγμα, και για να λειτουργήσει σαν σημείο αναφοράς για τη μέτρηση των μετατοπίσεων του δοκιμίου, λόγω επιβολής φορτίου. Οποιαδήποτε εμφάνιση γραμμών μοιρέ σε αυτό το σημείο αναφοράς, σηματοδοτεί την ύπαρξη ανωμαλιών, που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον τελική μέτρηση των εκτός επιπέδου μετατοπίσεων.

Αν υπάρχει ένα σημείο το οποίο είναι γνωστό ότι έχει μηδενική μετατόπιση είτε από τη θεωρία, είτε από αυθαίρετο ορισμό από εμάς, τότε το πλέγμα master τοποθετείται με τρόπο ώστε πάνω από αυτή τη σημείο να εμφανίζεται μια γραμμή μοιρέ, που ονομάζεται γραμμή μοιρέ μηδενικής τάξης. Σε όλα τα άλλα σημεία που έχουμε την εμφάνιση γραμμών μοιρέ, η μετατόπιση εκτός επιπέδου w μπορεί να βρεθεί με βάση τον τύπο:

$$w = \frac{pn}{\tan J} \quad \text{Εξ. 3.5}$$



Σχήμα 3.1 Μέθοδος moiré για μετρήσεις out-of-plane

όπου n είναι η τάξη της γραμμής moiré στο συγκεκριμένο σημείο, και J η γωνία που σχηματίζει η φωτεινή ακτίνα με την κάθετη στην επιφάνεια του δοκιμίου.

3.3 Ορισμός πεδίου μετατόπισης με τη χρήση του φαινομένου moiré

Η μορφή των γραμμών moiré και η ερμηνεία τους μπορούν να μας οδηγήσουν στην εύρεση του πεδίου μετατοπίσεων για το υπό ανάλυση δοκίμιο. Όπως αναλύθηκε, μια γραμμή moiré εμφανίζεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μέτρησης, σε ένα ομοιόμορφα παραμορφωμένο δοκίμιο κάθε φορά που το συγκεκριμένο κομμάτι μέτρησης του δοκιμίου επιμηκύνεται κατά ρ στη κάθετη διεύθυνση στις γραμμές του πλέγματος master.

Η έννοια του πεδίου μετατόπισης μπορεί να επεκταθεί στη γενική περίπτωση της διαστολής ή της συστολής σε συνδυασμό με την περιστροφή. Στο Σχήμα 3.2 οι γραμμές του πλέγματος ενός παραμορφωμένου δοκιμίου παρουσιάζονται σε υπέρθεση πάνω στις γραμμές του πλέγματος master. Μία από τις γραμμές του κάθε πλέγματος εμφανίζεται με διακεκομμένες γραμμές, και υποτίθεται ότι αυτές οι γραμμές συμπίπτουν στη μη παραμορφωμένη κατάσταση, ενώ και τα δύο πλέγματα έχουν ίδιο βήμα.

Ορίζουμε επίσης ότι η γραμμή που περνάει από τη διασταύρωση των δύο διακεκομμένων γραμμών είναι η γραμμή μηδενικής τάξεως, που σημαίνει ότι αυτό το σημείο δεν έχει μετακινηθεί στη κάθετη κατεύθυνση καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται. Παρόμοιες διασταυρώσεις γραμμών του πλέγματος του δοκιμίου και του πλέγματος master που αρχικά συνέπιπταν, βρίσκονται επίσης πάνω στην γραμμή τάξης μηδέν. Για λόγους ανάλυσης, η μορφή των γραμμών moiré μπορεί να ερμηνευθεί σαν μια επιφάνεια



Σχήμα 3.2 Γραμμές moiré σε ένα τυχαίο σημείο στο υπό τάση δοκίμιο

μετατόπισης όπου το ύψος ενός σημείου της επιφάνειας πάνω από το επίπεδο αναφοράς αντιπροσωπεύει την μετατόπιση του σημείου στη κάθετη κατεύθυνση σε σχέση με τις γραμμές του πλέγματος master.

Αφού έχουν καθοριστεί οι επιφάνειες για τις μετατοπίσεις u και v για τους άξονες x και y του δοκιμίου αντίστοιχα, οι καρτεσιανές συνιστώσες της ανηγμένης παραμόρφωσης μπορούν να υπολογιστούν από τις παραγώγους των μετατοπίσεων (κλίσεις των επιφανειών μετατόπισης). Δύο μοντέλα χρειάζονται κανονικά για αυτούς τους ορισμούς εκτός και αν υπάρχει ένας άξονας συμμετρίας στο δοκίμιο ώστε να τοποθετηθούν αμοιβαία και στις δύο πλευρές πλέγματα γραμμών. Για την περίπτωση μεγάλων ανηγμένων παραμορφώσεων, οι σχέσεις μεταξύ των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων είναι:

$$e_{xx} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2} - 1 \quad \text{Εξ. 3.6}$$

$$e_{yy} = \sqrt{1 + 2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} - 1 \quad \text{Εξ. 3.7}$$

$$g_{xy} = \arcsin \frac{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}}{(1 + e_{xx})(1 + e_{yy})} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

όπου u, v και w είναι οι συνιστώσες της μετατόπισης στις κατευθύνσεις x, y και z αντίστοιχα. Όταν τα γινόμενα και οι δυνάμεις των παραγώγων είναι αρκετά μικρά για να μην ληφθούν υπόψη, οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να μετασχηματιστούν σε απλούστερες, που χρησιμοποιούνται στην κλασική θεωρία ελαστικότητας:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad g_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

Οι κλίσεις της μετατόπισης $\frac{\partial u}{\partial x}$ και $\frac{\partial u}{\partial y}$ εξάγονται από τις κλίσεις των επιφανειών σε μια κατεύθυνση κάθετη στις γραμμές του πλέγματος master. Οι κλίσεις της μετατόπισης $\frac{\partial u}{\partial y}$ και $\frac{\partial u}{\partial x}$ εξάγονται από τις κλίσεις των επιφανειών σε μια κατεύθυνση παράλληλη με τις γραμμές του πλέγματος master. Οι κλίσεις της μετατόπισης $\frac{\partial w}{\partial y}$ και $\frac{\partial w}{\partial x}$ είναι συνήθως πολύ μικρές και δεν λαμβάνονται υπόψη στις περισσότερες αναλύσεις.

3.4 Η γεωμετρική προσέγγιση του φαινομένου moiré

Οι γραμμές moiré παράγονται είτε από περιστροφή σημείων του δοκιμίου είτε από διαστολή/συστολή διαφόρων κομματιών του. Σε γενικές γραμμές, σε εάν δοκίμιο

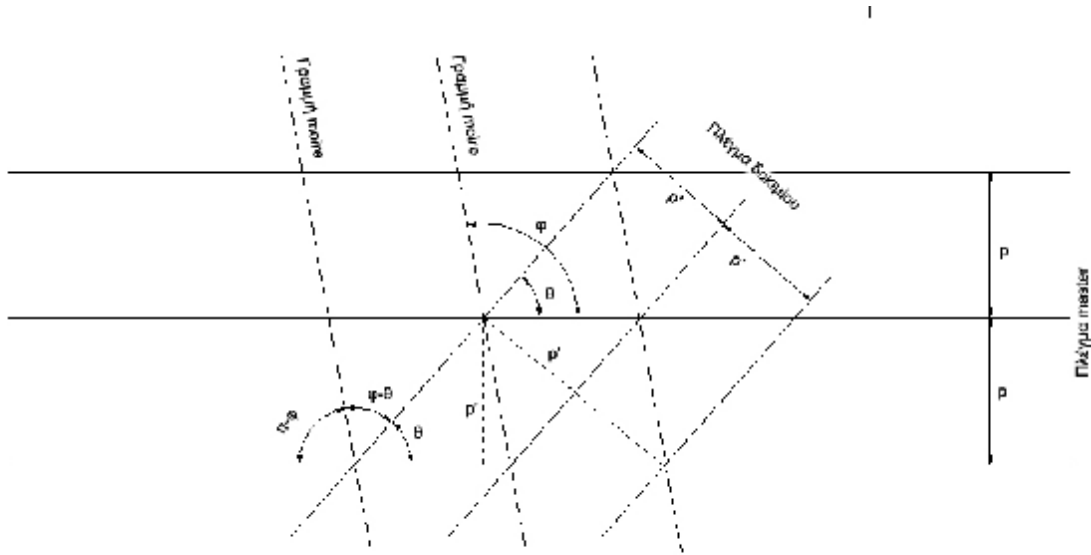
που υποβάλλεται σε κάποια τάση, αυτά τα δύο φαινόμενα παρουσιάζονται ταυτόχρονα και παράγουν γραμμές. Η πληροφορία που μπορούμε άμεσα να πάρουμε από αυτές τις γραμμές είναι η γωνία φ που σχηματίζει η γραμμή moiré σε σχέση με τις γραμμές του πλέγματος master, και η απόσταση d μεταξύ των γραμμών moiré. Οι ποσότητες που μπορούν να καθοριστούν με αυτά τα δεδομένα είναι η γωνία περιστροφής θ του πλέγματος του δοκιμίου σε σχέση με τις γραμμές του πλέγματος master, καθώς και η μεταβολή που επέρχεται στο βήμα p του πλέγματος του δοκιμίου καθώς αυτό γίνεται p' στην παραμορφωμένη κατάσταση. Αυτή η προσέγγιση στην ανάλυση των γραμμών moiré, που είναι αρκετά χρήσιμη σε περιπτώσεις που εξετάζουμε συγκεκριμένα σημεία, είναι γνωστή ως γεωμετρική προσέγγιση. Η γεωμετρική προσέγγιση μας δίνει τιμές για τα μεγέθη θ και p' που είναι μέσες τιμές μεταξύ δύο γραμμών moiré, αυτού του είδους η ανάλυση θα πρέπει να περιορίζεται μόνο σε περιπτώσεις ομογενούς πεδίου, ή σε πολύ μικρές περιοχές για μη ομογενή πεδία.

Οι σχέσεις μεταξύ των μεγεθών p , p' και θ σε σχέση με τις γραμμές του πλέγματος master και των δεδομένων που εξάγονται από την μορφή των γραμμών moiré, μπορούν να διερευνηθούν από την ανάλυση των σημείων που διασταυρώνονται οι γραμμές των δύο πλεγμάτων.

Εξετάζοντας πρώτα την απόσταση d μεταξύ των γραμμών, παρατηρούμε από τη γεωμετρία όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.3 ότι:

$$\frac{p}{\sin q} = \frac{d}{\sin(f - q)} \quad \text{Εξ. 3.9}$$

Λύνοντας για τη γωνία στρέψης θ με όρους βήματος p πλέγματος master και των ποσοτήτων d και φ που μπορούμε να πάρουμε από την μορφή των γραμμών μοιρέ έχουμε:



Σχήμα 3.3 Γεωμετρία του γραμμών μοιρέ με βάση την μεταξύ τους απόσταση

$$\tan q = \frac{\sin f}{d/p + \cos f} \quad \text{Εξ. 3.10}$$

Εάν χρησιμοποιήσουμε πλέγματα με πολύ μικρό βήμα για τη μέτρηση μικρών γωνιών στρέψης, τότε έχουμε $\varphi \approx \pi/2$ και η εξίσωση 3.10 γίνεται

$$q = \frac{p}{d} \quad \text{Εξ. 3.11}$$

Με παρόμοιο τρόπο, παρατηρούμε στο σχήμα 3.4 ότι:

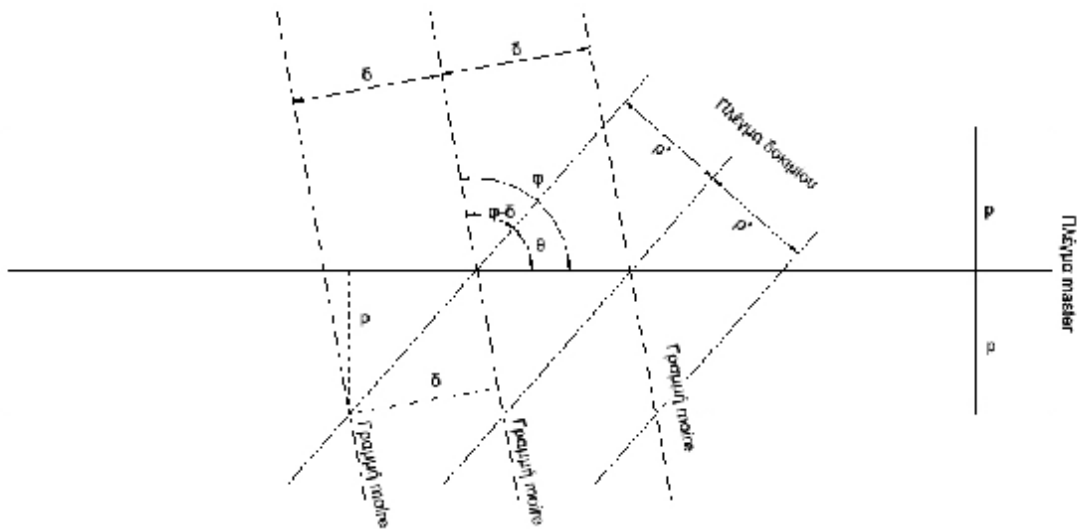
$$\frac{p}{\sin(p-f)} = \frac{p'}{\sin(f-q)} \quad \text{Εξ. 3.12}$$

Έτσι:

$$p' = \frac{p \sin(f-q)}{\sin f} \quad \text{Εξ. 3.13}$$

ή από την εξίσωση 3.9

$$p' = \frac{d \sin q}{\sin f} \quad \text{Εξ. 3.14}$$



Σχήμα 3.4 Γεωμετρία του γραμμών μοιρέ με βάση τη γωνία κλίσης τους

Η γωνία στρέψης θ μπορεί να απαλειφθεί από την εξίσωση 3.14. Με τη χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας:

$$\sin q = \frac{\tan q}{\sqrt{\tan^2 q}} \quad \text{Εξ. 3.15}$$

Έτσι, από τις εξισώσεις 3.14 και 3.10 το βήμα για το παραμορφωμένο δοκίμιο p' μπορεί να εκφραστεί με όρους p του πλέγματος master και των ποσοτήτων δ και f που μπορεί να καθοριστεί από τη μορφή των γραμμών moiré:

$$p' = \frac{d}{\sqrt{1 + (d/p)^2 + 2(d/p)\cos f}} \quad \text{Εξ. 3.16}$$

Σε πολλές περιπτώσεις η μορφή των γραμμών moiré εκτιμάται σε περιοχές όπου η στρέψη είναι πολύ μικρή. Σε τέτοιες περιπτώσεις έχουμε $f \approx 0$ ή το π , και η εξίσωση 3.16 γίνεται:

$$p' = \frac{pd}{p \pm d} \quad \text{Εξ. 3.17}$$

Από τη στιγμή που το βήμα p' του παραμορφωμένου σώματος έχει καθοριστεί, η συνιστώσα της ανηγμένης παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$e = \frac{p' - p}{p} \quad \text{Εξ. 3.18}$$

3.5 Χαρακτηρισμός της ρητίνης με τη χρήση του φαινομένου *moiré*

Η διαδικασία πολυμερισμού της ρητίνης περιλαμβάνει διάφορες αλλαγές φάσης σαν αποτέλεσμα θερμικών και χημικών μηχανισμών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων συρρίκνωσης στα δοκίμια που κατασκευάζονται με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας. Είναι συνηθισμένο να γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στα θερμικά και χημικά μέρη της συρρίκνωσης. Η χημική συρρίκνωση, ή αλλιώς συρρίκνωση πολυμερισμού, εμφανίζεται κατά το σχηματισμό των δεσμών του πολυμερικού συστήματος και εξαρτάται από την χημική σύσταση και την αντίδραση του πολυμερισμού. Το επίπεδο του εξαρτάται από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g του πολυμερούς, την θερμοκρασία πολυμερισμού καθώς επίσης και την έκταση και τον ρυθμό της έκθεσης.

3.6 Ανάλυση της συρρίκνωσης των πλακών της ρητίνης

Οι πλάκες τις ρητίνης αναλύθηκαν σαν ένας πολυστρωματικός σχηματισμός που αποτελείται από δύο παράλληλα ορθοτροπικά στρώματα (τέσσερις ανεξάρτητες σταθερές του υλικού), υπό συνθήκες επίπεδης έντασης, ίσου πάχους και ίσων μηχανικών

ιδιοτήτων. Η χημική τροπή συρρίκνωσης (συρρίκνωση πολυμερισμού) στο στρώμα νο. 1 που εμφανίστηκε στο δεύτερο πολυμερισμό λαμβάνεται ως μηδενική.

$$\begin{bmatrix} e_x^c \\ e_y^c \\ e_{xy}^c \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 3.19}$$

Η ανεξέλεγκτη χημική τροπή συρρίκνωσης στο στρώμα νο. 2 θα είναι:

$$\begin{bmatrix} e_x^c \\ e_y^c \\ e_{xy}^c \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} e_1^c \\ e_2^c \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 3.20}$$

υποθέτοντας ότι οι άξονες x- y- συμπίπτουν με τους κύριους άξονες του υλικού.

Αν e_x , e_y , και g_{xy} είναι οι τελικές τροπές, οι τάσεις σε κάθε στρώμα k ($k=1,2$) είναι:

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ t_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x - e_x^c \\ e_y - e_y^c \\ g_{xy} - 2e_{xy}^c \end{bmatrix}_k \quad \text{Εξ. 3.21}$$

όπου, Q_{ij} με $i, j = 1, 2, 6$ είναι οι συνιστώσες του πίνακα ακαμψίας του στρώματος που αναφέρεται στους κύριους άξονες του.

Οι προκύπτουσες ροπές για το πολυστρωματικό εξάγονται από τον τύπο:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^2 \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_x \\ \mathbf{s}_y \\ \mathbf{t}_{xy} \end{bmatrix}_k z dz = \int_{-h}^0 \begin{bmatrix} \mathbf{s}_x \\ \mathbf{s}_y \\ \mathbf{t}_{xy} \end{bmatrix}_1 z dz + \int_0^h \begin{bmatrix} \mathbf{s}_x \\ \mathbf{s}_y \\ \mathbf{t}_{xy} \end{bmatrix}_2 z dz \quad \text{Εξ. 3.22}$$

όπου $-h$ και h είναι οι συντεταγμένες z για το πάνω και το κάτω στρώμα k αντίστοιχα.

Οι συνιστώσες των καθαρών (μηχανικών) τροπών μπορούν να εκφραστούν με όρους τροπών στη μέση του επιπέδου και καμπυλώσεων, ως εξής:

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{e}_x^0 + z\mathbf{k}_x \quad \text{Εξ. 3.23}$$

$$\mathbf{e}_y = \mathbf{e}_y^0 + z\mathbf{k}_y$$

$$\mathbf{g}_{xy} = \mathbf{g}_{xy}^0 + z\mathbf{k}_{xy}$$

από τις εξισώσεις 3.21-3.23 εξάγεται ότι:

$$[M] = [B][\mathbf{e}^0] + [D][\mathbf{k}] - [M^c] \quad \text{Εξ. 3.24}$$

όπου: $[M]$ = πίνακας προκυπτουσών ροπών

$[B]$ = πίνακας laminate coupling stiffness, που σε αυτή τη περίπτωση είναι μηδέν λόγω της συμμετρίας midplane

$[D]$ = πίνακας laminate bending stiffness που ορίζεται ως:

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^2 Q_{ij} (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \frac{2}{3} h^3 Q_{ij} \quad \text{Εξ. 3.25}$$

$[\varepsilon^0]$ = πίνακας midplane strain

$[\kappa]$ = πίνακας midplane curvature

$[M^c]$ = ροπή chemical shrinkage που ορίζεται ως

$$[M^c] = \sum_{k=1}^2 \int_{z_{k-1}}^{z_k} [Q][e^c]_k z dz = \frac{h^2}{2} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^c \\ e_2^c \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 3.26}$$

Σημειώνοντας ότι οι προκύπτουσες ροπές πρέπει να είναι μηδενικές, εξάγουμε από τις εξισώσεις 3.24-3.26:

$$[M^c] = [D][k], \quad \text{ή} \quad \frac{4h}{3} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^c \\ e_2^c \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 3.26}$$

Ολοκληρώνοντας τις σχέσεις των μετατοπίσεων λόγω καμπυλότητας έχουμε:

$$k_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \text{Εξ. 3.27}$$

$$k_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$k_{xy} = -\frac{2\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

και αγνοώντας τις μετατοπίσεις του στερεού σώματος, παίρνουμε την out-of-plane παρεκτροπή:

$$w(x, y) = -\frac{1}{2}(k_1 x^2 + k_2 y^2) \quad \text{Εξ. 3.28}$$

Έτσι, τα περιγράμματα ίσων παρεκτροπών είναι ελλείψεις όπως αυτές φαίνονται στο σχηματισμό των εικόνων μοιρέ. Κάθε ελλειπτική γραμμή αντιστοιχεί σε παρεκτροπή ίση με w_n .

Για μια ελλειπτική γραμμή με ημι-άξονες a και b κατά μήκος των αξόνων x - και y - αντίστοιχα που αντιστοιχούν σε μια παρεκτροπή w , έχουμε:

$$k_x = k_1 = -\frac{2w}{a^2} \quad \text{Εξ. 3.29}$$

$$k_y = k_2 = -\frac{2w}{b^2}$$

Λύνοντας την εξίσωση 3.26 για e^c_1 και e^c_2 παίρνουμε:

$$e^c_1 = -\frac{8hw}{3a^2} \quad \text{Εξ. 3.30}$$

$$e_2^c = -\frac{8h\omega}{3b^2}$$

Έτσι, οι συνιστώσες της χημικής συρρίκνωσης που καθορίζονται με τη μέθοδο που περιγράφηκε είναι ανεξάρτητες από ιδιότητες των υλικών των στρωμάτων, αφού είναι οι ίδιες και για τα δύο στρώματα. Για ένα σχηματισμό γραμμών που περιέχει διάφορα περιγράμματα, ο καθορισμός που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες τάξεις γραμμών (ελλείψεις) για να αυξηθεί η ακρίβεια.

3.7 Πειραματική διαδικασία

Η ακόλουθη μεθοδολογία είναι βασισμένη στη μέτρηση της στρέβλωσης των πολυμερισμένων πλακών ρητίνης, και στην εφαρμογή της θεωρίας ελαστικής στρωμάτωσης που παρουσιάστηκε για τον υπολογισμό των προκυπτουσών τροπών συρρίκνωσης λόγω πολυμερισμού. Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τον Daniel και την ομάδα του και χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί η χημική συρρίκνωση σε εποξικά

Η ρητίνη η οποία διερευνήθηκε είναι ένα ακρυλικό φωτοπολυμερές (Allied Signal Exactomer 2202 SF). Με τη χρήση της μηχανής στερεολιθογραφίας EOS stereos desktop SL, δημιουργήθηκαν πλάκες διαστάσεων 100x100 mm και πάχους 3.3mm. Κατόπιν οι πλάκες αφέθηκαν για ένα χρονικό διάστημα 5 ημερών για να ελαττωθούν οι παραμορφώσεις και υπέστησαν περαιτέρω επεξεργασία για πλήρη πολυμερισμό, οι μισές σε θάλαμο υπεριώδους φωτός για 8 ώρες και οι άλλες μισές σε φούρνο στους 80 βαθμούς

για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η μια επιφάνεια τρίφτηκε ελαφρά με γυαλόχαρτο για να βοηθηθεί η καλύτερη επικόλληση της επόμενης πλάκας.

Η επόμενη πλάκα από το ίδιο υλικό και με τις ίδιες διαστάσεις, σχηματίστηκε πάνω στην προϋπάρχουσα, η οποία στηρίχτηκε με ειδικό τρόπο πάνω στη πλατφόρμα της μηχανής στερεολιθογραφίας. Τα δοκίμια που προέκυψαν επεξεργάστηκαν εκ νέου για πλήρη πολυμερισμό σε υπεριώδες φως και θερμικό θάλαμο. Υποθέτοντας ότι και οι δύο πλάκες εμφανίζουν τον ίδιο βαθμό πολυμερισμού της ρητίνης στο τέλος της διαδικασίας ολοκλήρωσης πολυμερισμού, οποιαδήποτε συρρίκνωση εμφανιστεί μετά από τη διαδικασία αυτή θα οφείλεται στον επιπρόσθετο πολυμερισμό που εμφανίζεται στη καινούργια πλάκα.

Η εκτός επιπέδου συρρίκνωση μετρήθηκε με τη μέθοδο προβολής ή σκιάς μοιρέ. Αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για την διαμόρφωση περιγραμματικών χαρτών μεγάλων επιφανειών. Η επιφάνεια του δοκιμίου βάφτηκε άσπρη και αυτό τοποθετήθηκε όρθιο πάνω σε άσπρο φόντο. Ένα πλέγμα master δημιουργήθηκε με εκτύπωση του grating πάνω σε διαφάνεια και τοποθετήθηκε με σταθερό τρόπο ανάμεσα σε δύο τζάμια. Στη συνέχεια το πλέγμα τοποθετήθηκε μπροστά από το δοκίμιο της ρητίνης σε κοντινή απόσταση και φωτίστηκε υπό γωνία 45° σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια του δοκιμίου, με τη βοήθεια ενός προβολέα slides 35mm. Το βήμα (pitch) που χρησιμοποιήθηκε για το πλέγμα ήταν 0.56 mm (18 γραμμές/cm). Η αλληλεπίδραση των γραμμών του πλέγματος master και των σκιών τους πάνω στο δοκίμιο, δημιούργησαν γραμμές μοιρέ, η οποίες φωτογραφήθηκαν με ψηφιακή μηχανή, καθώς και με κλασική μηχανή με ασπρόμαυρο φιλμ (Φωτ. 3.2 - 3.6).

3.8 Ανάλυση και περιγραφή αποτελεσμάτων

Οι γραμμές μοιρέ αναλύθηκαν μετρώντας την απόσταση των ομόκεντρων ελλειπτικών γραμμών στον κάθετο και στον οριζόντιο άξονα, a και b αντίστοιχα, από την αρχή των αξόνων. Για τις λευκές γραμμές έχουμε ακέραιο αριθμό τάξης γραμμής (fringe order), ενώ για τις μαύρες έχουμε ακέραιο αριθμό με την πρόσθεση του 0.5. Αυτές οι τιμές για τα a και b συνδυάστηκαν με τις τιμές των n και w σε κάθε περίπτωση με βάση τις εξισώσεις 3.5 και 3.30 για την εύρεση των τιμών των θ_1 και θ_2 . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, όπου φαίνεται ότι το δοκίμιο που έχει υποστεί UV επεξεργασία έχει πιο ομοιόμορφες αποκλίσεις από αυτό με τη θερμική επεξεργασία. Επίσης η θερμική επεξεργασία έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποκλίσεις, στον ένα τουλάχιστον άξονα (4480×10^{-6} για το UV σε σχέση με 6227×10^{-6} για το θερμικό).

Ο πολυμερισμός εξαιτίας του λέιζερ στη δεύτερη πλάκα είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση αρκετά μεγάλης έκτασης συρρίκνωσης, όπως αυτή φαίνεται στην Φωτογραφία 3.3. Η μέθοδος μοιρέ έδωσε σχήματα αποτελούμενα από ομόκεντρους γκρίζες και μαύρες ελλείψεις. Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν στις εικόνες που λήφθηκαν πριν και μετά τη διαδικασία ολοκλήρωσης πολυμερισμού. Κατά τη διαδικασία αυτή, η δεύτερη πλάκα συρρικνώνεται περισσότερο με αποτέλεσμα την αύξηση των εκτός επιπέδου παρέκκλιση. Το post curing των υπό εξέταση πλακών με τη βοήθεια της έκθεσης σε ακτινοβολία UV είχε σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό κυκλικών γραμμών, που δείχνουν ότι οι πλάκες συρρικνώθηκαν αναλογικά κατά μήκος των διευθύνσεων του επιπέδου τους. Το post curing που έγινε με τη βοήθεια της θερμοκρασίας, είχε σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό ελλειπτικών γραμμών, με μεγαλύτερη συρρίκνωση να εμφανίζεται στον άξονα y . Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το θερμικό

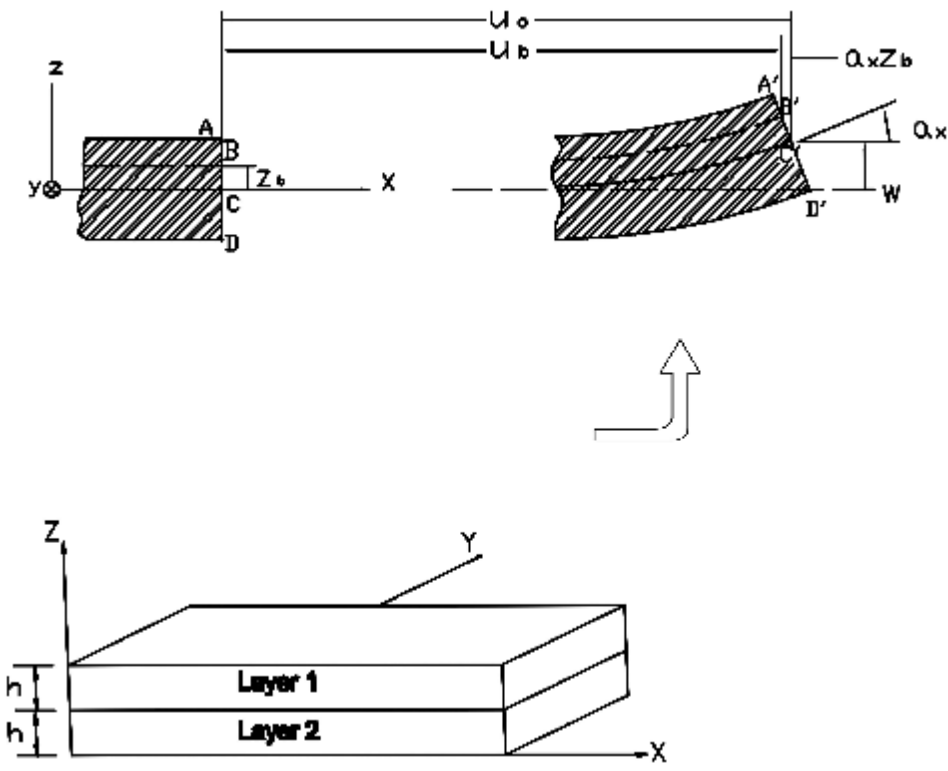
post curing έχει σαν αποτέλεσμα πιο πολυμερισμένα κομμάτια μεγαλύτερης όμως στρέβλωσης, κάτι το οποίο συγκρίνεται με τα ευρήματα άλλων ερευνητών. [2]

Η ανάλυση που ακολουθείται εδώ, βασισμένη στη θεωρία ελαστικότητας πολυστρωματικών υλικών, μπορούσε να εφαρμοσθεί μόνο για τη μέτρηση των τροπών λόγω χημικής συρρίκνωσης, αφού μόνο σ' αυτή τη περίπτωση οι δύο πλάκες θα εμφάνιζαν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες.

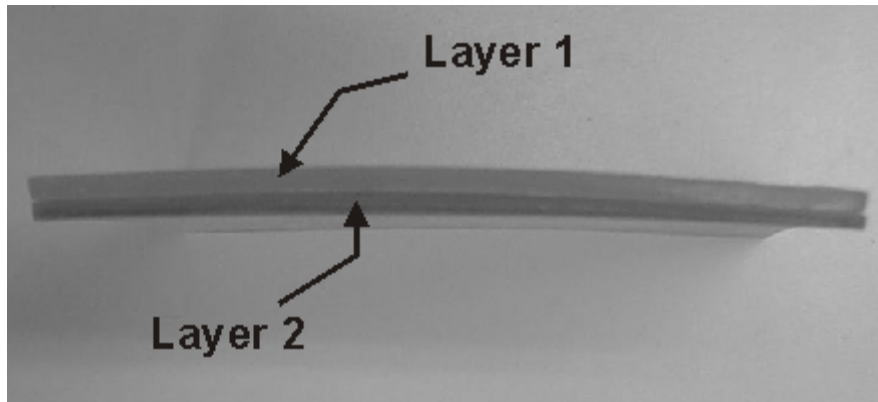
3.9 Πλεονεκτήματα της ανάλυσης *moiré*

Στη διεθνή πρακτική εφαρμόζονται πολύπλοκες και ακριβές μέθοδοι για τη μέτρηση της ακρίβειας των δοκιμών στερεολιθογραφίας, όπως Raman spectroscopy [14], ή και μέθοδοι που εμπλέκουν τη χρήση ηλεκτρονικών αισθητήρων για μέτρηση αποστάσεων (probes) [26]. Επίσης για τη μέτρηση τροπών που προέρχονται από στατικά ή δυναμικά φορτία έχει χρησιμοποιηθεί η Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) [15], και για τον ίδιο λόγο έχουν χρησιμοποιηθεί strain gauges για να μετρήσουν τη χημική συρρίκνωση που αναπτύσσεται σε μια δοκό αλουμινίου πάνω στην οποία έχει πολυμεριστεί ρητίνη [23]. Σε σύγκριση με αυτές της μεθόδους, η μέθοδος *moiré* πλεονεκτεί από πλευράς κόστους, αφού ο εξοπλισμός είναι φθηνός, καθώς και από πλευράς απλότητας, καθώς ένα τέτοιο πείραμα μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα και γρήγορα με απλά υλικά και σύντομες διαδικασίες. Αυτό που καθορίζει την ακρίβεια των μετρήσεων είναι η πυκνότητα των γραμμών του grating που έχουμε στη διάθεση μας. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί επικουρικά και σε άλλες εργασίες για παρόμοιους σκοπούς [28].

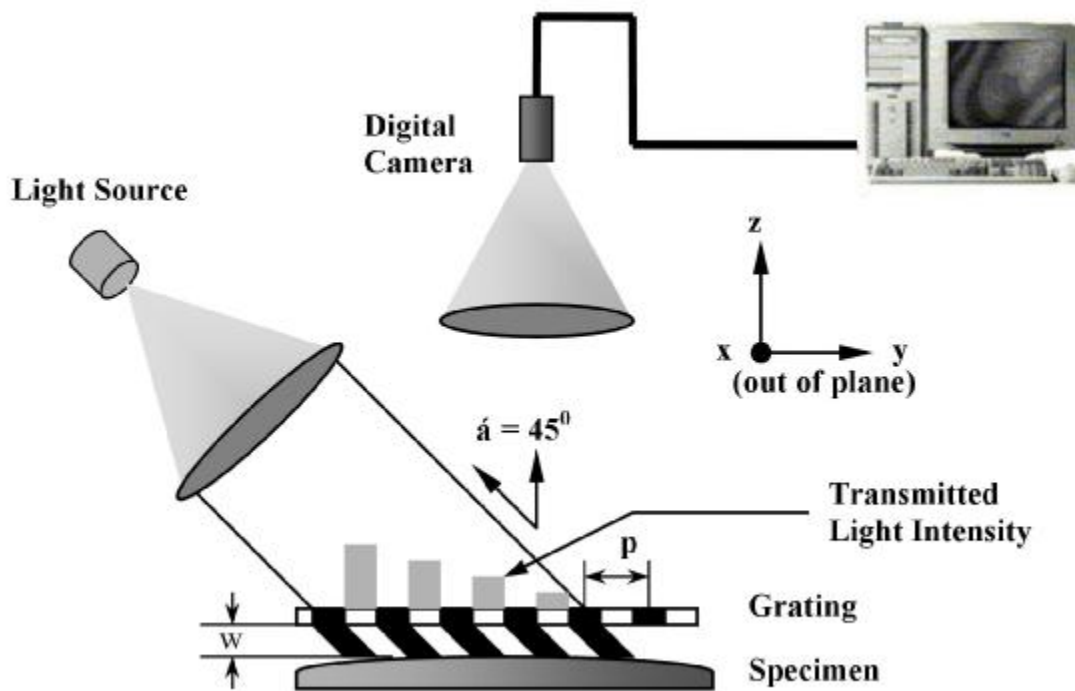
Η ίδια τεχνική εφαρμόστηκε για να μελετηθεί και η στρέβλωση που παρουσιάζει η εποξική ρητίνη Somos 7110. Από τα αντίστοιχα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη ρητίνη είχε καλύτερη συμπεριφορά σε ότι αφορά τη συρρίκνωση και τη στρέβλωση, σε σύγκριση με την ακρυλική Exactomer 2202 SF, και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η χρήση της στα φωτοελαστικά πειράματα.



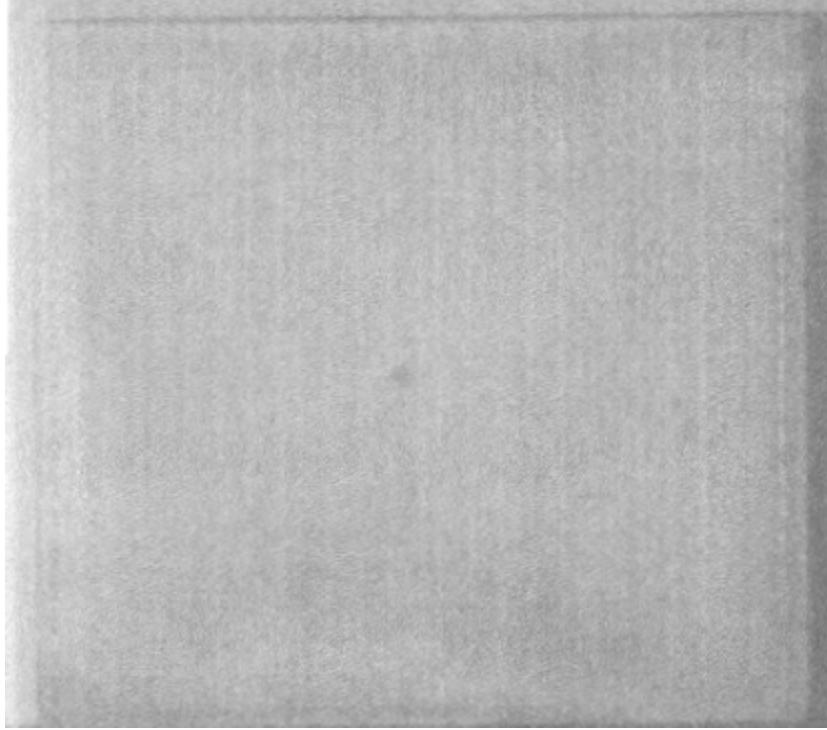
Σχήμα 3.5 Οι παραμένουσες τάσεις στο πρώτο στρώμα προκαλούν την εμφάνιση κυρτώσεων με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα



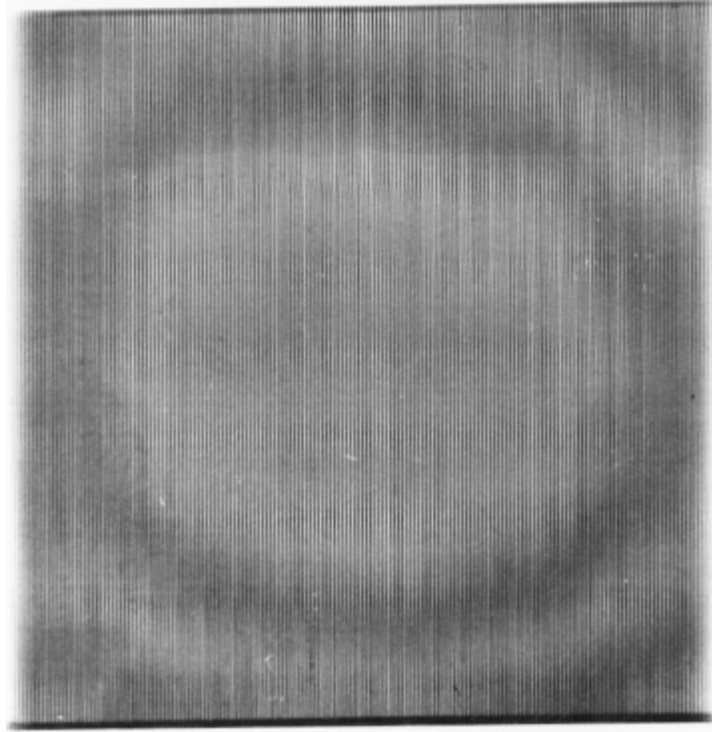
Φωτογραφία 3.1 Φωτογραφία της πλάκας στην οποία φαίνονται τα δύο στρώματα



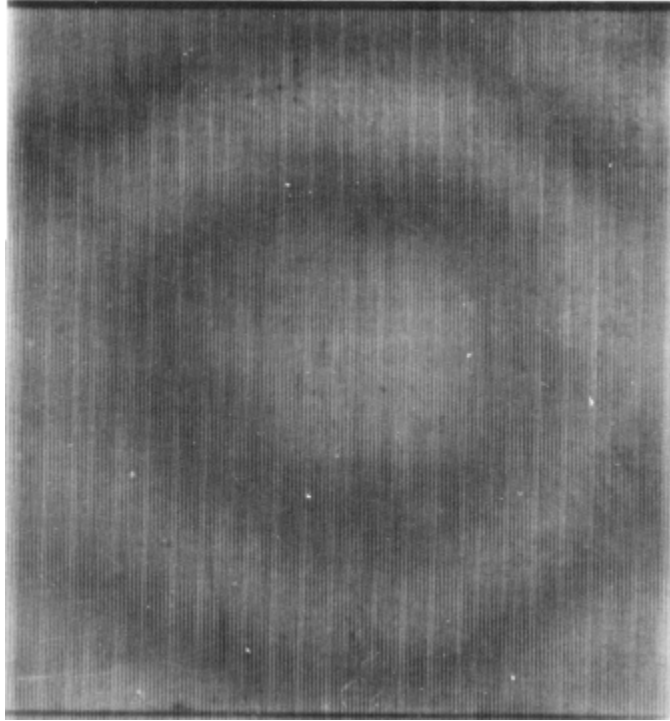
Σχήμα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος για τη μέτρηση των out-of-plane παρεκτροπών



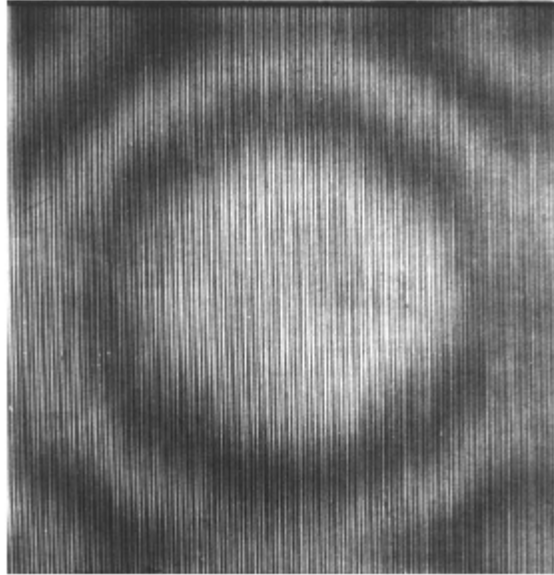
Φωτογραφία 3.2 Η εικόνα που παίρνουμε για το πρώτο στρώμα μετά την ολοκλήρωση του πολυμερισμού με διαδικασία postcuring. Δεν υπάρχουν γραμμές, κάτι που δείχνει ότι είναι επίπεδο



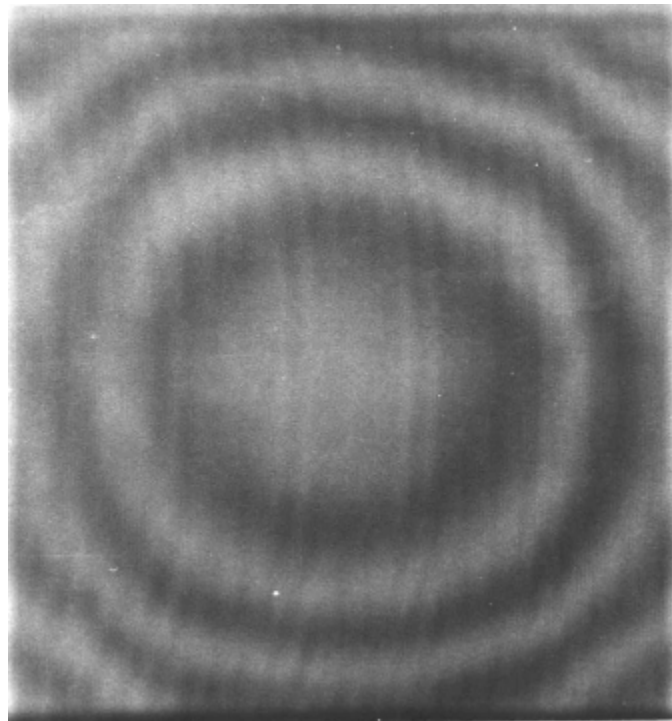
Φωτογραφία 3.3 Γραμμές μοιρέ για το δοκίμιο των δύο στρωμάτων πριν το postcuring με UV



Φωτογραφία 3.4 Γραμμές μοιρέ για δοκίμιο δύο στρωμάτων μετά το postcuring με UV



Φωτογραφία 3.5 Γραμμές μοιρέ για δοκίμιο δύο στρωμάτων πριν το postcuring με θερμότητα



Φωτογραφία 3.6 Γραμμές μοιρέ για δοκίμιο δύο στρωμάτων μετά το postcuring με θερμότητα

	n	w	a	b	e₁x10⁻⁶	e₂x10⁻⁶
UV	0.5	0.28	22	22	5091	5091
	1	0.56	33	33	4525	4525
	1.5	0.84	44	44	3818	3818
Μέσος όρος					4480	4480
Θερμική	0.5	0.28	26	20	3645	6160
	1	0.56	32	26	4813	7290
	1.5	0.84	40	36	4620	5704
	2	1.12	46	40	4658	6160
Μέσος όρος					4434	6227

Πίνακας 3.1 Μέτρηση των τροπών της συρρίκνωσης λόγω πολυμερισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΘΕΩΡΙΑ SIMILARITY. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Σε πολλές μηχανολογικές έρευνες, οι ποσότητες των μεγεθών που αναζητούνται, όπως η τάση, η παραμόρφωση, η ταχύτητα, η επιμήκυνση καθορίζονται από πειράματα που γίνονται συχνότερα σε φυσικά μοντέλα, και σπανιότερα σε κάποιο τελικό πρωτότυπο ή ένα μοντέλο παραγωγής, ή ακόμα και σε ένα απομονωμένο χαρακτηριστικό στο φυσικό περιβάλλον. Συχνά αυτή η χρήση του μοντέλου υπαγορεύεται από ανάγκη, όπως ας πούμε στη περίπτωση που το φυσικό πρωτότυπο είναι μεγάλο ή ακριβό. Μερικές φορές η εξέταση ενός μοντέλου είναι απλά περισσότερο διαφωτιστική και βολική. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις τα ευρήματα πρέπει να μεταφερθούν με σωστό τρόπο από το μοντέλο στο πρωτότυπο, για να έχουμε σωστές προβλέψεις.

Ενώ τα υλικά και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή πρωτοτύπων είναι σημαντικοί παράγοντες στη δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι και η επιλογή της κλίμακας με την οποία θα παραχθεί το μοντέλο. Η επιλογή της κλίμακας μπορεί να αφορά το μέγεθος και το σχήμα, τα υλικά από τα οποία αυτό θα κατασκευαστεί, και τις φορτίσεις που θα εφαρμοστούν σε αυτό. Σε ότι αφορά το μέγεθος, υπάρχουν τρεις επιλογές: Μικρότερο μοντέλο, μεγαλύτερο και στις ίδιες διαστάσεις. Μετά την επιλογή των διαστάσεων του μοντέλου, οι μέθοδοι της ομοιότητας (similarity methods) παρέχουν τεχνικές για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων του υπό κλίμακα μοντέλου, με αυτών του πραγματικού προϊόντος.

Ο σκοπός των μεθόδων ομοιότητας είναι να προβλέψουν πειραματικά την συμπεριφορά του προϊόντος μέσα από ένα έμμεσο πείραμα σε μοντέλο υπό κλίμακα, ελαφρύνοντας έτσι το φόρτο της διαδικασίας της κατασκευής και των δοκιμών. Σε μερικές περιπτώσεις κατασκευάζονται μοντέλα μεγαλύτερα και ακριβότερα από το προϊόν, αλλά ο κανόνας είναι η κατασκευή μικρότερων μοντέλων, ή η αλλαγή υλικών και η απλοποίηση του σχήματος για την ελαχιστοποίηση της προσπάθειας της κατασκευής μοντέλων. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο σχεδιασμού προϊόντων τα υπό κλίμακα μοντέλα μπορούν να επιταχύνουν την διαδικασία σχεδιασμού, αν μπορούν να παράγουν μια αξιόπιστη πρόβλεψη [60].

Η μέθοδος ομοιότητας που βασίζεται στο θεώρημα Π του Buckingham μας παρέχει μια μέθοδο για τη σχεδίαση φυσικών μοντέλων υπό κλίμακα και τη πρόβλεψη συμπεριφοράς προϊόντων σε κανονικό μέγεθος παρέχοντας νόμους κλιμάκωσης. Για να γίνει σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος στο κανονικό του μέγεθος με αυτή τη παραδοσιακή μέθοδο ομοιότητας, είναι πολύ σημαντικό να λάβουμε υπόψη μας της βασικές παραδοχές που κάνει το θεώρημα Π.

Σε γενικές γραμμές, η μεταβλητή που διερευνούμε και που την ονομάζουμε x μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$x = f(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad \text{Εξ. 4.1}$$

όπου οι λεπτομέρειες της συνάρτησης f δεν είναι γνωστές σε επαρκή βαθμό, και p_i είναι οι παράμετροι του συστήματος, όπως σταθερές του υλικού, γεωμετρικές παράμετροι, οριακές συνθήκες, και ανεξάρτητες μεταβλητές χρόνου και χώρου. Αν θεωρήσουμε δύο συστήματα Σ_A και Σ_B που μπορούν να παρασταθούν ως εξής:

$$x^A = f(p_1^A, p_2^A, \dots, p_n^A) \quad \text{Εξ. 4.2}$$

$$x^B = f(p_1^B, p_2^B, \dots, p_n^B)$$

όπου τα A και B αντιπροσωπεύουν τα συστήματα Σ_A και Σ_B αντίστοιχα. Αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να αναπαρασταθούν ως:

$$\pi_x^A = \phi(\pi_1^A, \pi_2^A, \dots, \pi_N^A) \quad \text{Εξ. 4.3}$$

$$\pi_x^B = \phi(\pi_1^B, \pi_2^B, \dots, \pi_N^B)$$

όπου π_i ($i = x$ και $1, 2, \dots, N$) είναι οι αδιάστατες παράμετροι που συνδέονται με το p_k ($k = x$ και $1, 2, \dots, N$). Καθώς έχουμε $n > N$ η εξίσωση 3 μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια περιληπτική έκφραση του αρχικού συστήματος εξισώσεων (Εξ. 4.2). Αν έχουμε $\pi_i^A = \pi_i^B$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, N$ τότε έχουμε $\pi_x^A = \pi_x^B$ από την Εξ. 4.3. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί κανείς να προβλέψει το x^A από την ακόλουθη εξίσωση πρόβλεψης:

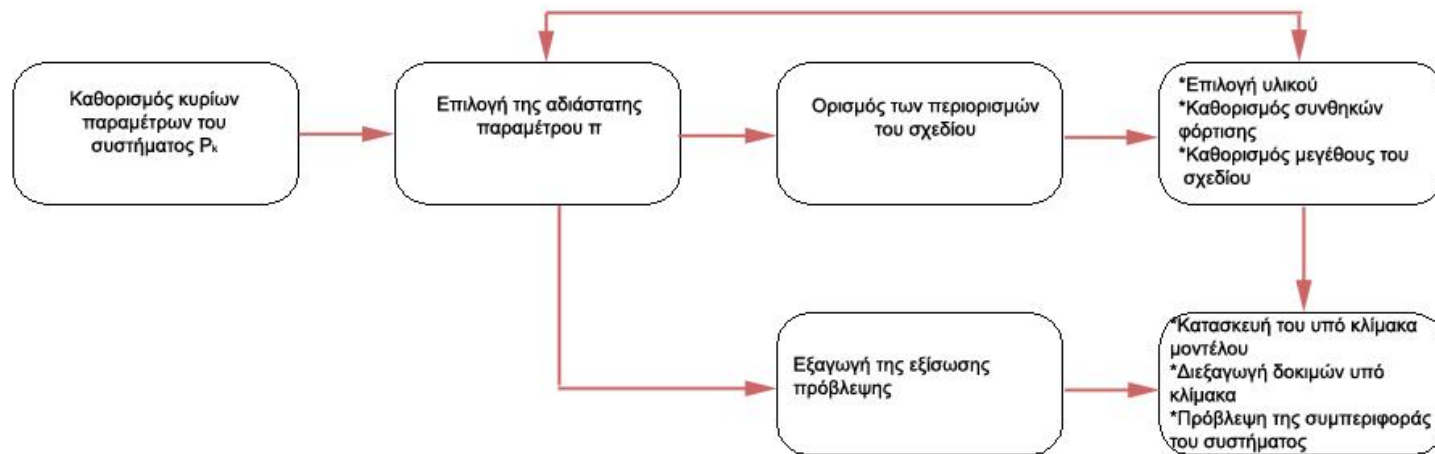
$$x^A = x^B \cdot \prod_{k=1}^n \left(\frac{p_k^B}{p_k^A} \right)^{r_k}$$

όπου το r_k είναι ένας ρητός αριθμός που μπορεί να προσδιορισθεί από το π^A (ή από το π^B)

Η παραδοσιακή μέθοδος ομοιότητας προϋποθέτει ότι τα συστήματα κανονικού μεγέθους συνδέονται με συστήματα υπό κλίμακα με ένα σύνολο παραμέτρων μέσα από μια ταυτόσημη συνάρτηση όπως αυτή της Εξ. 2. Η όλη διαδικασία της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχ. 1

Η φωτοελαστικότητα είναι ένα καλό παράδειγμα τεχνικής στην οποία τα μοντέλα είναι βολικά και συνήθως απαραίτητα. Η πληροφορίες που αποκτώνται από φωτοελαστικά πειράματα, που είναι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, θα πρέπει να συνδεθούν με τις αντίστοιχες τάσεις και παραμορφώσεις του πρωτοτύπου, που συνήθως είναι μεγαλύτερου μεγέθους, διαφορετικού υλικού και υπόκεινται σε διαφορετικά φορτία.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί πειραματική διαδικασία, κατά την οποία προβλέπεται συγκεκριμένη παράμετρος της μηχανικής συμπεριφοράς ενός δοκιμίου από αλουμίνιο, με βάση την αντίστοιχη συμπεριφορά ενός δοκιμίου από ρητίνη, με τη χρήση της μεθόδου ομοιότητας.



Σχήμα 4.1

Συνολική διαδικασία της μεθόδου ομοιότητας (similarity method)

4.2 Πειραματική διαδικασία

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια ίδιας γεωμετρίας το ένα κατασκευασμένο από αλουμίνιο και το άλλο κατασκευασμένο από ρητίνη με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας. Σκοπός ήταν η πρόβλεψη της μεταβολής που θα εμφανιζόταν στο μήκος του δοκιμίου από αλουμίνιο κατόπιν άσκησης συγκεκριμένου φορτίου, με βάση την μεταβολή που θα εμφανιζόταν στο αντίστοιχο δοκίμιο ρητίνης. Στη συνέχεια ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο σχήμα 1, πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Επιλογή των παραμέτρων του κύριου συστήματος: Οι παράμετροι του κύριου συστήματος που μας απασχολούν στο πρόβλημα είναι ο συντελεστής Young $E[\text{FL}^{-2}]$, η εκτροπή $d[\text{L}]$, το αρχικό μήκος $L_c[\text{L}]$, η τάση $\sigma[\text{FL}^{-2}]$ και η δύναμη $F_x[\text{F}]$ που ασκείται στα δοκίμια.

Βήμα 2: Εύρεση αδιάστατων ομάδων Π . Οι ομάδες Π μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα με τη χρήση της διαδικασίας του κλιμακωτού πίνακα (echelon matrix). Αυτή η διαδικασία μετατρέπει ένα αρχικό πίνακα διαστάσεων σε ένα απλούστερο αλλάζοντας τις βασικές του διαστάσεις. Ο πίνακας διαστάσεων του προβλήματος μπορεί εδώ να αναπαρασταθεί με την ακόλουθη μορφή.

	$E[FL^{-2}]$	$d[L]$	$L_c[L]$,	$\sigma[FL^{-2}]$	$F_x[F]$
F	1	0	0	1	1
L	-2	1	1	-2	0

Οι τιμές στο πίνακα είναι της δύναμης στην οποία υψώνονται οι βασικές διαστάσεις (πρώτη στήλη) για κάθε μέγεθος που υπάρχει στην πρώτη γραμμή (π.χ το L στο $E[FL^{-2}]$ είναι υψωμένο στο τετράγωνο άρα βάζουμε αριθμό -2). Αν πάρουμε τις διαστάσεις E και d σαν βασικές διαστάσεις αντικαθιστώντας τις F και L, η διάσταση των παραμέτρων μπορεί να αναπαρασταθεί με βάση του όρους των καινούργιων βασικών διαστάσεων:

	$E[FL^{-2}]$	$d[L]$	$L_c[L]$,	$\sigma[FL^{-2}]$	$F_x[F]$
$E[FL^{-2}]$	1	0	0	1	1
$d[L]$	0	1	1	0	2

Έτσι όπως στο πρώτο πίνακα έχουμε τις ισότητες $[E] = [FL^{-2}]$, $d = [L]$, $[L_c] = [L]$, $[\sigma] = [FL^{-2}]$ και $F_x[F]$, αντίστοιχα προκύπτουν νέες σχέσεις από τον δεύτερο πίνακα: $[\sigma] = [E]$, $F_x = [Ed^2]$, και $[L_c] = [d]$. Αυτές οι τρεις μειωμένες σχέσεις διαμορφώνουν τις ακόλουθες αδιάστατες παραμέτρους:

$$\pi_1 = \frac{L_c}{d} \qquad \pi_2 = \frac{\sigma}{E} \qquad \pi_3 = \frac{F_x}{E * d^2}$$

Βήμα 3: Εύρεση νόμων κλίμακας για τη σχεδίαση μοντέλων υπό κλίμακα: Όπως αναφέρθηκε, θα πρέπει να οριστούν οι παράμετροι του υπό κλίμακα συστήματος,

διατηρώντας την ταυτότητα των αντίστοιχων αδιάστατων παραμέτρων π_i . Χρησιμοποιώντας τον παράγοντα λ_p που είναι ο λόγος της παραμέτρου του κανονικού συστήματος και της παραμέτρου του συστήματος υπό κλίμακα, οι περιορισμοί του υπό κλίμακα μοντέλου μπορούν να αναπαρασταθούν με μια απλή έκφραση. Καθώς τα π_1 , π_2 , και π_3 των δύο υλικών θα πρέπει να είναι ίδια τότε ακολουθώντας τους νόμους της κλιμάκωσης θα έχουμε:

$$\lambda_d = \lambda_L \text{ (από το } \pi_1), \quad \lambda_\sigma = \lambda_E \text{ (από το } \pi_2), \quad \lambda_E = \lambda_E (\lambda_d)^2 \text{ (από το } \pi_3),$$

Βήμα 4: Σχεδιασμός του μοντέλου υπό κλίμακα ώστε όλοι οι παραπάνω νόμοι να ικανοποιούνται. Από τις ιδιότητες των υλικών που εμφανίζονται στον Πίνακα 4.1 η αναλογία που προκύπτουν σύμφωνα με τα παραπάνω είναι $\lambda_E = 6/1,77 = 3,39$. Επίσης οι διαστάσεις των δύο αντικειμένων είναι ίδιες οπότε έχουμε $\lambda_d = \lambda_L = 1$

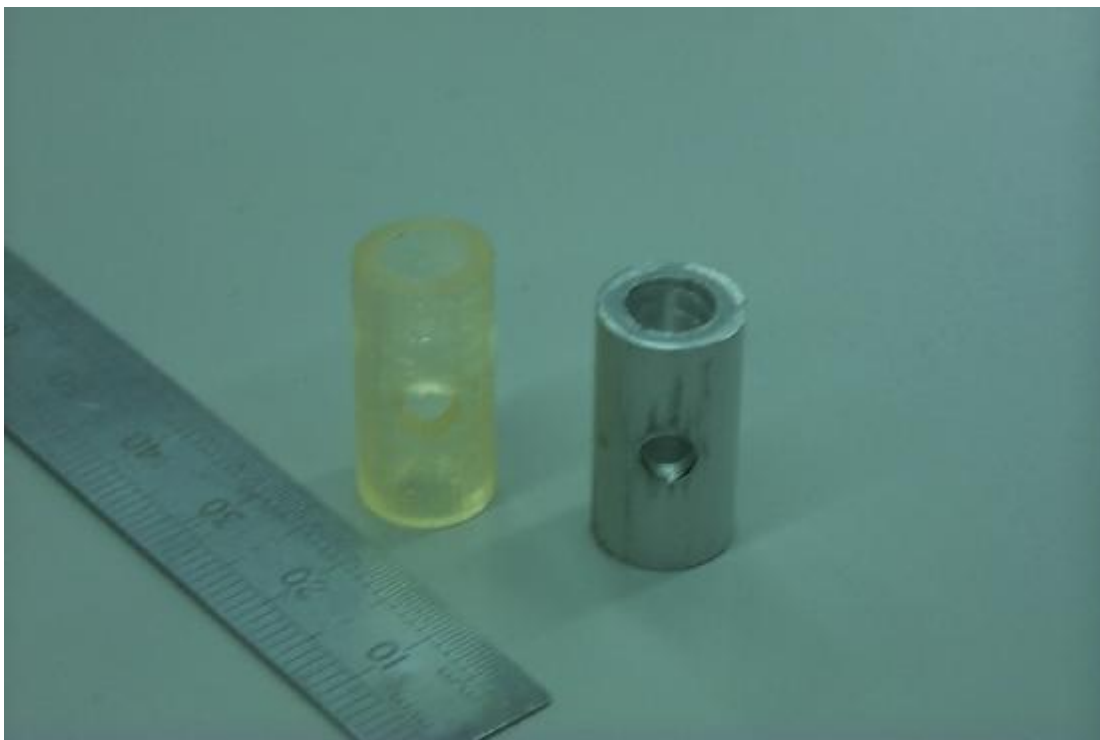
Συντελεστής Young (GPa)	
Αλουμίνιο	6
Ρητίνη	1,77

Πίνακας 4.1 Μέτρα ελαστικότητας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

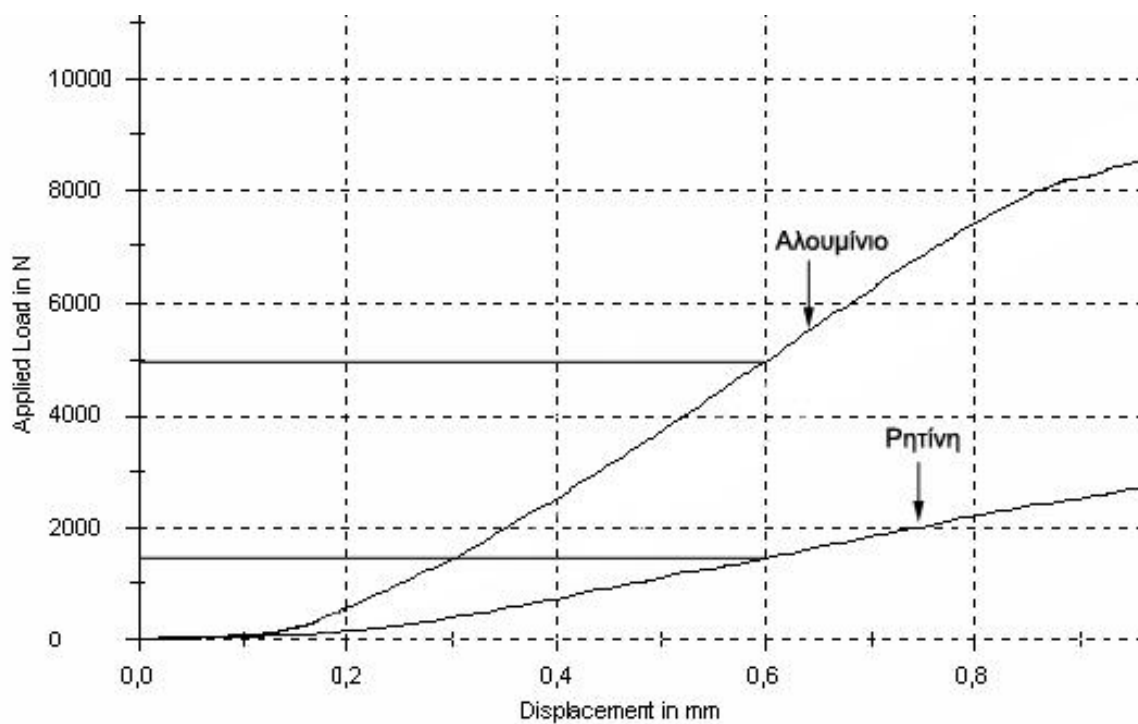
Βήμα 5: Υπολογισμός της συμπεριφοράς του συστήματος-στόχου: Από τον νόμο κλιμάκωσης $\lambda_\sigma = \lambda_E$ η τάση στο κύλινδρο από αλουμίνιο θα είναι πρέπει να είναι 3,39 φορές μεγαλύτερη από τη τάση που ασκείται στο δοκίμιο ρητίνης, για να έχουμε την ίδια επιμήκυνση. Ο ίδιος λόγος ισχύει και για την δύναμη, καθώς έχουμε τις ίδιες επιφάνειες.

Όντως από πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι για να επιτευχθεί συρρίκνωση των δύο δοκιμίων κατά 0.13mm χρειάζεται για το μεν δοκίμιο ρητίνης άσκηση φορτίου 4900Nt ενώ για το αντίστοιχο δοκίμιο αλουμινίου άσκηση φορτίου 1630 Nt. Ο λόγος των δύο ποσοτήτων είναι $4950 \text{ Nt}/1450 \text{ Nt} = 3,43$. Βλέποντας τα αποτελέσματα των αναλυτικών μοντέλων (FEA), βλέπουμε ότι η ίδια αναλογία διατηρείται, όπου για να επιτευχθεί μετατόπιση 0.13mm απαιτείται για το αλουμίνιο δύναμη 8500 Nt και για τη ρητίνη 2500 Nt όπου $8500 \text{ Nt}/2500 = 3.4$

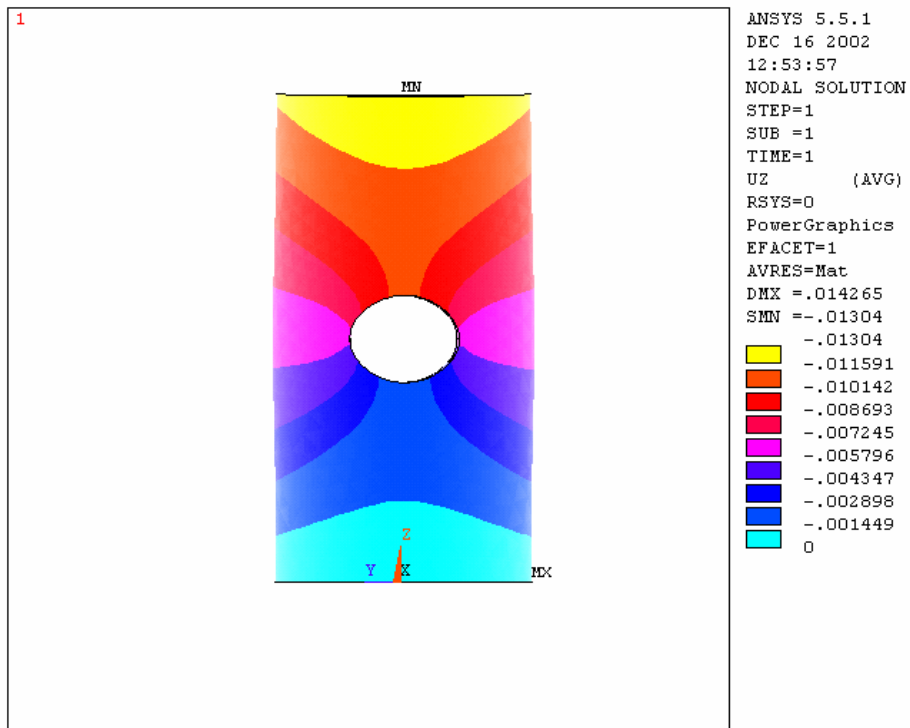
Από τη παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι τα πρωτότυπα στερεολιθογραφίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λειτουργικές δοκιμές με σκοπό την αξιολόγηση σχεδίων. Θα πρέπει όμως να υπάρχει τρόπος να εξομαλύνονται τα λάθη που μπορούν να προκύπτουν στη συσχέτιση μεταξύ πρωτοτύπων και μοντέλων, για αυτό το λόγο παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών πειράματα σε ενδιάμεσα μοντέλα που τα αποτελέσματα τους επανατροφοδοτούν με στοιχεία και διορθώνουν τις παραμέτρους συσχέτισης μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου [40]-[42].



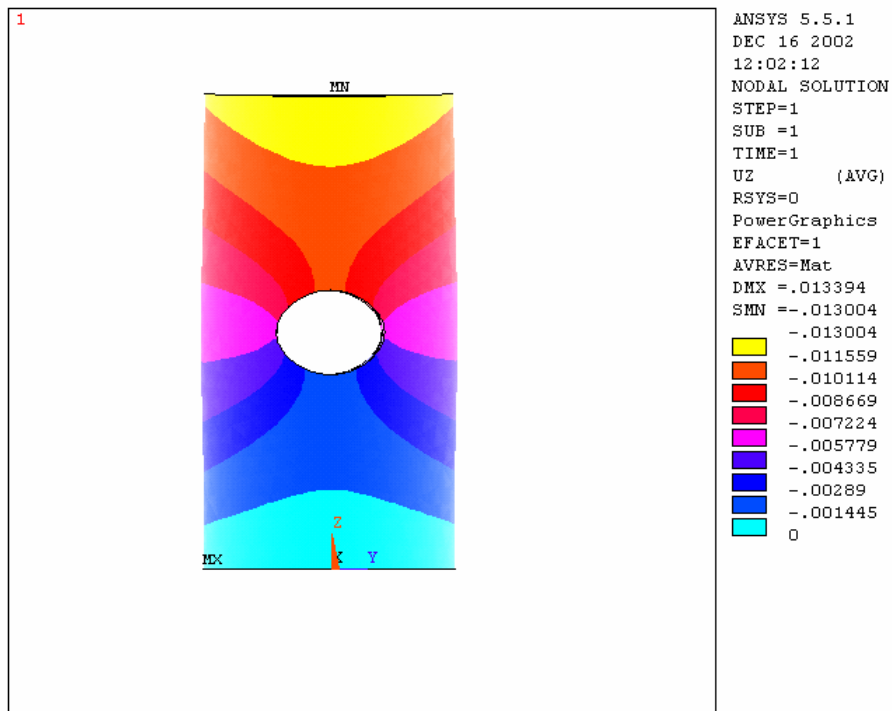
Φωτογραφία 4.1 Δοκίμια από ρητίνη και αλουμίνιο



Σχήμα 4.2 Διαγράμματα με τα αποτελέσματα πειράματος θλίψης που έγινε και για τα δύο δοκίμια



Σχήμα 4.3 Ανάλυση FEA για το δοκίμιο της ρητίνης για φορτίο 2500 Nt



Σχήμα 4.4 Ανάλυση FEA για το δοκίμιο του αλουμινίου για φορτίο 8500 Nt

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ¹

5.1 Η φύση του φωτός

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικές δονήσεις παρόμοιες με τα ραδιοκύματα. Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η κίνηση ενός εγκάρσιου κύματος το οποίο μεταδίδεται με εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα, ενώ η δόνηση που σχετίζεται με το φως είναι κάθετη στη διεύθυνση της μετάδοσης. Με αυτό το κύμα σχετίζονται ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που περιγράφονται με ηλεκτρικά και μαγνητικά διανύσματα **E** και **H** αντίστοιχα. Αυτά τα διανύσματα βρίσκονται σε φάση, κάθετα το ένα στο άλλο, και σε ορθές γωνίες με τη διεύθυνση μετάδοσης.

Όλοι οι τύποι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταδίδονται με την ίδια ταχύτητα στο ελεύθερο διάστημα (περίπου 3×10^8 m/s). Τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τις διάφορες ακτινοβολίες είναι το μήκος κύματος και η συχνότητα. Αυτές οι δύο ποσότητες συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\lambda f = c \quad \text{Εξ. 5.1}$$

όπου: λ = μήκος κύματος, f είναι η συχνότητα, και c είναι η ταχύτητα της μετάδοσης. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα δεν έχει άνω ή κάτω όριο μήκους κύματος ή συχνότητας.

¹ Η Θεωρία που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο προέρχεται κυρίως από το βιβλίο “Experimental Stress Analysis” [57] και “Optical Methods of Engineering Analysis” [58].

Το φως ορίζεται συνήθως ως ακτινοβολία που μπορεί να επηρεάσει το ανθρώπινο μάτι. Το ορατό εύρος του οπτικού φάσματος είναι μια μικρή ζώνη που έχει σαν κέντρο της ένα μήκος κύματος γύρω στο 550 nm. Ένας άνθρωπος με κανονική όραση μπορεί να δει σε ένα εύρος μήκους κύματος από 400 έως 700nm. Μέσα σ'αυτό το εύρος το μάτι ερμηνεύει τα μήκη κύματος σαν διαφορετικά χρώματα. Το φως που προέρχεται από μια φωτεινή πηγή που εκπέμπει ένα συνεχές φάσμα με ίση ενέργεια για κάθε μήκος κύματος γίνεται αντιληπτό από το μάτι ως λευκό φως. Το φως που έχει ένα μόνο μήκος κύματος λέγεται μονοχρωματικό φως.

Εύρος μήκους κύματος	Χρώμα	Εύρος μήκους κύματος	Χρώμα
400-450	Ιώδες	550-570	Κίτρινο-Πράσινο
450-480	Κυανό	570-590	Κίτρινο
480-510	Κυανό-Πράσινο	590-630	Πορτοκαλί
510-550	Πράσινο	630-700	Κόκκινο

5.2 Η κυματική εξίσωση

Από πειράματα έχει αποδειχθεί ότι το ηλεκτρικό διάνυσμα παίζει το κύριο ρόλο στις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια φωτογραφική πλάκα, γι'αυτό και θα παίζει τον κύριο ρόλο στη περαιτέρω ανάλυση. Εφόσον το φως μπορεί να αποδοθεί με τη μορφή μιας εγκάρσιας κυματοειδούς κίνησης, είναι δυνατόν να εκφράσουμε το μέτρο του διανύσματος του φωτός με τη μορφή μιας μονοδιάστατης

κυματικής εξίσωσης. Ειδικά για την πιο απλή μορφή του, στην οποία το φωτεινό κύμα είναι επίπεδο, η συνάρτηση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

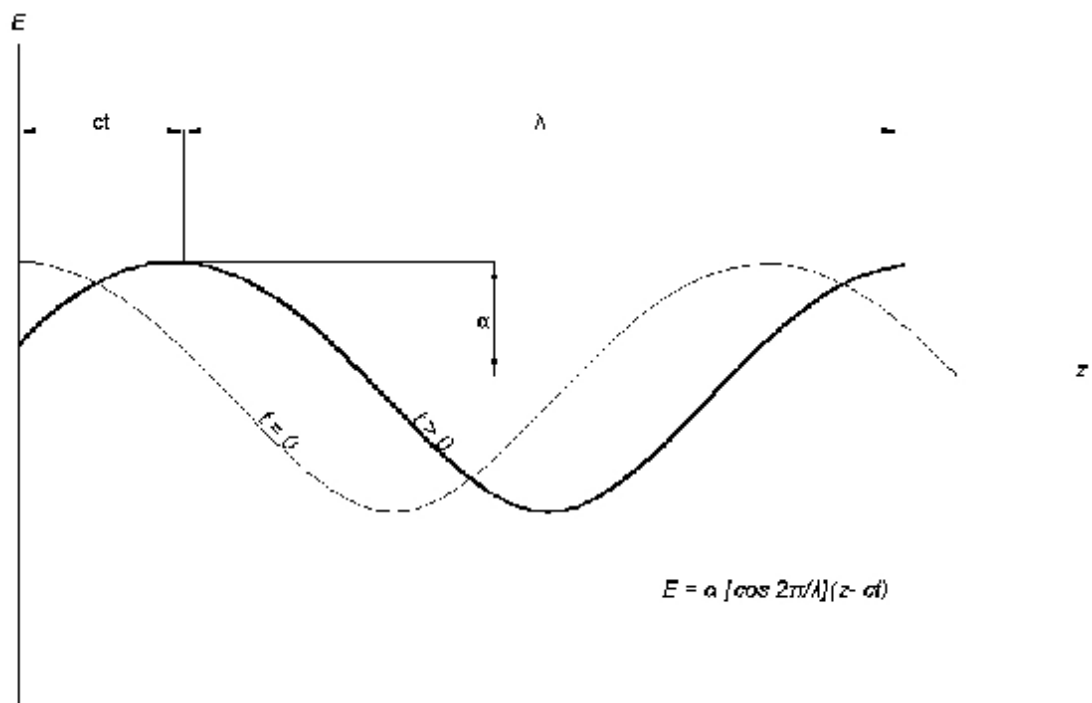
$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda}(z - ct) \quad \text{Εξ. 5.2}$$

Όπου: E είναι το μέτρο του διανύσματος του φωτός
 z είναι θέση κατά μήκος του άξονα μετάδοσης του φωτός
 t είναι ο χρόνος
 a είναι σταθερά που είναι το μήκος κύματος

Η απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων κορυφών του κύματος είναι το μήκος κύματος λ . Ο χρόνος που απαιτείται για να διανυθεί η απόσταση λ είναι η περίοδος T για την οποία ισχύει $T = \frac{\lambda}{c}$. Η συχνότητα f του διανύσματος του φωτός είναι ο αριθμός των

ταλαντώσεων ανά χρονική περίοδο, οπότε έχουμε $f = \frac{c}{\lambda}$.

Για την αναπαράσταση της παραπάνω εξίσωσης σε ημιτονοειδή μορφή χρησιμοποιούνται οι όροι γωνιακή συχνότητα και αριθμός κύματος, οι οποίοι δίνονται από τις σχέσεις:



Σχήμα 5.1 Γραφική αναπαράσταση του διανύσματος του φωτός σαν συνάρτηση της θέσης του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης του

$$w = \frac{2p}{T} = 2pf$$

$$\xi = 2\pi\lambda$$

Εξ. 5.3

οπότε αντικαθιστώντας έχουμε:

$$E = \alpha \cos(\xi z - \omega t) \quad \text{Εξ. 5.4}$$

Για τη περίπτωση στην οποία, δύο κύματα έχουν ίδιο μήκος κύματος αλλά διαφορετική φάση, αυτά μπορούν να εκφραστούν ως:

$$E_1 = \alpha \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_1 - ct)$$
$$E_2 = \alpha \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_2 - ct) \quad \text{Εξ. 5.5}$$

Όπου δ_1 είναι η αρχική φάση του E_1 και δ_2 είναι η αρχική φάση του E_2 ενώ $\delta = \delta_2 - \delta_1$ είναι η γραμμική διαφορά φάσεων μεταξύ των κυμάτων, η οποία λέγεται και υστέρηση λόγω του ότι το δεύτερο κύμα ακολουθεί το πρώτο.

Το μέγεθος του διανύσματος του φωτός μπορεί επίσης να αποδοθεί και σαν συνάρτηση του χρόνου σε μια συγκεκριμένη θέση κατά μήκος της ακτίνας. Αυτή η αναπαράσταση είναι χρήσιμη, καθώς το μάτι και άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν το φως βρίσκονται κανονικά σε σταθερές θέσεις παρατήρησης.

5.3 Υπέρθωση κυμάτων

Στις τεχνικές της φωτοελαστικότητας και του φαινομένου μοιρέ που θα χρησιμοποιηθούν στη παρούσα εργασία, συναντούμε φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με την υπέρθεση κυμάτων που έχουν ίδια συχνότητα αλλά διαφορετικό πλάτος. Σε

για συγκεκριμένη θέση z_0 κατά μήκος του άξονα μετάδοσης του φωτός z , η εξίσωση του φωτός μπορεί να γραφεί ως:

$$E_1 = a_1 \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_1 - ct) = a_1 \cos(\phi_1 - \omega t) \quad \text{Εξ. 5.6α}$$

$$E_2 = a_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta_2 - ct) = a_2 \cos(\phi_2 - \omega t) \quad \text{Εξ. 5.6β}$$

Όπου ϕ_1 είναι η γωνία φάσης για το E_1 και είναι η γωνία φάσης για το E_2 . Αν εξετάσουμε καταρχήν τη περίπτωση κατά την οποία τα δύο κύματα ταλαντώνονται στο ίδιο επίπεδο. Το μέτρο του συνιστάμενου διανύσματος φωτός θα είναι:

$$E = E_1 + E_2 \quad \text{Εξ. 5.7}$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 5.6 στην 5.7 έχουμε

$$\begin{aligned} E &= a_1 (\cos \omega t \cos \phi_1 + \sin \omega t \sin \phi_1) + a_2 (\cos \omega t \cos \phi_2 + \sin \omega t \sin \phi_2) \\ &= \cos \omega t (a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2) + \sin \omega t (a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2) \\ &= a \cos \phi \cos \alpha \sin \phi \sin \omega t = a \cos(\phi - \omega t) \end{aligned} \quad \text{Εξ. 5.8}$$

$$\text{όπου } a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2$$

$$\text{και } \tan \varphi = \frac{\alpha_1 \sin \varphi_1 + \alpha_2 \sin \varphi_2}{\alpha_1 \cos \varphi_1 + \alpha_2 \cos \varphi_2}$$

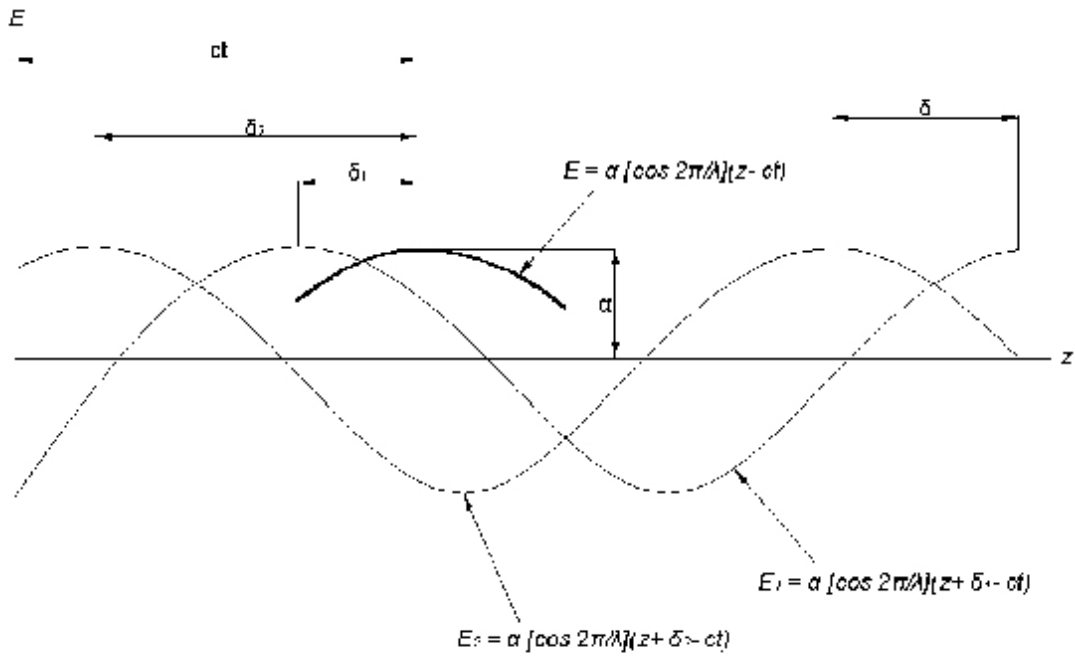
Η εξίσωση $E = a \cos(\varphi - \omega t)$ μας δείχνει ότι το κύμα που αποτελεί το συνδυασμός των δύο κυμάτων έχει μεν ίδια συχνότητα έχει όμως διαφορετικό πλάτος και διαφορετική γωνία φάσης. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί και στην πρόσθεση τριών ή περισσότερων κυμάτων.

Μια ειδική υποπερίπτωση εμφανίζεται όταν τα πλάτη των αρχικών κυμάτων είναι ίσα. Σε αυτή τη περίπτωση το μήκος κύματος μας δίνεται από την σχέση:

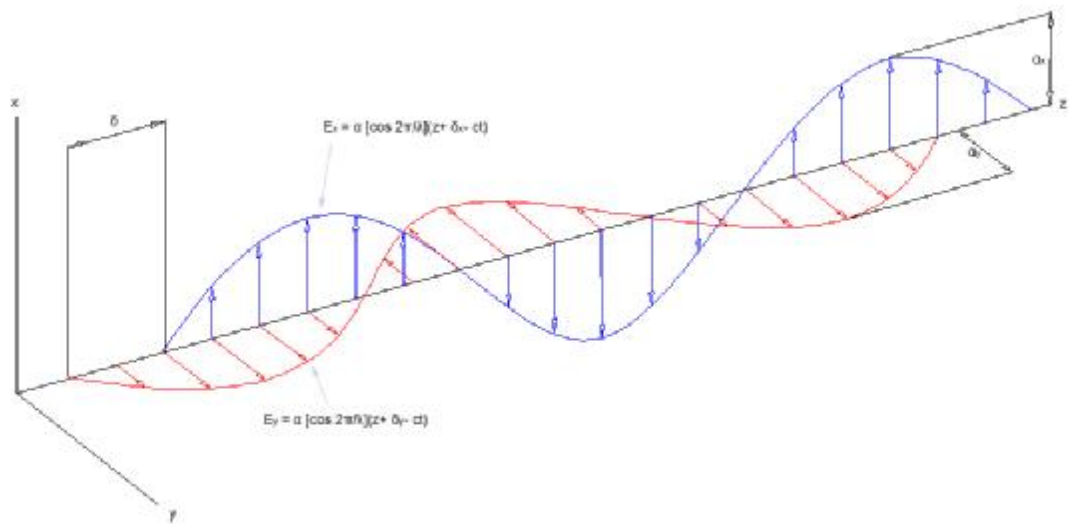
$$\alpha = \sqrt{2\alpha_1^2 [1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1)]} \quad \text{Εξ. 5.9}$$

και εφόσον $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\delta/\lambda$

$$\alpha = \sqrt{2\alpha_1^2 \left(1 + \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda}\right)} = \sqrt{4\alpha_1^2 \cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda}} \quad \text{Εξ. 5.10}$$



Σχήμα 5.2 Μέτρο του διανύσματος φωτός σαν συνάρτηση της θέσης του στον άξονα μετάδοσης για δύο κύματα που έχουν ίδιο πλάτος και συχνότητα αλλά διαφορετική αρχική φάση



Σχήμα 5.3 Δύο γραμμικά πολωμένα κύματα φωτός που έχουν την ίδια συχνότητα και κάθετα μεταξύ τους επίπεδα δόνησης

5.4 Διάθλαση και ανάκλαση φωτός

Όταν το φως περνάει μέσα από οποιοδήποτε άλλο μέσο εκτός από το κενό, υφίσταται μια μείωση της ταχύτητας του. Η αναλογία της ταχύτητας του φωτός στο κενό με αυτή που έχει όταν περνάει μέσα από κάποιο μέσο είναι, αποτελεί τον δείκτη διάθλασης του μέσου n . Για τα περισσότερα αέρια ο δείκτης διάθλασης είναι ελαφρά μόνο μεγαλύτερος από τη μονάδα (για τον αέρα $n=1.0003$). Είναι αυτονόητο ότι το n είναι πάντα μεγαλύτερο από τη μονάδα γιατί η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Εφόσον η συχνότητα ενός κύματος φωτός είναι ανεξάρτητη από το υλικό μέσα στο οποίο αυτό διαδίδεται, το μήκος κύματος είναι μικρότερο σε ένα υλικό απ'ότι στο κενό. Έτσι ένα κύμα που μεταδίδεται μέσα σε κάποιο υλικό θα αναπτύξει μια γραμμική φάση δ σε σχέση με ένα αντίστοιχο κύμα που ταξιδεύει στο κενό. Η χρονική περίοδος που απαιτείται για να περάσει ένα κύμα μέσα από ένα υλικό πάχους h είναι:

$$t = \frac{h}{v} \quad \text{Εξ. 5.11}$$

όπου h είναι το πάχος του υλικού που βρίσκεται κατά μήκος της ευθείας μετάδοσης του κύματος και v είναι η ταχύτητα που έχει το φως στο υλικό. Η απόσταση s που καλύπτεται κατά την αντίστοιχη περίοδο από το κύμα φωτός που ταξιδεύει στο κενό είναι:

$$s = ct = \frac{ch}{v} \quad \text{Εξ. 5.12}$$

Έτσι η απόσταση δ που είναι η διαφορά μεταξύ του κύματος που μεταδίδεται στο υλικό και του κύματος που μεταδίδεται στο κενό είναι:

$$\delta = s - h = \frac{ch}{v} - h = h(n - 1) \quad \text{Εξ. 5.13}$$

Όταν μια ακτίνα φωτός πέφτει πάνω στην επιφάνεια ενός διαφανούς σώματος, περνώντας μέσα από ένα άλλο, με διαφορετικό δείκτη διάθλασης, διαιρείται σε δύο ακτίνες από τις οποίες η μία διαθλάται και η άλλα ανακλάται. Οι δύο αυτές ακτίνες βρίσκονται στο επίπεδο που ορίζεται από την προσπίπτουσα στην επιφάνεια ακτίνα και την κάθετη στην επιφάνεια ευθεία. Το επίπεδο αυτό είναι γνωστό επίπεδο πρόσπτωσης (plane of incidence). Η γωνία πρόσπτωσης α , η γωνία ανάκλασης β και η γωνία διάθλασης γ σχετίζονται μεταξύ τους ως εξής:

$$\alpha = \beta \quad \text{Εξ. 5.14α}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2} = n_{21} \quad \text{Εξ. 5.14β}$$

Όπου n_1 είναι ο δείκτης διάθλασης για το υλικό 1, n_2 είναι ο δείκτης διάθλασης για το υλικό 2 και n_{21} είναι ο δείκτης διάθλασης για το υλικό 2 σε σχέση με το υλικό 1.

Μέχρι στιγμής, αναφερθήκαμε σε περιπτώσεις που τα υλικά είναι οπτικά ισότροπα, όπου δηλαδή ο δείκτης διάθλασης είναι ο ίδιος για όλες τις κατευθύνσεις μέσα στο υλικό. Όταν μια ακτίνα φωτός κατευθύνεται με ορθή γωνία πάνω στην επιφάνεια

συγκεκριμένων υλικών η ακτίνα φωτός διασπάται όχι σε δύο αλλά σε τρεις ακτίνες. Η μία από τις ακτίνες ανακλάται και οι άλλες δύο συνεχίζουν τη πορεία του μέσα στο σώμα.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο διπλής διάθλασης (double refraction), και το υλικό ονομάζεται birefringent. Η μία από τις δύο ακτίνες ονομάζεται κανονική ακτίνα (ordinary ray) και ταξιδεύει με κανονική ταχύτητα όπως προβλέπεται από την εξίσωση 5.13. Η άλλη ονομάζεται extraordinary ray και η ταχύτητα της δεν προβλέπεται από την εξίσωση 5.13. Σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση μέσα στο υλικό οι δύο ακτίνες ταξιδεύουν με την ίδια ταχύτητα. Αυτή η κατεύθυνση είναι ο οπτικός άξονας του υλικού.

Πολλά διαφανή υλικά τα οποία είναι ισότροπα από οπτικής πλευράς όταν δεν βρίσκονται υπό τάση, γίνονται οπτικά ανισότροπα όταν εμφανίζεται κάποια τάση σε αυτά. Αυτό διαρκεί για όσο χρονικό διάστημα η τάση υφίσταται, ενώ εξαφανίζεται όταν η τάση μηδενιστεί. Αυτό το φαινόμενο, είναι γνωστό ως temporary double refraction. Η μέθοδος της φωτοελαστικότητας βασίζεται σε αυτό το φαινόμενο.

5.5 Wave plates

Το Wave plate είναι ένα οπτικό στοιχείο το οποίο έχει την ιδιότητα να διασπά το φως που το διαπερνάει σε δύο ορθογώνιες μεταξύ τους συνιστώσες, οι οποίες μεταδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες. Η μετάδοση του φωτός κατά μήκος του άξονα 1 γίνεται με ταχύτητα c_1 και η μετάδοση κατά μήκος του άξονα 2 γίνεται με ταχύτητα c_2 . Επειδή η c_1 είναι μεγαλύτερη από τη c_2 ο άξονας 1 λέγεται γρήγορος άξονας ενώ ο 2 αργός.

Εάν μια διαθλαστική πλάκα τοποθετηθεί σε ένα πεδίο πολωμένου φωτός με τρόπο τέτοιο ώστε το διάνυσμα E_t να σχηματίζει γωνία β με τον άξονα 1, τότε κατά την

είσοδο του στην πλάκα, το διάνυσμα διασπάται σε δύο συνιστώσες, την E_{t1} και την E_{t2} , κατά μήκος του άξονα 1 και 2 αντίστοιχα. Το μέτρο των διανυσμάτων αυτών είναι:

$$E_{t1} = E_t \cos\beta = a \cos a \cos \omega t \cos\beta = k \cos \omega t \cos\beta \quad \text{Εξ. 5.15α}$$

$$E_{t2} = E_t \sin\beta = a \cos a \cos \omega t \sin\beta = k \cos \omega t \sin\beta \quad \text{Εξ. 5.15β}$$

όπου $k = a \cos a$. Οι συνιστώσες του φωτός E_{t1} και E_{t2} διατρέχουν την πλάκα με ταχύτητες c_1 και c_2 αντίστοιχα. Λόγω αυτής ακριβώς της διαφοράς στην ταχύτητα, οι δύο συνιστώσες θα βγουν από την πλάκα σε διαφορετικό χρόνο. Με άλλα λόγια, η μια συνιστώσα θα έχει μια υστέρηση στο χρόνο σε σχέση με την άλλη. Αυτή η υστέρηση μπορεί να απεικονισθεί αποτελεσματικά, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική φάση μεταξύ των δύο συνιστωσών. Από την εξίσωση (), η γραμμική φάση για τις συνιστώσες E_{t1} και E_{t2} , σε σχέση με ένα κύμα στον αέρα μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\delta_1 = h(n_1 - n) \quad \text{Εξ. 5.16α}$$

$$\delta_2 = h(n_2 - n) \quad \text{Εξ. 5.16β}$$

Η σχετική γωνιακή φάση Δ μεταξύ των δύο συνιστωσών όπως αυτές βγαίνουν από την πλάκα δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi h(n_2 - n_1)}{\lambda} \quad \text{Εξ. 5.17}$$

Η σχετική φάση Δ που προκύπτει από μια διδιαθλαστική πλάκα εξαρτάται από το πάχος h , το μήκος κύματος του φωτός λ , και τις ιδιότητες της πλάκας σε ότι αφορά τους δείκτες διάθλασης n_1, n_2 . Όταν η διδιαθλαστική πλάκα είναι σχεδιασμένη για να δείνει γωνιακή διαφορά φάσης $\pi/2$ τότε λέγεται quarter wave plate, ενώ όταν δίνει διαφορά φάσης π και 2π τότε λέγονται half και full wave plates αντίστοιχα.

5.6 Ο νόμος stress optic

Η θεωρία που συνδέει τις αλλαγές των δεικτών διάθλασης των υλικών με τη κατάσταση έντασης στα υλικά οφείλεται στον Maxwell, ο οποίος παρατήρησε ότι οι αλλαγές σε αυτούς τους δείκτες συνδέονται γραμμικά με τις αλλαγές στα φορτία, ακολουθώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_1 &= c_1 \sigma_2 + c_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= c_1 \sigma_3 + c_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \quad \text{Εξ. 5.18}$$

όπου $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι οι κύριες τάσεις στο σημείο, n_0 είναι ο δείκτης διάθλασης σε κατάσταση ηρεμίας, n_1, n_2, n_3 , είναι οι δείκτες διάθλασης του υλικού σε κατάσταση έντασης όπως αυτοί συνδέονται με τις διευθύνσεις κυρίων τάσεων και είναι σταθερές γνωστές ως συντελεστές stress optic.

Αυτές οι εξισώσεις είναι γνωστές και ως νόμος stress optic, και μας δείχνουν πως μπορούμε να καθορίσουμε πλήρως την εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του σώματος μετρώντας τους τρεις δείκτες διάθλασης των κυρίων τάσεων. Λόγω του ότι είναι δύσκολο να μετρηθούν οι δείκτες στην περίπτωση των τριών διαστάσεων, οι

πρακτικές εφαρμογές περιορίζονται στις δύο διαστάσεις, στη περίπτωση δηλαδή της επίπεδης εντατικής κατάστασης όπου και έχουμε:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= c_1 \sigma_1 + c_2 \sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= c_1 \sigma_2 + c_2 \sigma_1 \end{aligned} \quad \text{Εξ. 5.19}$$

Οι απόλυτες υστερήσεις μετρούνται με ιντερφερόμετρο (interferometer). Αν και το ιντερφερόμετρο είναι πολύ ακριβές στη μετρήσεις, είναι όμως δύσκολο στη χρήση του και χρονοβόρο. Γι'αυτό το λόγο η φωτοελαστικότητα, που είναι μέθοδος που μετράει σχετική υστέρηση, είναι πιο διαδεδομένη. Μπορούμε να μετατρέψουμε τις εξισώσεις 3.18 για να απαλειφθεί ο όρος n_0

$$\begin{aligned} n_2 - n_1 &= (c_2 - c_1)(\sigma_1 - \sigma_2) = c (\sigma_1 - \sigma_2) \\ n_3 - n_2 &= (c_2 - c_1)(\sigma_2 - \sigma_3) = c (\sigma_2 - \sigma_3) \\ n_1 - n_3 &= (c_2 - c_1)(\sigma_3 - \sigma_1) = c (\sigma_3 - \sigma_1) \end{aligned} \quad \text{Εξ. 5.20}$$

όπου $c = c_2 - c_1$ είναι ο σχετικός συντελεστής stress optic

Ένα φωτοελαστικό μοντέλο υπό συνθήκες φόρτισης συμπεριφέρεται σαν ένα προσωρινό wave plate. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδεθεί η σχετική υστέρηση Δ με τις αλλαγές που επέρχονται στους δείκτες διάθλασης του μοντέλου ακριβώς λόγω της φόρτισης. Για παράδειγμα, αν πάρουμε μια φέτα του μοντέλου πάχους h της οποίας η επιφάνεια να είναι κάθετη προς τη διεύθυνση κάποιας κύριας τάσης, και μια ακτίνα πολωμένου φωτός περάσει επίσης κάθετα από την επιφάνεια

αυτή τότε αντικαθιστώντας την εξίσωση 3.17 σε κάθε μια από τις προηγούμενες εξισώσεις θα έχουμε:

$$\Delta_{12} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \Delta_{23} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_2 - \sigma_3) \quad \Delta_{31} = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_3 - \sigma_1)$$

Εξ. 5.21

Όπου το Δ_{12} είναι το μέγεθος της σχετικής υστέρησης που αναπτύσσεται μεταξύ των συνιστωσών μιας φωτεινής ακτίνας που μεταδίδεται προς τη κατεύθυνση σ_3 . Αντίστοιχα ισχύουν και για τις υστερήσεις Δ_{23} και Δ_{31} .

Όπως φαίνεται, η σχετική υστέρηση Δ είναι γραμμικά ανάλογη με την διαφορά των δύο κυρίων τάσεων που έχουν κατευθύνσεις κάθετες στη διεύθυνση μετάδοσης της φωτεινής ακτίνας. Είναι επίσης ανάλογη με το πάχος του μοντέλου και αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος λ του φωτός που χρησιμοποιείται. Ο συντελεστής c συνήθως θεωρείται σα σταθερός ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται, και ανεξάρτητα από το μήκος κύματος του φωτός.

Για την περίπτωση των προβλημάτων επίπεδης έντασης, όπου η μία κύρια τάση είναι μηδενική, ο νόμος stress optic απλοποιείται και γίνεται

$$\Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

Εξ. 5.22

Η εξίσωση αυτή μετατρέπεται σε:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h}$$

Εξ. 5.23

όπου το $N = \frac{\Delta}{2\pi}$ και είναι αδιάστατο, ενώ το $f_\sigma = \frac{\lambda}{c}$ (N/m) είναι μια παράμετρος διαφορετική για κάθε υλικό και μήκος κύματος φωτός που λέγεται material fringe value, και το h είναι το πάχος του μοντέλου.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, αν έχουμε στην διάθεση μας το material fringe value f_σ του υλικού με το οποίο εργαζόμαστε, μπορούμε για κάθε σημείο του μοντέλου για το οποίο έχουμε συγκεκριμένο fringe order N και πάχος h , να εξάγουμε την διαφορά μεταξύ των κυρίων τάσεων. Ουσιαστικά λοιπόν, ο σκοπός του πολωροσκοπίου είναι να καθορίσει το fringe order για κάθε σημείο του μοντέλου.

Αν το φωτοελαστικό μοντέλο παρουσιάζει μια γραμμική ελαστική συμπεριφορά, από τη διαφορά μεταξύ σ_1 και σ_2 μπορούμε άμεσα να βρούμε και τη διαφορά $\epsilon_1 - \epsilon_2$, καθώς η σχέση μεταξύ τροπών και τάσεων για την επίπεδη ένταση δίνεται από τον τύπο:

$$\epsilon_1 = \frac{(\sigma_1 - \nu\sigma_2)}{E} \quad \epsilon_2 = \frac{(\sigma_2 - \nu\sigma_1)}{E}$$

Εξ. 5.24

αφαιρώντας τη μια από την άλλη παίρνουμε:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{E}(1 + \nu)$$

Εξ. 5.25

Αντικαθιστώντας αυτά τα αποτελέσματα στην

$$\frac{Nf_\sigma}{h} = \frac{E(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(1 + \nu)}$$

Εξ. 5.26

Από την εξίσωση αυτή μπορούμε να βγάλουμε μια νέα παράμετρο, την f_ε που είναι:

$$f_\varepsilon = \frac{1 + \nu}{E} f_\sigma$$

Εξ. 5.27

οπότε θα έχουμε:

$$\frac{Nf_\varepsilon}{h} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

Εξ. 5.28

Όπου f_c είναι το material fringe value για τις τροπές.

5.7 Ένταση του φωτός

Στα περισσότερα θέματα οπτικής, το μήκος κύματος είναι σημαντικό, ενώ η χρονική διακύμανση δεν είναι. Αυτό προκύπτει από το ότι το μάτι και άλλα οπτικά όργανα αποκρίνονται σε αυτό που ονομάζεται ένταση του φωτός, η οποία είναι ανάλογη με το τετράγωνο του μήκους κύματος, αλλά δεν μπορούν να εντοπίσουν ταχείες μεταβολές. Έτσι, για την ειδική περίπτωση των δύο κυμάτων ίσου μήκους κύματος η ένταση δίνεται από τη σχέση

$$I \cong \alpha^2 = 4\alpha_1^2 \cos^2 \frac{\pi\delta}{\lambda} \quad \text{Εξ. 5.29}$$

Η εξίσωση αυτή μας δείχνει ότι η ένταση του φωτός που προκύπτει από την υπέρθεση δύο κυμάτων ίσου μήκους κύματος είναι συνάρτηση της γραμμικής διαφοράς φάσης δ μεταξύ των κυμάτων. Η ένταση του προκύπτοντος κύματος παίρνει την μέγιστη αξία του όταν το $\delta = n\lambda$ για $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Έτσι:

$$I = 4 \alpha_1^2 \quad \text{Εξ. 5.30}$$

Αντίθετα, η ένταση του κύματος που προκύπτει παίρνει την ελάχιστη τιμή του όταν $\delta = [(2n+1)/2]\lambda$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Οπότε:

$$I = 0$$

Η μεταβολή της έντασης από την υπέρθεση κυμάτων φωτός ονομάζεται (interference effect). Στη πρώτη περίπτωση, όπου $I = 4 a^2_1$ έχουμε (constructive interference), ενώ όταν $I = 0$ έχουμε (destructive interference). Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντικές εφαρμογές στις μεθόδους φωτοελαστικότητας, μοιρέ, και ολογραφίας.

5.8 Πολωμένο φως

Το φωτεινό κύμα που δονείται σε περισσότερα από ένα επίπεδα λέγεται μη πολωμένο φως, όπως είναι το φως που εκπέμπεται από τον ήλιο ή μια απλή λάμπα πυράκτωσης. Τέτοια φωτεινά κύματα δημιουργούνται όταν μια ηλεκτρική κένωση που δονείται σε ποικίλες διευθύνσεις, δημιουργώντας έτσι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που και αυτό με τη σειρά του δονείται σε ποικίλες κατευθύνσεις. Καθώς ή νοερή απεικόνιση του μη πολωμένου φωτός είναι δύσκολη, είναι χρήσιμο να απεικονίσουμε το μη πολωμένο φως σαν ένα κύμα που έχει ένα μέσο όρο των δονήσεων του σε ένα οριζόντιο επίπεδο και τις μισές του σε ένα κάθετο επίπεδο.

Είναι δυνατό να μετατρέψουμε το μη πολωμένο φως σε πολωμένο φως. Τα κύματα πολωμένου φωτός είναι κύματα των οποίων οι δονήσεις εμφανίζονται σε ένα μόνο επίπεδο. Η διαδικασία μετατροπής του μη πολωμένου φωτός σε πολωμένο λέγεται πόλωση. Υπάρχει μια ποικιλία μεθόδων για την επίτευξη αυτού του σκοπού, η πιο διαδεδομένη όμως είναι η πόλωση με τη χρήση φίλτρου Polaroid. Τα φίλτρα Polaroid κατασκευάζονται από ένα ειδικό υλικό που είναι ικανό να εμποδίζει τη διέλευση ενός από τα δύο επίπεδα δονήσεως ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Με αυτή την έννοια ένα Polaroid χρησιμεύει σαν μια συσκευή η οποία φιλτράρει περίπου

τις μισές από τις δονήσεις του κύματος κατά την διέλευση του μέσα από το φίλτρο, ενώ κατά τη έξοδο του, το κύμα έχει τη μισή του ένταση και δονήσεις μόνο σε ένα επίπεδο. Το επίπεδο πάνω στο οποίο μεταδίδεται το μέρος του κύματος που περνάει από το φίλτρο καθορίζει και τον άξονα πόλωσης του φίλτρου, καθώς είναι παράλληλο με αυτόν.

Όπως έχουμε δει, εάν υποθέσουμε ότι ο πολωτής βρίσκεται στο τυχαίο σημείο z_0 κατά μήκος του άξονα z , η εξίσωση του διανύσματος του φωτός θα είναι:

$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda}(z_0 - ct) \quad \text{Εξ. 5.30}$$

Εφόσον η αρχική φάση του κύματος δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο εδώ, η εξ. () μπορεί να γίνει:

$$E = a \cos 2\pi ft = a \cos \omega t \quad \text{Εξ. 5.31}$$

Όπου ο τύπος $\omega = 2\pi f$ είναι γνωστός και σαν κυκλική συχνότητα του κύματος. Η συνιστώσα του διανύσματος του φωτός που απορροφάται, και η συνιστώσα που τελικά μεταδίδεται είναι αντίστοιχα:

$$E_a = a \cos\omega t \sin a \qquad E_t = a \cos\omega t \cos a \qquad \text{Εξ. 5.32}$$

Όπου a είναι η γωνία μεταξύ του άξονα πόλωσης και του διανύσματος του φωτός.

5.9 Πολαροσκόπια

Τα δύο βασικά είδη πολαροσκοπίων είναι το επίπεδο πολαροσκόπιο (plane polariscope) και το κυκλικό (circular polariscope). Στο επίπεδο πολαροσκόπιο, το προς μελέτη αντικείμενο τοποθετείται ανάμεσα σε ένα πολωτή (polarizer) και σε ένα αναλυτή (analyzer). Η προσπίπτουσα στον πολωτή ακτίνα φωτός, αναλύεται σε δύο κύματα τα οποία πάλλονται παράλληλα και κάθετα στον άξονα του πολωτή. Το επίπεδο πολαροσκόπιο χρησιμοποιείται για την εύρεση της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων.

Στο κυκλικό πολαροσκόπιο, ανάμεσα στο αντικείμενο και στον πολωτή και τον αναλυτή, εισάγονται δύο quarter wave plates ένα από κάθε πλευρά του αντικειμένου και με τέτοιο τρόπο ώστε άξονες τους να σχηματίσουν γωνία 45° με τους άξονες του πολωτή και του αναλυτή. Με αυτό τον τρόπο απαλείφονται οι ισοκλινείς γραμμές, και παραμένουν μόνο οι ισοχρωματικές.

5.10 Επίπεδο πολαροσκόπιο

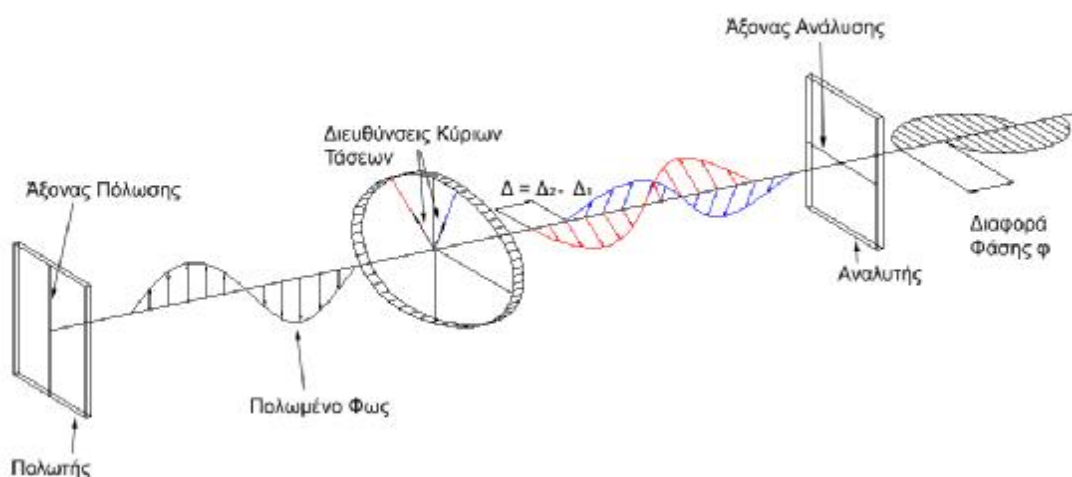
Θα δούμε τη περίπτωση ενός μοντέλου το οποίο υφίσταται επίπεδη καταπόνηση και το οποίο εισέρχεται μέσα στο πεδίο ενός επίπεδου πολαροσκοπίου, με την επιφάνεια του να είναι κάθετη στον άξονα του πολαροσκοπίου, Όπως

προαναφέρθηκε, από το φωτεινό κύμα που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του πολωτή, η μια συνιστώσα περνάει ενώ η άλλη απορροφάται. Εφόσον η αρχική φάση του κύματος δεν είναι σημαντική για την ανάλυση που ακολουθεί, η πολωμένη φωτεινή ακτίνα όπως αυτή εξέρχεται από τον πολωτή μπορεί να παρασταθεί ως:

$$E_y = k \cos \omega t \quad \text{Εξ. 5.33}$$

Αφού η ακτίνα αφήσει τον πολωτή, εισέρχεται στο μοντέλο. Εφόσον το υπό φορτίο μοντέλο παρουσιάζει τις οπτικές ιδιότητες ενός wave plate, η το διάνυσμα της φωτεινής ακτίνας αναλύεται σε δύο συνιστώσες E_1 και E_2 που πάλλονται σε επίπεδα παράλληλα με τις κατευθύνσεις των δύο κύριων τάσεων στο συγκεκριμένο σημείο. Έτσι ονομάζοντας α την γωνία που σχηματίζει η μία από τις κύριες τάσεις με τον άξονα πόλωσης του πολωτή, έχουμε

$$E_1 = k \cos \alpha \cos \omega t \quad E_2 = k \sin \alpha \cos \omega t \quad \text{Εξ. 5.34}$$



Σχήμα 5.4 Διάταξη επίπεδου πολωροσκοπίου

Εφόσον οι δύο συνιστώσες μεταδίδονται μέσα στο μοντέλο με διαφορετικές ταχύτητες ($c > v_1 > v_2$), αναπτύσσουν μια διαφορά φάσης Δ_1 και Δ_2 σε σχέση με ένα κύμα στον αέρα. Έτσι η μορφή των κυμάτων, με την έξοδο τους από το μοντέλο περιγράφεται ως:

$$E_1' = k \cos \alpha \cos(\omega t - \Delta_1) \quad E_2' = k \sin \alpha \cos(\omega t - \Delta_2) \quad \text{Εξ. 5.35}$$

Όπου:

$$\Delta_1 = \frac{2\pi h(n_1 - 1)}{\lambda} \quad \Delta_2 = \frac{2\pi h(n_2 - 1)}{\lambda} \quad \text{Εξ. 5.36}$$

Αφήνοντας το μοντέλο, οι δύο συνιστώσες συνεχίζουν να μεταδίδονται χωρίς περαιτέρω αλλαγές και εισέρχονται στον αναλυτή. Οι συνιστώσες E_1' και E_2' αναλύονται σε οριζόντιες συνιστώσες E''_1 και E''_2 καθώς επίσης και σε κάθετες συνιστώσες. Οι κάθετες συνιστώσες απορροφούνται.

Οι οριζόντιες συνιστώσες που περνάνε από τον αναλυτή συνδυάζονται για να δώσουν το νέο διάνυσμα φωτός $E_{\alpha\alpha}$, που προκύπτει από την εξίσωση:

$$E_{\alpha\alpha} = E_2'' - E_1'' = E_2' \cos \alpha - E_1' \sin \alpha \quad \text{Εξ. 5.37}$$

Αντικαθιστώντας την 5.35 στην 5.37 έχουμε:

$$E_{\alpha x} = k \sin \alpha \cos \alpha [\cos(\omega t - \Delta_2) - \cos(\omega t - \Delta_1)] = \quad \text{Εξ. 5.38}$$

$$k \sin 2\alpha \sin \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right)$$

Εφόσον η ένταση του φωτός είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους κύματος του φωτός, το φως που βγαίνει από τον αναλυτή ενός επίπεδου πολαροσκοπίου, δίνεται από τη σχέση:

$$I = K \sin^2 2\alpha \sin^2 \Delta/2 \quad \text{Εξ. 5.39}$$

$$\text{όπου } \Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \frac{2\pi h(n_2 - n_1)}{\lambda} = \frac{2\pi h c(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda}$$

Από την εξίσωση 5.39 προκύπτει ότι η εξάλειψη ($I = 0$) εμφανίζεται είτε όταν έχουμε $\sin 2\alpha = 0$ είτε όταν έχουμε $\sin^2 \frac{\Delta}{2} = 0$. Έτσι στη μια περίπτωση οι συνθήκες εξάλειψης σχετίζονται με τη κατεύθυνση των κυρίων τάσεων, ενώ στην άλλη σχετίζονται με τη διαφορά των κυρίων τάσεων:

Περίπτωση α: όταν έχουμε $2\alpha = n\pi$, όπου $n = 1, 2, \dots$ $\sin^2 2\alpha = 0$, παρουσιάζεται το φαινόμενο της εξάλειψης. Δηλαδή, όταν μία από τις κατευθύνσεις

των κύριων τάσεων συμπίπτει με τον άξονα πόλωσης ($\alpha = 0, \pi/2$ ή οποιοδήποτε πολλαπλάσιο του $\pi/2$), η ένταση του φωτός είναι 0.

Περίπτωση β: όταν έχουμε $\Delta/2 = n\pi$, όπου $n = 1, 2, \dots \sin^2(\Delta/2) = 0$ παρουσιάζεται το φαινόμενο της εξάλειψης. Δηλαδή, όταν η διαφορά μεταξύ των κυρίων τάσεων είναι είτε 0 ($n = 0$) είτε αρκετές για να παράγουν ένα ακέραιο αριθμό μήκους κύματος ή υστέρησης ($n = 1, 2, 3, \dots$), η ένταση του φωτός είναι και πάλι 0.

Συνδυάζοντας την εξ. 5.22 με το $\Delta/2 = n\pi$ προκύπτει ότι:

$$n = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad \text{Εξ. 5.40}$$

Από αυτό το τύπο φαίνεται ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την σειρά εξάλειψης n είναι από τη μια πλευρά η διαφορά μεταξύ των κυρίων τάσεων, και από την άλλη το μήκος κύματος λ του φωτός που χρησιμοποιείται. Από αυτό εξηγείται και η διαφορά που έχει η μορφή των ισοχρωματικών γραμμών, όταν αντί για λευκό φως χρησιμοποιούμε μονοχρωματικό. Με τη χρήση μονοχρωματικού φωτός, οι ισοχρωματικές γραμμές εμφανίζονται σαν ένα σύνολο σκούρων γραμμών, εκεί που η ένταση του φωτός είναι 0, όταν έχουμε δηλαδή $n = 1, 2, 3$. Με το λευκό φως, όπου όλα τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος είναι παρόντα, οι ισοχρωματικές εμφανίζονται σαν μια σειρά από χρωματιστές περιοχές που διαδέχονται η μια την άλλη. Σε αυτή τη περίπτωση, η ένταση του φωτός είναι 0 και η μαύρη γραμμή εμφανίζεται μόνο στη περίπτωση όπου η διαφορά μεταξύ των κυρίων τάσεων είναι μηδενική, και μια μηδενική σειρά εξάλειψης εμφανίζεται για όλα τα μήκη κύματος του φωτός. Σε καμία άλλη περιοχή του μοντέλου δεν είναι δυνατόν να έχουμε

μηδενική ένταση, και άρα μαύρο χρώμα, καθώς η διαφορά μεταξύ των κυρίων τάσεων που απαιτείται για την παραγωγή μιας δεδομένης σειράς εξάλειψης, είναι διαφορετική και κάθε ένα από τα μήκη κύματος.

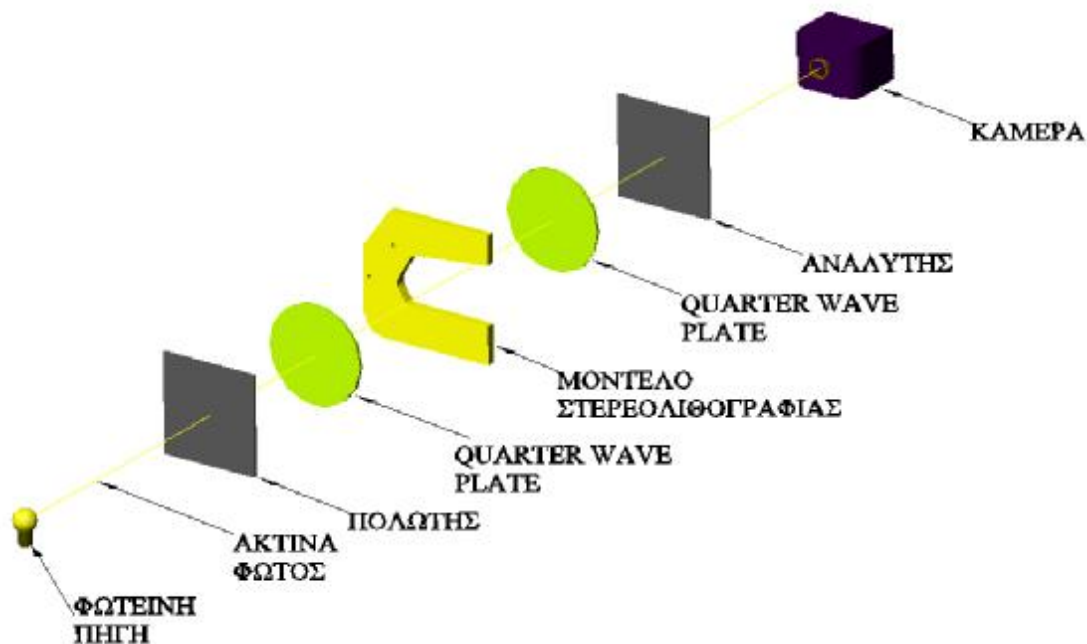
Με την αύξηση του δείκτη διάθλασης, από σημείο σε σημείο του μοντέλου, κάθε χρώμα του φάσματος εξαλείφεται με τη σειρά, ανάλογα με το μήκος κύματος του (ξεκινώντας με το ιώδες, το πιο μικρό ορατό μήκος κύματος), και έτσι ο παρατηρητής βλέπει ουσιαστικά το συμπληρωματικό χρώμα του χρώματος που εξαλείφεται. Για παράδειγμα, όταν η διαφορά κυρίων τάσεων είναι αρκετή για την εξάλειψη του πράσινου χρώματος, εμφανίζεται το συμπληρωματικό του χρώμα που είναι το κόκκινο. Αυτά τα συμπληρωματικά χρώματα είναι ακριβώς που φτιάχνουν την εικόνα από τις ισοχρωματικές γραμμές που παίρνουμε κατά την φωτοελαστική ανάλυση με λευκό φως.

Αυξανόμενης της διαφοράς των κυρίων τάσεων, είναι δυνατή η ταυτόχρονη εξάλειψη περισσότερων του ενός χρώματος και έτσι οι ισοχρωματικές γραμμές γίνονται χλωμές και ασαφείς. Έτσι ο καθορισμός τους γίνεται δύσκολος και αυτός είναι ο λόγος που δεν χρησιμοποιούνται μεγάλα φορτία σε αυτού του είδους την ανάλυση. Από την άλλη πλευρά, με τη χρήση μονοχρωματικού φωτός, οι γραμμές παραμένουν ξεκάθαρες, ακόμα και σε πολύ μεγάλες τάξεις εξάλειψης.

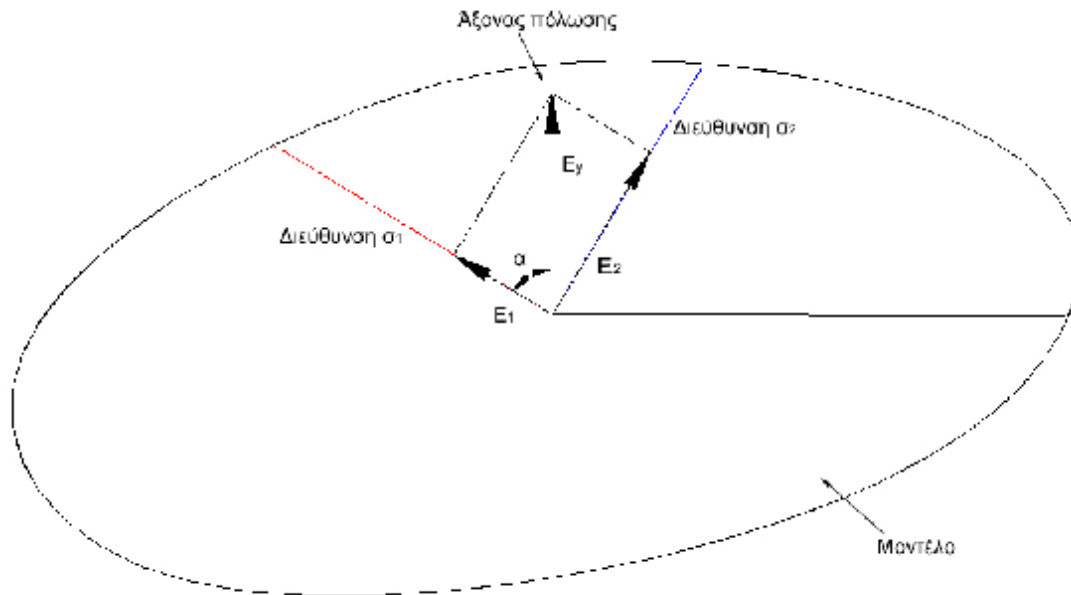
5.11 Κυκλικό πολωροσκόπιο (Circular polariscope)

Η εικόνα που παίρνουμε από το κυκλικό πολωροσκόπιο διαφέρει από αυτή που μας δίνει το επίπεδο, καθώς στο κυκλικό δεν έχουμε ισοκλινείς γραμμές, ενώ οι ισοχρωματικές δεν μεταβάλλονται, σε σχέση με αυτό που μας δίνει το επίπεδο πολωροσκόπιο

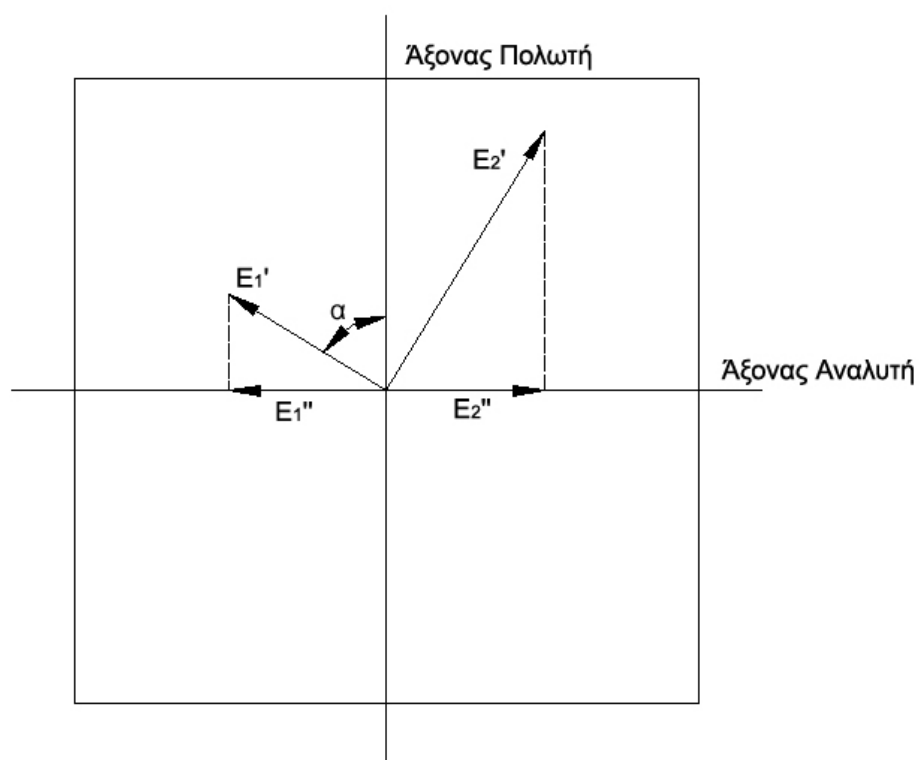
Όπως φαίνεται και από το όνομα, το κυκλικό πολυροσκόπιο χρησιμοποιεί κυκλικά πολωμένο φως, γι' αυτό και αποτελείται από τέσσερα οπτικά στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο είναι ο πολωτής ο οποίος μετατρέπει το φως σε πολωμένο. Το δεύτερο στοιχείο είναι ένα quarter wave plate που τοποθετείται σε γωνία 45° με τον άξονα πόλωσης. Αυτό το quarter wave plate μετατρέπει το επίπεδο πολωμένο φως σε κυκλικό πολωμένο φως. Στη συνέχεια έχουμε το μοντέλο και μετά τοποθετείται το δεύτερο quarter wave plate που έχει τον γρήγορο άξονα του σε παραλληλία με τον αργό άξονα του πρώτου. Ο σκοπός αυτού του δεύτερου στοιχείου είναι να μετατρέψει το κυκλικό πολωμένο φως σε επίπεδο πολωμένο φως το οποίο θα δονείται στο κάθετο επίπεδο. Αυτή η σειρά τοποθέτησης αποτελεί την πρότυπη διάταξη για ένα κυκλικό πολυροσκόπιο, το οποίο παράγει ένα σκοτεινό πεδίο. Αν οι γρήγοροι άξονες των δύο wave plates είναι παράλληλοι έχουμε την παραγωγή φωτεινού πεδίου.



Σχήμα 5.5 Πλήρης διάταξη απλού κυκλικού πολυροσκοπίου



Σχήμα 5.6 Η ανάλυση του διανύσματος του φωτός καθώς αυτό εισέρχεται στο υπό φόρτιση μοντέλο σε ένα επίπεδο πολυροσκόπιο



Σχήμα 5.7 Οι συνιστώσες των διανυσμάτων φωτός που περνάνε μέσα από τον αναλυτή σε ένα επίπεδο πολυροσκόπιο

5.12 Χρήση φακών στο πολαροσκόπιο

Ο τύπος πολαροσκοπίου που περιγράφηκε είναι ο απλούστερος δυνατός από πλευράς κατασκευής, και επίσης ο οικονομικότερος. Αρκούν μια πηγή λευκού φωτός, ένα μέσω το οποίο θα προκαλεί διασκορπισμό του φωτός (στη περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε ένα λεπτό φύλο χαρτί), τα στοιχεία στη σειρά που περιγράψαμε (πολωτής, αναλυτής, quarter wave plate) και βέβαια το μοντέλο υπό φόρτιση. Ο τύπος αυτός ονομάζεται και διαχεομένου φωτός, σε αντίθεση με το πολαροσκόπιο με φακούς.

Σε αυτή τη διάταξη μπορούν να προστεθούν και φακοί οι οποίοι χρησιμεύουν στη μεγέθυνση του εύρους της υπό μελέτη περιοχής. Όμως, με την ανάπτυξη μεγαλύτερων μεγεθών των επιφανειών των εξαρτημάτων ενός πολαροσκοπίου, καθώς και με την χρήση ψηφιακής τεχνολογίας, κάτι τέτοιο τείνει να γίνει όλο και λιγότερο αναγκαίο. Στα θετικά της χρήσης φακών, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι λόγω της χρήσης παράλληλης ακτίνας φωτός, τα όρια του μοντέλου είναι πολύ πιο καλά καθορισμένα απ'ότι με ένα πολαροσκόπιο διαχεομένου φωτός.

Από την άλλη, το πολαροσκόπιο διαχεομένου φωτός είναι πιο κατάλληλο για άμεση θεώρηση του μοντέλου, καθώς είναι δυνατόν να δούμε απευθείας τις ισοχρωματικές γραμμές κοιτώντας τον αναλυτή. Με τη χρήση φακών, δεν είναι δυνατή η απευθείας θεώρηση των ισοχρωματικών, καθώς θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί οθόνη από γυαλί και σκοτεινός θάλαμος, κάνοντας τη διαδικασία πιο χρονοβόρα σε σχέση με αυτή του διαχεομένου φωτός.

5.13 Ισοκλινείς γραμμές (*Isoclinic fringes*)

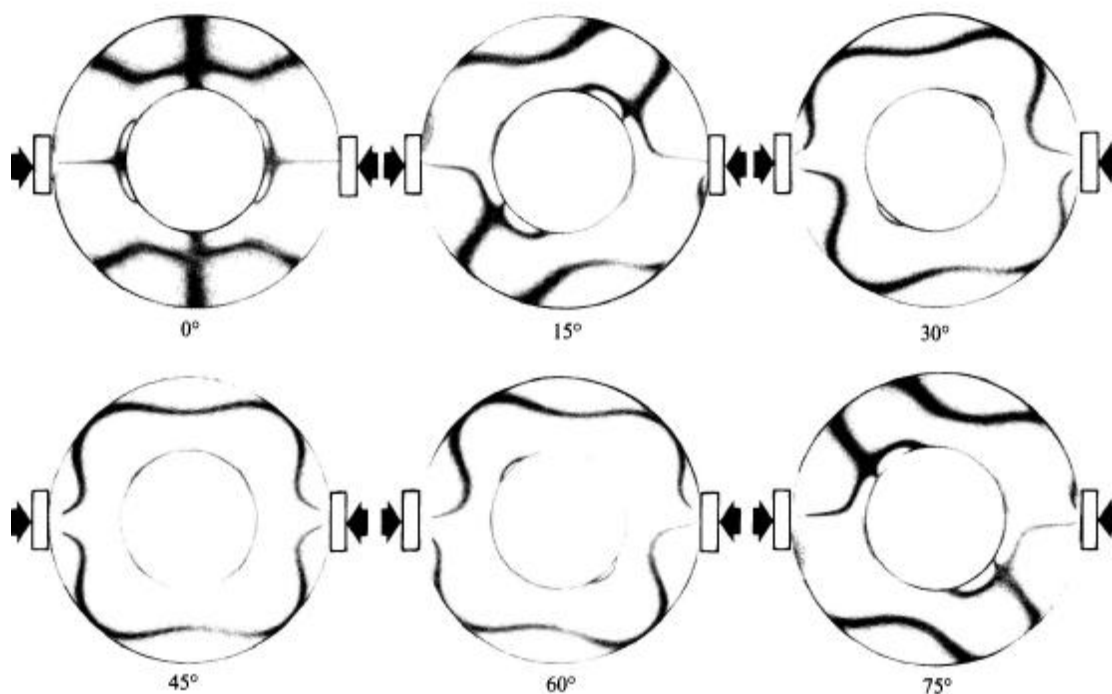
Σύνολο σημείων των οποίων οι κύριοι άξονες διάθλασης έχουν την ίδια κλίση. Η μορφή τους αλλάζει όταν μεταβάλλεται η γωνία μεταξύ του analyzer και του polarizer. Η μορφή που παίρνουν οι ισοκλινείς για κάθε μοντέλο σε ένα επίπεδο πολυροσκόπιο, χρησιμοποιούνται για να μας δώσουν πληροφορίες για την κατεύθυνση των κυρίων τάσεων σε κάθε σημείο του μοντέλου. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Στο πρώτο παίρνουμε φωτογραφίες των ισοκλινών για ένα σύνολο από διαφορετικές γωνίες μεταξύ πολωτή και αναλυτή, και συνθέτοντας αυτές μορφοποιούμε τελικά ένα χάρτη των ισοκλινών για όλο το αντικείμενο. Ο δεύτερος είναι να επιλέξουμε ένα σημείο του ενδιαφέροντος μας και να αλλάζουμε γωνία μεταξύ αναλυτή και πολωτή μέχρι μια ισοκλινείς να εμφανιστεί πάνω ακριβώς στο σημείο που μας ενδιαφέρει.

Στη τεχνική υπάρχουν τα εξής σημεία που θα πρέπει να προσεχτούν:

α) Οι ισοκλινείς για κάθε γωνία πρέπει να περνάνε από τα ισοτροπικά σημεία του μοντέλου, καθώς σε αυτά τα σημεία έχουμε $\sigma_1 = \sigma_2$ και όλες οι διευθύνσεις είναι κύριες διευθύνσεις.

β) Οι ισοκλινείς για κάθε γωνία θα πρέπει να περνάνε από τα σημεία όπου ασκείται φορτίο στο μοντέλο

γ) Αν υπάρχει άξονας συμμετρίας στο μοντέλο για μια συγκεκριμένη γωνία, τότε αυτός θα πρέπει να ισχύει και τη μορφή των ισοκλινών, θα πρέπει δηλαδή και αυτές να είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα.



Σχήμα 5.8 Ισοκλινείς γραμμές από δακτύλιο που δέχεται θλιπτικό φορτίο, όπως αυτές διαμορφώνονται για 6 διαφορετικές γωνίες μεταξύ αναλυτή – πολωτή. [48 σελ. 9]

Από τις ισοκλινείς που λαμβάνουμε από τη παρατήρηση και το συνδυασμό τους μπορεί να εξαχθεί ένας χάρτης των ισοστατικών γραμμών του μοντέλου, κάτι το οποίο γίνεται με την εξής τεχνική: Ξεκινώντας από την ισοκλινή για 0° , χαράζουμε ευθείες (στο σχήμα με το νο. 1) κατά μήκος της ισοκλινούς κάθετες στον άξονα πόλωσης σε αυθαίρετα σημεία τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους. Διχοτομούμε το ευθύγραμμο τμήμα των των ευθειών που ξεκινάει από την ισοκλινή των 0° μέχρι την ισοκλινή των 10° , και κατασκευάζουμε νέα ομάδα ευθειών (νο 2) οι οποίες έχουν κλίση 10° με τον άξονα πόλωσης. Συνεχίζοντας επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για την ισοκλινή των 20° και αυτή την φορά η νέα ομάδα ευθειών θα

έχει κλίση 20° . Κατόπιν τούτου κατασκευάζονται οι ισοστατικές τροχιές οι οποίες είναι επαπτόμενες στις ομάδες γραμμών 1, 2, 3 κλπ.

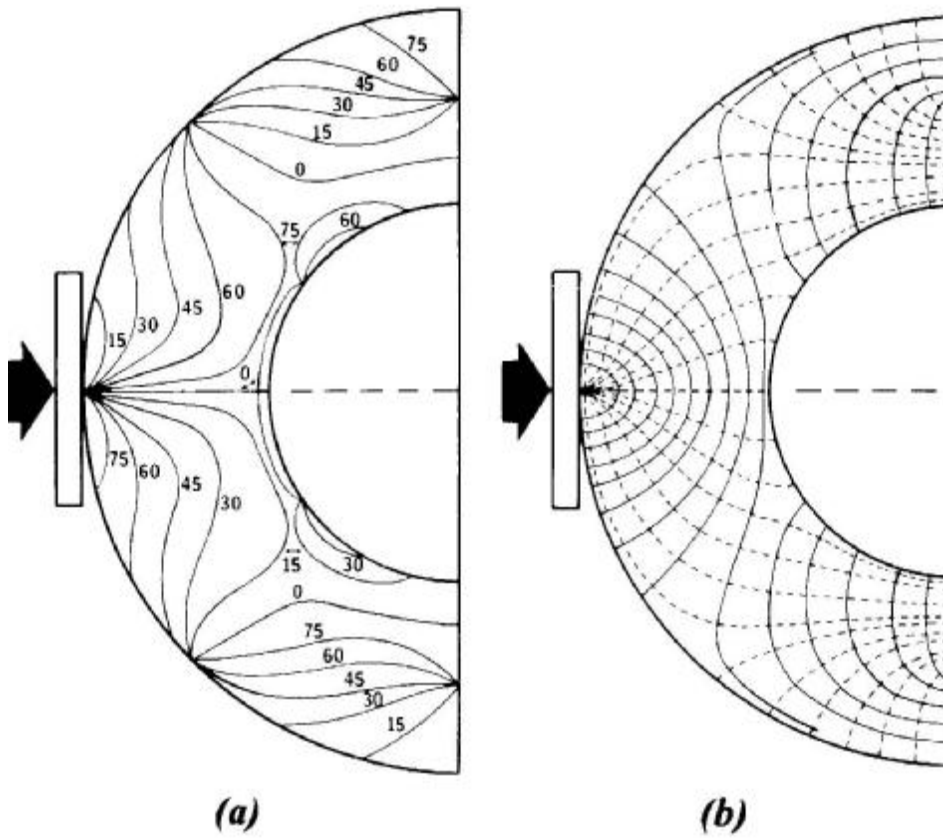
Βλέποντας το δακτύλιο στο Σχ. 5.9 μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τα ισοτροπικά σημεία του μοντέλου, καθώς και ότι ισοκλινείς για κάθε γωνία περνούν από τα σημεία όπου εξασκείται φορτίο.

5.14 Ισοχρωματικές γραμμές (*Isochromatic fringes*)

Σύνολο σημείων που έχουν κοινή μέγιστη τάση διατμήσεως (ή αλλιώς, ίδια διαφορά μεταξύ κύριων τάσεων). Αν η τάξη γραμμής (*fringe order*) για κάθε σημείο στο μοντέλο έχει καθοριστεί, τότε είναι δυνατό να υπολογίσουμε το $\sigma_1 - \sigma_2$ από τον τύπο:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad \text{Εξ. 5.41}$$

Ο οποίος προκύπτει από τον 5.40, αν θεωρήσουμε το μήκος κύματος σταθερό.



Σχήμα 5.9 α) Διαμόρφωση του χάρτη των ισοκλινών για κάθε μια από τις 6 γωνίες από 0 έως 90 μοίρες με διαφορά 15 μοιρών. β) Χάρτης των ισοστατικών γραμμών όπως αυτός διαμορφώνεται από τις ισοκλινείς [48 σελ. 9]

Στα εξωτερικά σημεία του μοντέλου, όπου η μια από τις δύο κύριες τάσεις είναι μηδενική ο τύπος.. γίνεται:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h} \quad \text{Εξ. 5.42}$$

με το πρόσημο να καθορίζεται συνήθως με βάση τη παρατήρηση, ειδικά σε περιοχές όπου οι εξωτερικές τάσεις είναι οι μέγιστες.

5.15 Φωτοελαστική σταθερά

Στις περισσότερες αναλύσεις με τη μέθοδο της φωτοελαστικότητας, επιζητείται η κατανομή της τάσεως στο φορτίο σε συνάρτηση με το ασκούμενο φορτίο. Αν και οι τιμές του f_{σ} που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για κάθε υλικό είναι αρκετά ακριβείς, καλό θα είναι να προσδιορίζεται κάθε φορά πριν την ανάλυση η σταθερά του υλικού, καθώς αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με τον προμηθευτή, την ηλικία, την παρτίδα παραγωγής και την θερμοκρασία.

Για οποιαδήποτε τεχνική βαθμονόμησης θα πρέπει να επιλεγθεί ένα σώμα του οποίου η κατανομή τάσεων είναι θεωρητικά ακριβώς γνωστή, όταν αυτό υπόκειται σε συγκεκριμένη φόρτιση. Το μοντέλο βαθμονόμησης φορτίζεται βαθμηδόν, και για κάθε επίπεδο φόρτισης καταγράφονται τα αντίστοιχα fringe orders. Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να καθορισθεί το f_{σ} .

Ξεκινώντας με τον πιο απλό τρόπο, βρίσκουμε την f_{σ} με τη βοήθεια εφελκυσμού ράβδου ορθογωνικής διατομής πάχους h και μήκους w . Η ράβδος πρέπει να έχει το σχήμα δοκιμίων που χρησιμοποιούνται σε πειράματα εφελκυσμού (dog bones). Η τάση που ασκείται στο σημείο με τη μικρότερη διατομή εμβαδού hw μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma_1 = \frac{F}{wh} \quad \text{και} \quad \sigma_2 = 0 \quad \text{Εξ. 5.43}$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 5.42 στην εξίσωση 5.43 Έχουμε

$$\frac{Nf_{\sigma}}{h} = \frac{F}{wh} \quad \text{ή} \quad f_{\sigma} = \frac{F}{wN} \quad \text{Εξ. 5.44}$$

Χρώμα	Κατά προσέγγιση σχετική υστέρηση (nm)	Fringe order N
Μαύρο	0	0
Γκριζό	160	0.28
Άσπρο	260	0.45
Κίτρινο	345	0.60
Πορτοκαλί	460	0.80
Θολό κόκκινο	520	0.90
Ιώδες (τόνος περάσματος)	575	1.00
Βαθύ κυανό	620	1.08
Κυανό-Πράσινο	700	1.22
Πράσινο-Κίτρινο	800	1.39
Πορτοκαλί	935	1.63
Ανοιχτό κόκκινο	1050	1.82
Ιώδες (τόνος περάσματος)	1150	2.00
Πράσινο	1350	2.35
Πράσινο-Κίτρινο	1440	2.50
Κόκκινο	1520	2.65
Κόκκινο/ Πράσινο (μετάβαση)	1730	3.00
Πράσινο	1800	3.10
Ροζ	2100	3.65
Ροζ/ Πράσινο (μετάβαση)	2300	5.00
Πράσινο	2400	5.15

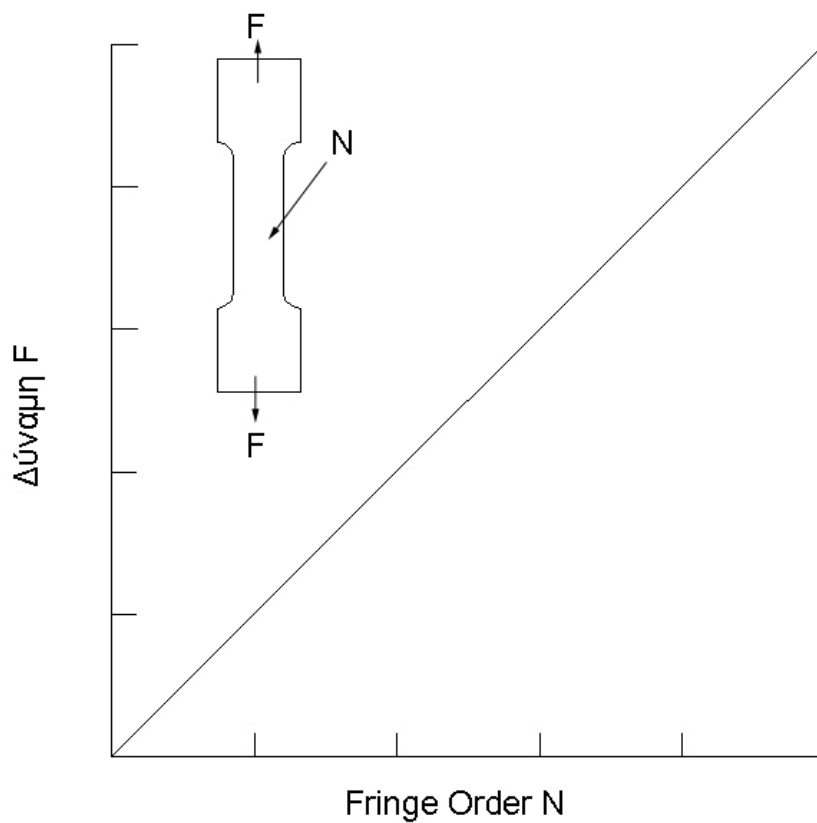
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά των ισοχρωματικών γραμμών (Isochromatic fringes)

Από την εξίσωση φαίνεται ότι η τιμή του που παίρνουμε από τη διαδικασία δεν έχει σχέση με το πάχος του δοκιμίου. Στην πράξη, συνδυάζοντας τιμές του F με τις αντίστοιχες τιμές N, εξάγεται ένα διάγραμμα με λόγο σταθερό λόγο μεταβολής f_{σ} . Έτσι συνδυάζοντας 3 έως 6 τιμές F και N μπορούμε να εξομαλύνουμε τα μικρά λάθη που ενδεχομένως να παρουσιαστούν κατά την λήψη των τιμών.

5.16 Καταλληλότητα υλικών για φωτοελαστική ανάλυση δύο διαστάσεων

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στην φωτοελαστική ανάλυση είναι το υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του φωτοελαστικού μοντέλου. Δυστυχώς δεν υπάρχει ένα ιδεώδες φωτοελαστικό υλικό. Μερικά από τα βασικά

χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένα φωτοελαστικό υλικό είναι τα εξής: Το υλικό θα πρέπει να είναι διαφανές, αφήνοντας το φως του πολαροσκοπίου να περάσει από μέσα του, θα πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητο στις τάσεις, έχοντας ένα χαμηλό συντελεστή φωτοελαστικότητας f_{σ} , και θα πρέπει να έχει γραμμική συμπεριφορά τόσο όσον αφορά την σχέση τάσης-ανηγμένης επιμήκυνσης και την σχέση τάσεων-



<

Σχήμα 5.10 Τυπική ευθεία βαθμονόμησης όπως αυτή εξάγεται από τον εφελκυσμό του δοκιμίου

fringe order. Επίσης το υλικό θα πρέπει να είναι ισότροπο από μηχανικής και οπτικής πλευράς, να μην παρουσιάζει μεγάλο ερπυσμό και να είναι ελεύθερο από παραμένουσες τάσεις. Περιγράφοντας τη ρητίνη σαν φωτοελαστικό υλικό ξεκινάμε από τη παρατήρηση ότι είναι ένα διαφανές υλικό το οποίο είναι διαπερατό από το φως του πολαροσκοπίου και παρουσιάζει διαθλαστικές ιδιότητες. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι γραμμική ενώ η σχέση τάσεων-fringe order και η ιδιότητες που έχουν σχέση με το χρόνο, όπως ο ερπυσμός θα περιγραφούν στη συνέχεια με συγκεκριμένα πειράματα

5.17 Διαχωρισμός των κυρίων τάσεων

Στην ανάλυση που προηγήθηκε, φάνηκε ότι η διαφορά των κυρίων τάσεων μπορεί να ευρεθεί από πειράματα φωτοελαστικότητας. Επίσης μπορεί να βρεθεί η μέγιστη διάτμηση για κάθε σημείο του δοκιμίου, αν έχουμε κύριες τάσεις με αντίθετα πρόσημα. Επίσης στα ελεύθερα όρια του δοκιμίου, η κύρια τάση που είναι κάθετη στο όριο είναι μηδέν και έτσι μπορούμε να έχουμε απευθείας τη τιμή της άλλης κύριας τάσης. Σε σημεία που περικλείονται από τα ελεύθερα όρια του μοντέλου, οι κύριες τάσεις δε μπορούν να ευρεθούν σε μεμονωμένη μορφή απευθείας από τις ισοχρωματικές γραμμές, χωρίς να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά στοιχεία, και χωρίς τη χρήση αναλυτικών μεθόδων. Θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά κάποιες μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

5.18 Μέθοδος διαφοράς διατμήσεων

Η εξισώσεις ισορροπίας για προβλήματα επίπεδης έντασης είναι:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad \text{Εξ. 5.45}$$

όπου σ_x , σ_y , τ_{xy} είναι κάθετες και η διατμητική συνιστώσες της τάσης σε ένα τυχαίο σημείο του σώματος για την επίπεδη καταπόνηση. Λύσεις των εξισώσεων ισορροπίας μπορούν να εξαχθούν από τον τύπο:

$$\sigma_x = (\sigma_x)_o - \int \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx \quad \sigma_y = (\sigma_y)_o - \int \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dy \quad \text{Εξ. 5.46}$$

που μπορούν να προσεγγιστούν επαρκώς από την έκφραση πεπερασμένων διαφορών:

$$\sigma_x = (\sigma_x)_o - \Sigma \frac{\Delta \tau_{yx}}{\Delta y} \Delta x$$
$$\sigma_y = (\sigma_y)_o - \Sigma \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y \quad \text{Εξ. 5.47}$$

όπου $(\sigma_x)_o$ και $(\sigma_y)_o$ είναι οι γνωστές τάσεις σε συγκεκριμένα σημεία, τα οποία έχουν επιλεγθεί ως αρχικά σημεία για την διαδικασία της ολοκλήρωσης και που συνήθως είναι τα σημεία των ελεύθερων ορίων του σώματος, όπου έχουμε απευθείας υπολογισμό της μη μηδενικής κύριας τάσης από τις ισοχρωματικές γραμμές

5.19 Μέθοδοι βασισμένες στις εξισώσεις συμβατότητας

Οι εξισώσεις συμβατότητας ή συνέχειας για την επίπεδη ένταση με σταθερές ή μηδενικές δυνάμεις σώματος μπορούν να εκφραστούν με όρους του πρώτου αναλλοίωτου των τάσεων ως:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = 0 \quad \text{Εξ. 5.48}$$

Εξισώσεις τέτοιας μορφής ονομάζονται εξισώσεις Laplace, και κάθε συνάρτηση που ικανοποιεί αυτή την εξίσωση ονομάζεται αρμονική συνάρτηση. Στην φωτοελαστικότητα, το ενδιαφέρον για την εξίσωση Laplace προέρχεται από την δυνατότητα που υπάρχει για ακριβή καθορισμό της τιμής της, αν οι τιμές της είναι γνωστές για τα όρια του σώματος. Όπως ξέρουμε οι ισοχρωματικές παρέχουν γνώση και για τις τάσεις στα εξωτερικά όρια του σώματος, και για τη διαφορά των κύριων τάσεων σε όλα τα εσωτερικά σημεία του σώματος. Η γνώση το αθροίσματος των κυρίων τάσεων καθώς και τις διαφορές τους, μπορεί να μας δώσει τις μεμονωμένες τιμές τους.

5.20 Πειράματα φωτοελαστικότητας σε δοκίμια στερεολιθογραφίας - Βαθμονόμηση της ρητίνης με εφελκυσμό

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν πειράματα φωτοελαστικότητας που έγιναν με δοκίμια στερεολιθογραφίας καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την εργασία. Από παρόμοιες εργασίες που έχουν γίνει φαίνεται ότι η χρήση

δοκιμίων στερεολιθογραφίας σε φωτοελαστικά πειράματα συναντά κάποια προβλήματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι: α) το φαινόμενο του edge effect, της αλλοίωσης δηλαδή των fringe orders στις άκρες του δοκιμίου λόγω του μεγαλύτερου βαθμού πολυμερισμού και β) το swelling, το φούσκωμα δηλαδή των εξωτερικών layers των δοκιμίων γ) ο υψηλός βαθμός ερπυσμού που παρατηρείται στα δοκίμια στερεολιθογραφίας. Παρατηρώντας τα δοκίμια τα οποία κατασκευάστηκαν δεν παρουσιάστηκε πρόβλημα αποκόλλησης των στρωμάτων και συνεπώς κανένα πρόβλημα swelling.

Απαραίτητο πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία είναι η μελέτη της φωτοελαστικής σταθεράς του υλικού που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή των πρωτοτύπων.

Για τα πειράματα φωτοελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε η εποξική ρητίνη Somos 7110. Από προηγούμενες ερευνητικές εργασίες που έχουν γίνει, έχει φανεί ότι η εποξικές ρητίνες είναι οι πλέον κατάλληλες για φωτοελαστικά πειράματα, λόγω τις μικρότερης συρρίκνωσης που παρουσιάζουν τα δοκίμια. Για τον προσδιορισμό της φωτοελαστικής σταθεράς f_{σ} της ρητίνης χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο διατομής $13 \times 3.7 \text{ mm} = 48,1 \text{ mm}^2$ το οποίο υποβλήθηκε σε εφελκυσμό. Όπως έχουμε δει, ο τύπος συσχέτισης των ισοχρωματικών γραμμών (isochromatics) με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο δοκίμιο είναι:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_{\sigma}}{h}$$

όπου σ_1, σ_2 είναι οι κύριες τάσεις, N είναι η τάξη της ισοχρωματικής γραμμής (fringe order), f_{σ} είναι η φωτοελαστική σταθερά και h είναι το πάχος του δοκιμίου. Από τον τύπο προκύπτει ότι:

$$f_{\sigma} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)h}{N}$$

Στη περίπτωση του εφελκυσμού το σ_2 είναι ίσο με το μηδέν, και έτσι έχουμε:

$$f_{\sigma} = \frac{\sigma_1 h}{N}$$

Ακολουθούν οι φωτογραφίες του δοκιμίου κατά τον εφελκυσμό.



Το δοκίμιο φορτίζεται με δύναμη 250 Nt που σημαίνει ότι η τάση που αναπτύσσεται είναι $250 \text{ Nt}/48.1 \text{ mm}^2 = 5197505 \text{ Nt/m}^2$. Παρατηρείται η εμφάνιση κόκκινου χρώματος, που αντιστοιχεί σε fringe order 0.9. Οπότε έχουμε:

$$f_{\sigma} = \frac{\sigma_1 h}{N} \leftrightarrow f_{\sigma} = 5197505 \text{ Nt/m}^2 * 0,0037\text{m}/0.9 \leftrightarrow f_{\sigma} = \mathbf{21367 \text{ Nt/m}}$$



Το δοκίμιο φορτίζεται με δύναμη 350 Nt που σημαίνει ότι η τάση που αναπτύσσεται είναι $350 \text{ Nt}/48.1 \text{ mm}^2 = 7276507 \text{ Nt/m}^2$. Παρατηρείται η εμφάνιση γαλαζο-πράσινου χρώματος, που αντιστοιχεί σε fringe order 1,22. Οπότε έχουμε:

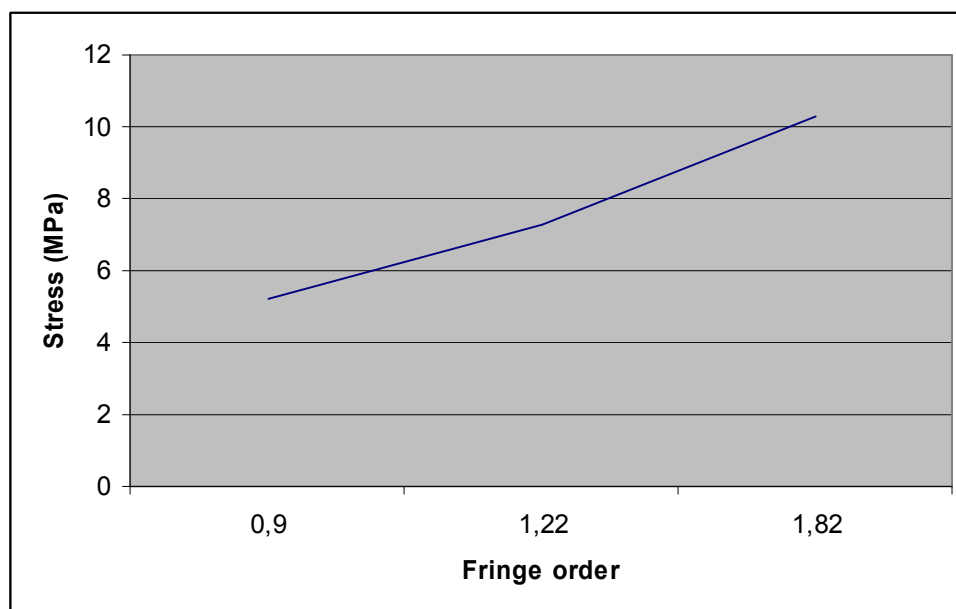
$$f_{\sigma} = \frac{\sigma_1 h}{N} \leftrightarrow f_{\sigma} = 7276507 \text{ Nt/m}^2 * 0,0037\text{m}/1,22 \leftrightarrow f_{\sigma} = \mathbf{22068 \text{ Nt/m}}$$



Το δοκίμιο φορτίζεται με δύναμη 495 Nt που σημαίνει ότι η τάση που αναπτύσσεται είναι $495 \text{ Nt}/48.1 \text{ mm}^2 = 10291060 \text{ Nt/m}^2$. Παρατηρείται η εμφάνιση ανοιχτού κόκκινου χρώματος, που αντιστοιχεί σε fringe order 1,82. Οπότε έχουμε:

$$f_{\sigma} = \frac{\sigma_1 h}{N} \leftrightarrow f_{\sigma} = 10291060 \text{ Nt/m}^2 * 0,0037\text{m}/1,22 \leftrightarrow f_{\sigma} = \mathbf{20921 \text{ Nt/m}}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η φωτοελαστική σταθερά της ρητίνης Somos 7110 είναι περίπου 21.5 KNt/m (M.O. είναι 21452 Nt/m με τυπική απόκλιση 578 Nt/m).

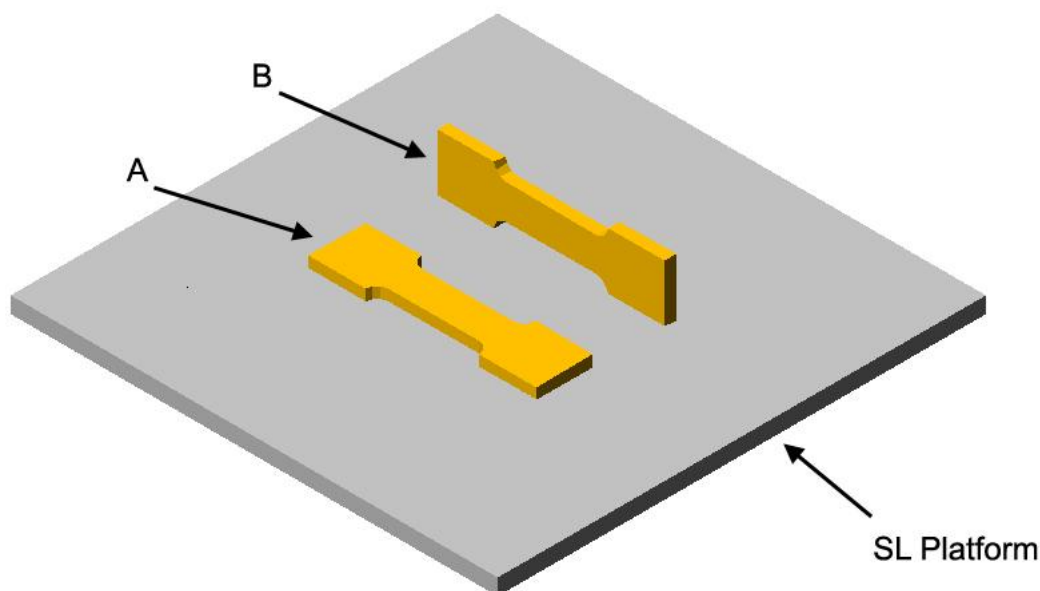


Σχήμα 5.11 Ευθεία βαθμονόμησης για δοκίμιο ρητίνης

5.21 Επιπτώσεις του διαφορετικού προσανατολισμού του πρωτότυπου

Το πρωτότυπο μπορεί να τεμαχιστεί από το κατάλληλο πρόγραμμα και να τοποθετηθεί με διαφορετικούς προσανατολισμούς σε σχέση με τη πλατφόρμα στερεολιθογραφίας. Για να διαπιστωθεί αν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση της φωτοελαστικής σταθεράς λόγω αλλαγής του προσανατολισμού, δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια διαστάσεων 160x20x5mm το πρώτο με τη πλευρά των 20mm να είναι παράλληλη στη πλατφόρμα, και το δεύτερο με τη πλευρά των 5mm να είναι παράλληλη στη πλατφόρμα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επίπεδη κάμψη, με φορτίο

95 Nt, και από τις φωτογραφίες που πάρθηκαν κατά το πείραμα δε διαπιστώθηκε διαφοροποίηση των ισοχρωματικών γραμμών (Φωτ. 5.1).



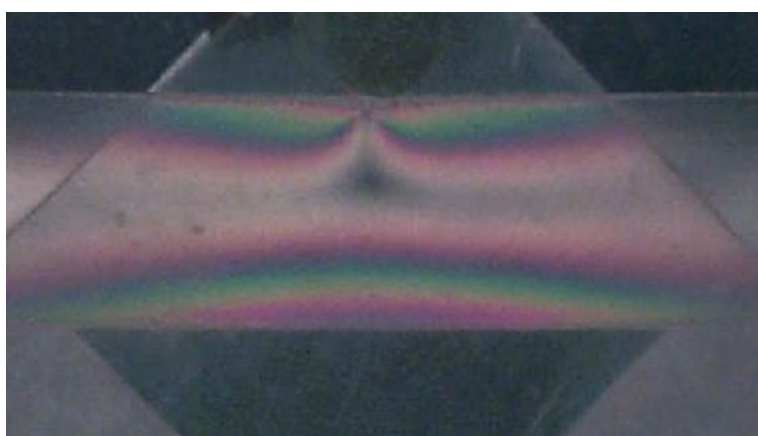
Σχήμα 5.12 Τα δύο δοκίμια όπως κατασκευάζονται σε σχέση με τη πλατφόρμα

5.22 Ερπυσμός: Πειραματική διαδικασία

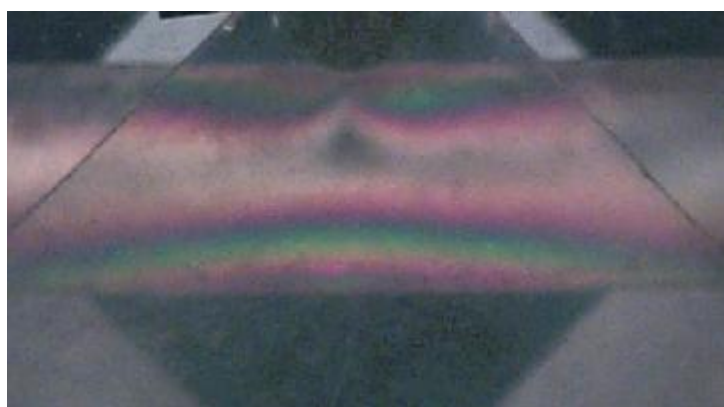
Για να διαπιστώσουμε εάν ο ερπυσμός που παρουσιάζεται έντονος στα δοκίμια της ρητίνης, επηρεάζει τη φωτοελαστική σταθερά, κατασκευάστηκαν δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν και αυτά σε επίπεδη κάμψη. Το νο 1 υποβλήθηκε σε επίπεδη κάμψη με φορτίο 100 Nt αμέσως μετά την κατασκευή του. Σε αυτό το χρονικό σημείο, το φαινόμενο του ερπυσμού είναι έντονο, καθώς η δύναμη που ασκήθηκε από τη μηχανή έπεφτε γρήγορα, καθώς το δοκίμιο ήταν ακόμα εν μέρει πολυμερισμένο και γι' αυτό και αρκετά μαλακό. Το πείραμα επαναλήφθηκε μια εβδομάδα μετά, όπου το δοκίμιο είχε σκληρύνει εμφανέστατα, καθώς η δύναμη που ασκείτο μειωνόταν με πιο αργούς ρυθμούς. Πάντως όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες, για την ίδια δύναμη και στις δύο περιπτώσεις έχουμε σχεδόν παρόμοια fringe patterns και με δεδομένη την αδυναμία για μεγάλη ακρίβεια μέτρησης στη περίπτωση της πρώτης

φάσης του πειράματος όπου το δοκίμιο είναι πολύ «φρέσκο», μπορούμε να πούμε ότι δεν έχουμε αλλαγή στη φωτοελαστική σταθερά f_{σ} . Επίσης σε περίπτωση που αφήσουμε το φορτίο σε φρέσκο δοκίμιο για ένα διάστημα 7 ημερών, οι τάσεις και το fringe pattern παραμένουν και μετά την απόσυρση του φορτίου.

Ο πολυμερισμός με τη χρήση της μηχανής UV σκουραίνει τα δοκίμια και μειώνει την διαπερατότητα τους από το φως. Έτσι, καλό είναι τα δοκίμια να πολυμερίζονται με φυσικότερο τρόπο, με τη σταδιακή τους έκθεση στο φως της ημέρας.

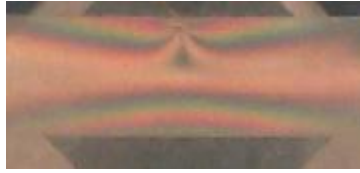


(α)



(β)

Φωτογραφία 5.1 Δοκίμια από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη. Το (α) είναι φτιαγμένο με τη μεγάλη επιφάνεια να είναι παράλληλη στη πλατφόρμα της μηχανής στερεολιθογραφίας ενώ το (β) η μεγάλη πλευρά από τις πλάγιες είναι παράλληλη με τη πλατφόρμα της στερεολιθογραφίας



Το No 1 με φορτίο 100 Nt την ημέρα κατασκευής του



Το No 1 με 100 Nt 7 ημέρες μετά



Το No 2 με φορτίο 100 Nt αμέσως μετά την κατασκευή του



Το No 2 μετά από 7 ημέρες συνεχούς φόρτισης με 50 Nt, εμφανίζει ισοχρωματικές
χωρίς την παρουσία φορτίου

Φωτογραφία 5.2 Δοκίμια από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη

5.23 FEA Simulation

Η μέθοδος FEA Simulation (Finite Elements Analysis) είναι μια πρακτική πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς εξαρτημάτων και μηχανισμών, με τη χρήση Η/Υ. Κατά τη πρακτική αυτή, το σχέδιο CAD, διαχειριζόμενο από το κατάλληλο πρόγραμμα FEA, διαιρείται σε πολλά μικρά κομμάτια, τα στοιχεία (Elements), τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους (Nodes). Η τρόπος με τον οποίο τεμαχίζεται η γεωμετρία του αντικειμένου σε στοιχεία ονομάζεται κάναβος (mesh). Αφού το σχήμα τεμαχιστεί, ο χρήστης τοποθετεί εξωτερικούς περιορισμούς (constraints) όπως δυνάμεις, τάσεις και βαθμούς ελευθερίας. Μπορεί επίσης να ορίσει και συνθήκες συμμετρίας, αν υπάρχουν και το επιθυμεί. Τρέχοντας το πρόγραμμα, επίλυει στους κόμβους διαφορικές εξισώσεις και με κάθε επίλυση συγκλίνει σε μια βέλτιστη λύση. Τα αποτελέσματα μπορεί να τα πάρει ο χρήστης σε μορφή χρωματικών περιοχών στις οποίες η τιμή της μεταβλητής που ερευνά, κυμαίνεται μεταξύ δύο συγκεκριμένων τιμών.

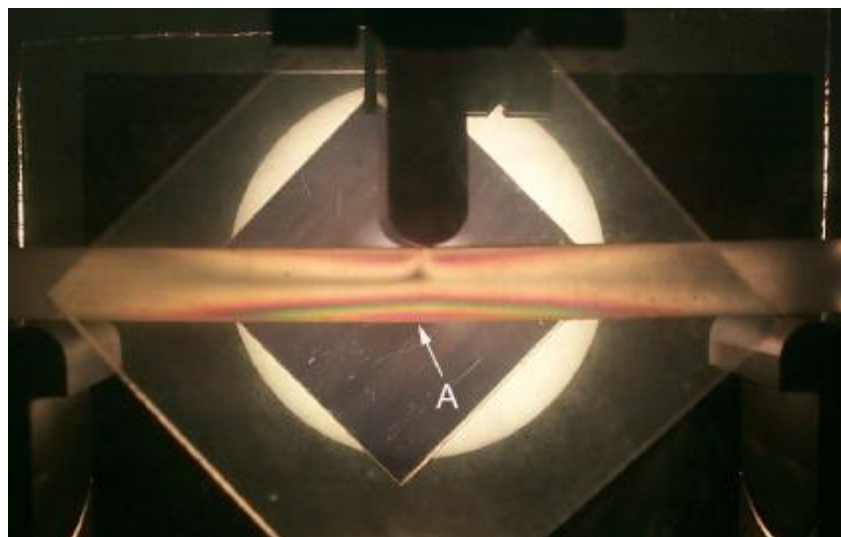
5.24 Δοκιμές επαλήθευσης της φωτοελαστικής σταθεράς

Για την επαλήθευση σε πρώτη φάση της φωτοελαστικής σταθεράς που εξήχθη από τα παραπάνω πειράματα, κατασκευάστηκε από ρητίνη δοκός μήκους 120mm με ορθογωνική διατομή 8.6x10mm, η οποία υποβλήθηκε σε επίπεδη κάμψη, με φορτίο ύψους 30 Nt, ενώ κάθε κύλιση απείχε από την άκρη του δοκιμίου 10 mm. Η τάση που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο του σώματος προκύπτει από το τύπο:

$$\sigma = \frac{M_z y}{J_z}$$

Από τον τύπο προκύπτει ότι στο σημείο A του δοκιμίου, όπως αυτό φαίνεται στην Φωτογραφία 5.3 η τάση ανέρχεται σε 5.625 MPa. Από τον τύπο $\sigma_1 - \sigma_2 = Nf_\sigma/h$ και εφόσον $\sigma_2 = 0$, έχουμε $\sigma_1 = Nf_\sigma/h$. Στο σημείο A και για φορτίο 30 Nt έχουμε fringe order με αριθμό 2, οπότε αντικαθιστώντας στο προηγούμενο τύπο έχουμε:

$$\sigma_1 = \frac{Nf_\sigma}{h} \rightarrow 10.7 \text{ MPa} = (2 \cdot 21500 \text{ Nt/m}) / 0,0086\text{m} \rightarrow \sigma_1 = 5375000 \text{ Nt/m}$$



Φωτογραφία 5.3 Δοκίμιο από ρητίνη σε επίπεδη κάμψη. Στο σημείο A είναι εύκολο από τη θεωρία να υπολογιστεί η μη μηδενική κύρια τάση

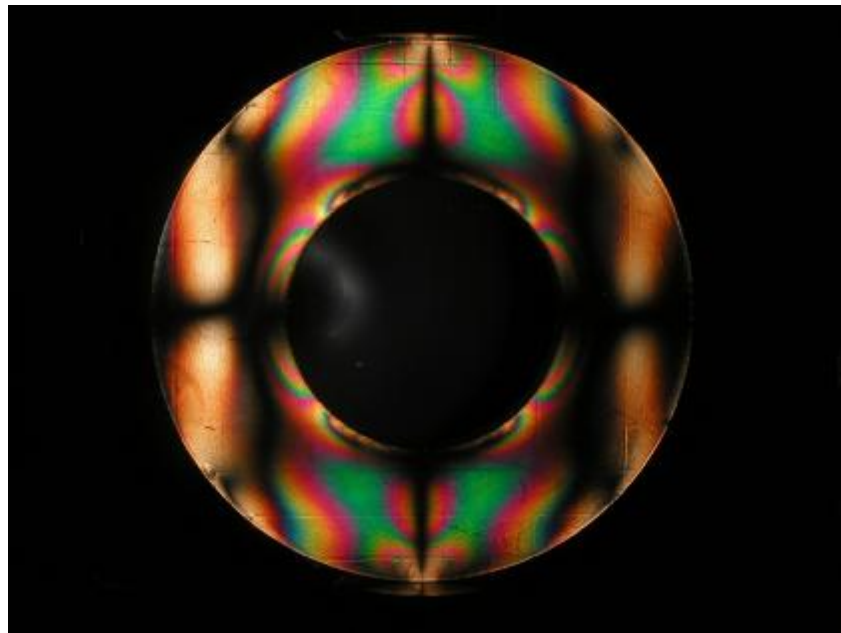
ή $\sigma_1 = 5.375 \text{ MPa}$ έχουμε δηλαδή μια απόκλιση μεταξύ υπολογισμού και πρόβλεψης της τάξης του 0.5 %.

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε δακτύλιος πάχους 5mm, ο οποίος τοποθετήθηκε με τη σειρά του σε επίπεδο πολωροσκόπιο καταρχήν για να γίνει ρύθμιση της γωνίας μεταξύ των αξόνων πόλωσης και ανάλυσης. Αν η μορφή που παίρνουν οι ισοκλινείς είναι συμμετρική γύρω από τον κάθετο και τον οριζόντιο άξονα, τότε οι άξονες πόλωσης και ανάλυσης σχηματίζουν ακριβώς γωνία 90°. Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε φορτίο, και αφού ρυθμίστηκε η γωνία των αξόνων, το πολωροσκόπιο μετατράπηκε σε κυκλικό.

Το μοντέλο υποβλήθηκε ξανά σε φορτίο 500 Nt και διαμορφώθηκε ένας χάρτης ισοχρωματικών, τον οποίο μπορούμε να δούμε στην Φωτογραφία 5.5.

Στην εικόνα βλέπουμε τις περιοχές που έχουμε fringe order 2.35 (Πράσινο) και 2.5 (Πράσινο-Κίτρινο). Εφαρμόζοντας τη σχέση 5.41 συμπεραίνουμε ότι στη πράσινη περιοχή έχουμε διαφορά κυρίων τάσεων 10.1 MPa και στη πρασινο-κίτρινη περιοχή έχουμε 10.75 MPa. Στη συνέχεια συγκρίναμε με τα αποτελέσματα που πήραμε από την ανάλυση με τη βοήθεια του υπολογιστή με τη μέθοδο Finite Elements Analysis (FEA).

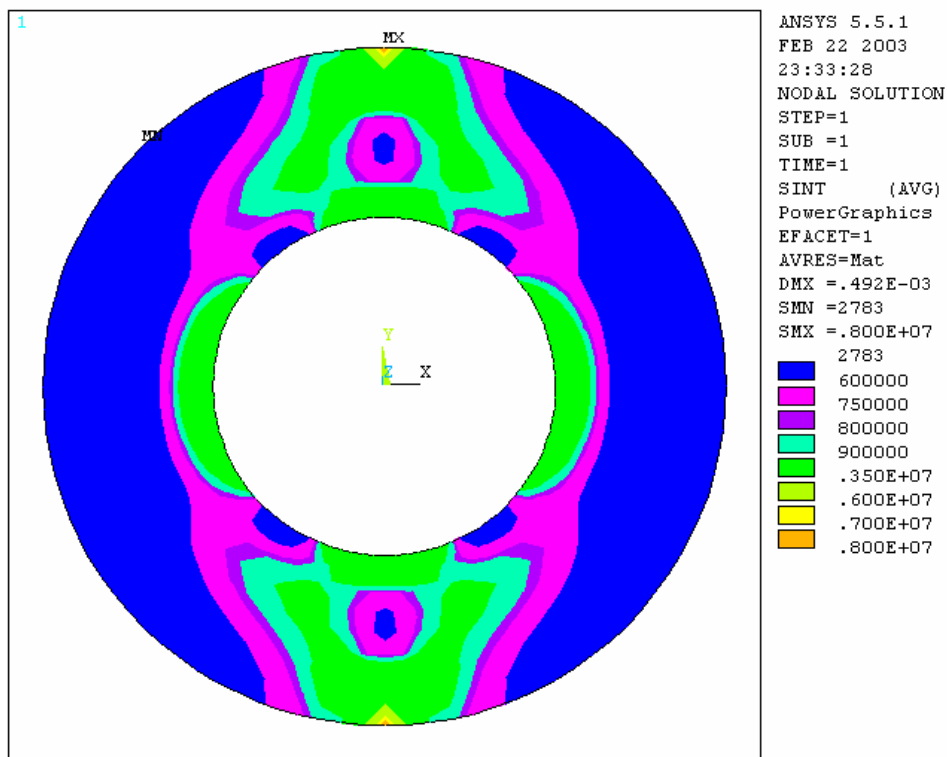
Στις αντίστοιχες περίπου περιοχές έχουμε 9 MPa και 13.5 MPa. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη των τάσεων των πειραματικών και αναλυτικών δεδομένων.



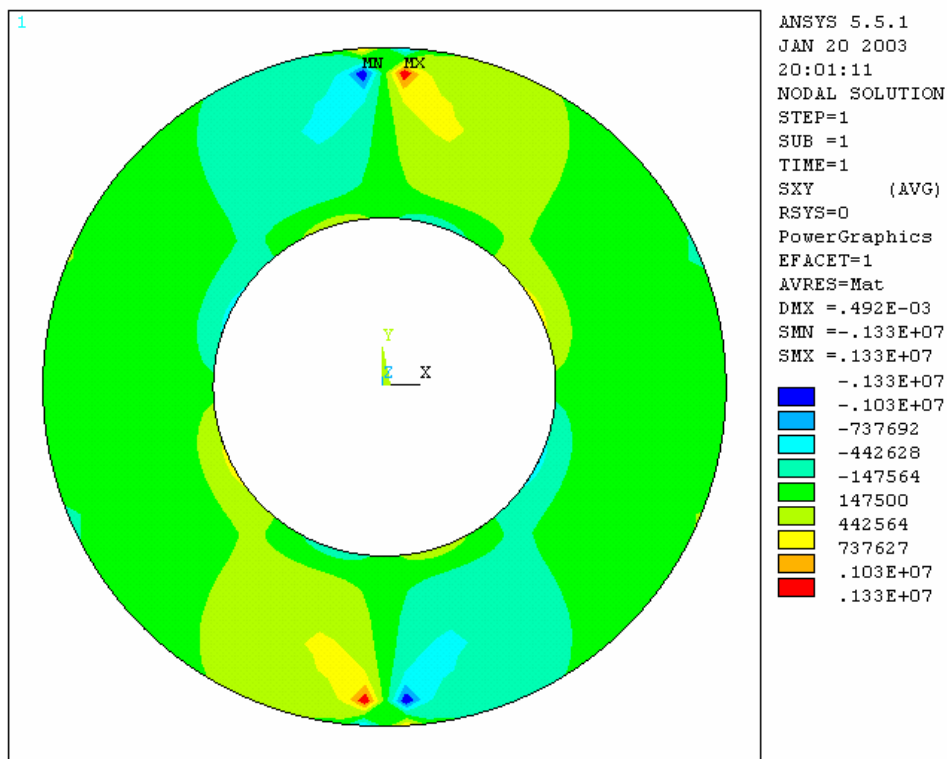
Φωτογραφία 5.4 Δακτύλιος υπό θλιπτικό φορτίο 500 Nt



Φωτογραφία 5.5 Δακτύλιος υπό θλιπτικό φορτίο 500 Nt σε κυκλικό πολωροσκόπιο



Σχήμα 5.13 Ανάλυση Intensity για το δακτύλιο. Οι περιοχές με το ίδιο χρώμα παρουσιάζουν ίδια διαφορά μεταξύ κυρίων τάσεων



Σχήμα 5.14 Ανάλυση Shear XY. Υπάρχει φανερή ομοιότητα με την αντίστοιχη εικόνα από το επίπεδο πολωροσκόπιο

Φωτοελαστικότητα			FEA	
Fringe order	2.35	2.5	Ανοιχτό πράσινο	Σκούρο πράσινο
Διαφορά κύριων τάσεων (Mpa)	10.1	10.75	8-9	9-13.5

Πίνακας 5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μεθόδου της φωτοελαστικότητας και των FEA για τον δακτύλιο. Η ανοιχτή πράσινη περιοχή των FEA αντιστοιχεί σε fringe order 2,35, ενώ η σκούρα πράσινη αντιστοιχεί σε fringe order 2,5.

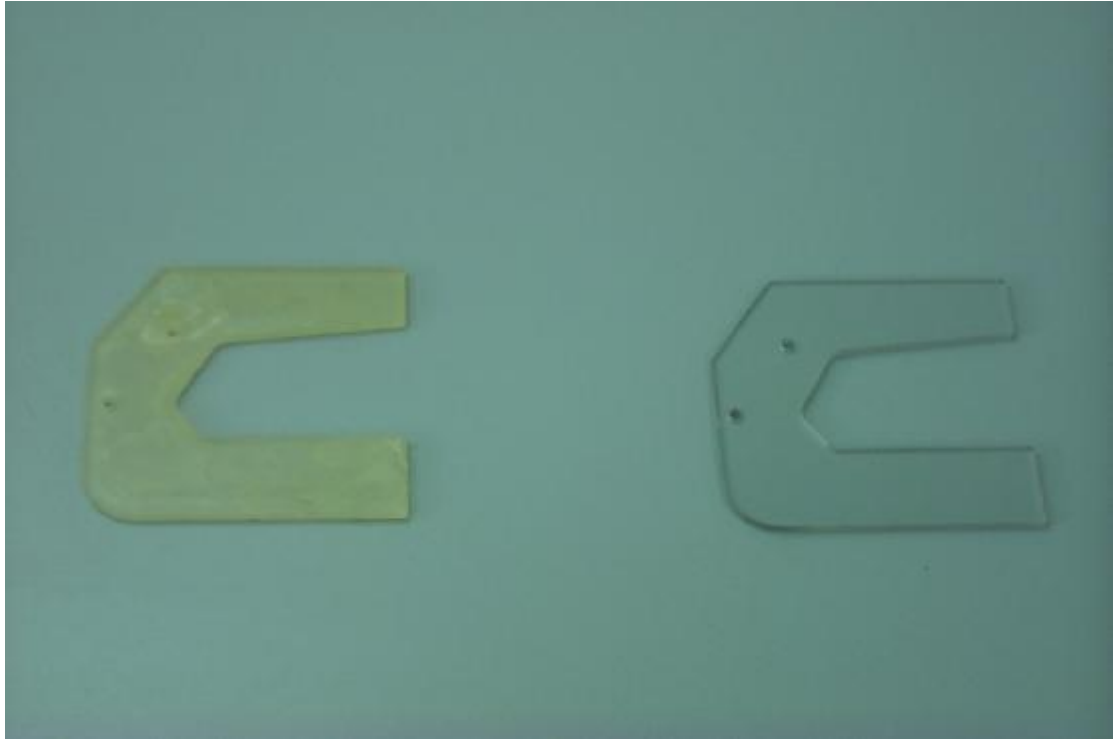
5.25 Πειραματική διαδικασία

Έχοντας ήδη στα κατοχή μας μια φλάντζα από διαφανές υλικό το οποίο έχει φωτοελαστικές ιδιότητες, αναπαράγαμε το σχέδιο δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο CAD αρχείο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε με τη κατάλληλη μετατροπή για να δημιουργηθεί με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας αντίγραφο της πρωτότυπης φλάντζας, όπως φαίνεται στην εικόνα. Στο αντίγραφο της φλάντζας ασκήθηκε θλιπτικό φορτίο 65 Nt.

Η φωτογραφία 5.7 πάρθηκε κατά τη διάρκεια της άσκησης του φορτίου, ενώ υποδεικνύονται και οι περιοχές που εμφανίζονται ισοχρωματικές γραμμές τάξης 1 και 1,22.

Εφαρμόζοντας τον τύπο για την εύρεση της διαφοράς των κυρίων τάσεων από τη θεωρία της φωτοελαστικότητας ($\sigma_1 - \sigma_2 = f_{\sigma} \cdot h / N$) και για $h = 3\text{mm}$ (πάχος της φλάντζας) συμπεραίνουμε ότι στη περιοχή με fringe order 1 έχουμε $\sigma_1 - \sigma_2 = 7166667 \text{ Nt/m}^2 = 7,166667 \text{ Nt/mm}^2$. Αντίστοιχα, στη περιοχή με fringe order 1,22 έχουμε $\sigma_1 - \sigma_2 = 8743333 \text{ Nt/m}^2 = 8,743333 \text{ Nt/mm}^2$

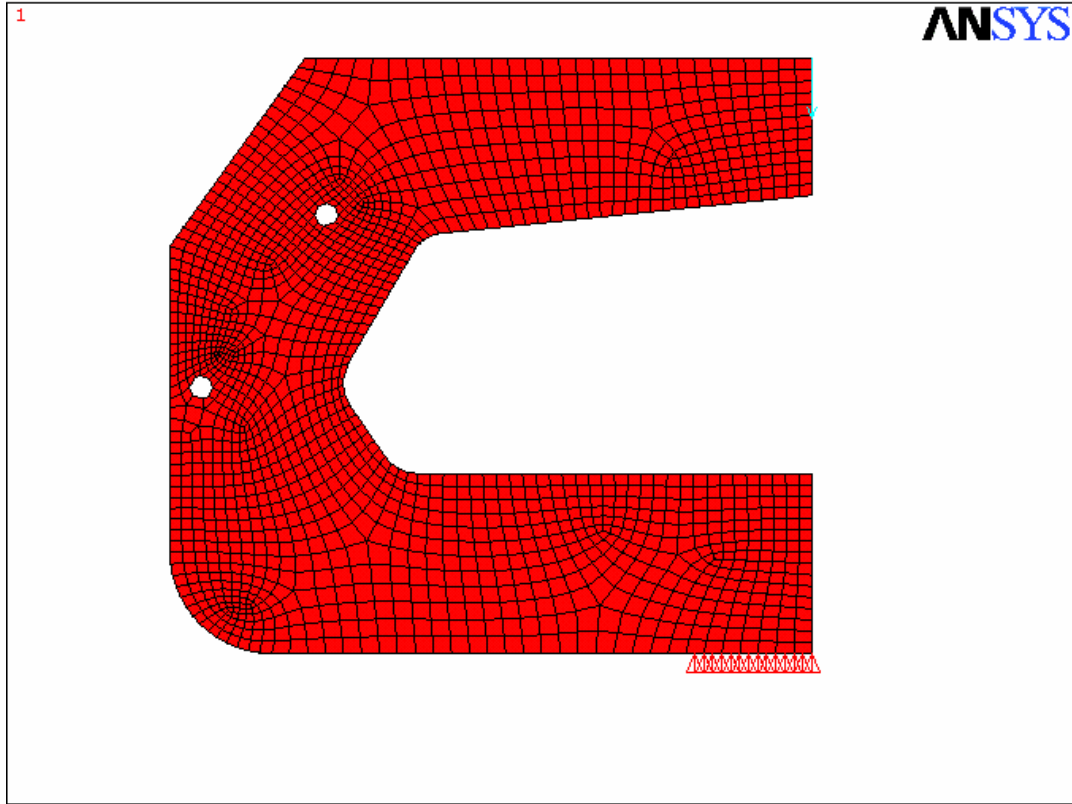
Με δεδομένες τις περιοχές που στη φωτογραφία 5.7 αντιστοιχούν σε fringe order 1 και 1,22, προχωρήσαμε στην αντίστοιχη διαδικασία με αναλυτικές μεθόδους. Με τη βοήθεια του πακέτου FEA ANSYS, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σχέδιο CAD και ζητήθηκαν αποτελέσματα για περιοχές τάσεις αντίστοιχε με αυτές που προκύπτουν από το πείραμα της φωτοελαστικότητας. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Shell 93 με 8 κόμβους. Τα νούμερα της εικόνας είναι σε MPa (Nt/mm^2). Η ανάλυση που χρησιμοποιείται μας δείχνει το stress intensity ($\sigma_1 - \sigma_2$). Η περιοχή των 7-9 MPa όπως φαίνεται στην εικόνα, περικλείει την περιοχή με fringe order 1. Αντίστοιχα η περιοχή 9-13 MPa του simulation περικλείει οριακά την ισοχρωματική τάξης 1.22



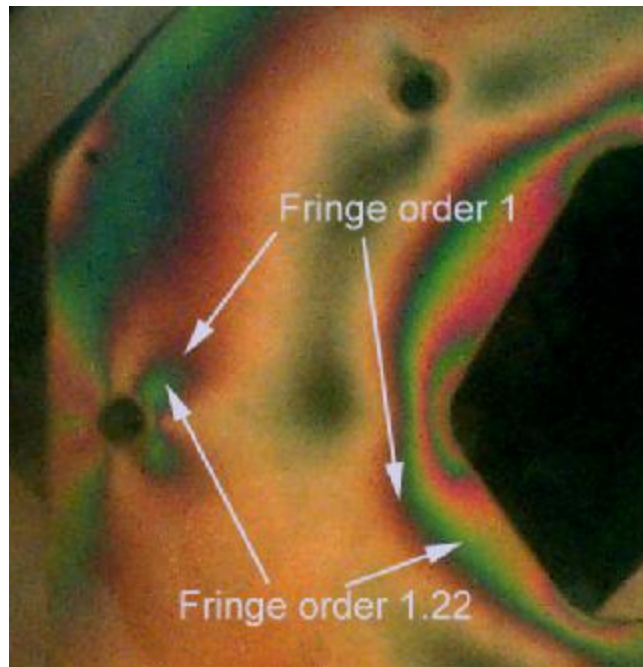
Φωτογραφία 5.6 Στην αριστερή πλευρά η πρωτότυπη φλάντζα και δεξιά το αντίγραφο της κατασκευασμένο με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας.

Αντίστοιχα η περιοχή 9-13 MPa των FEA περικλείει οριακά την ισochρωματική τάξης 1.22

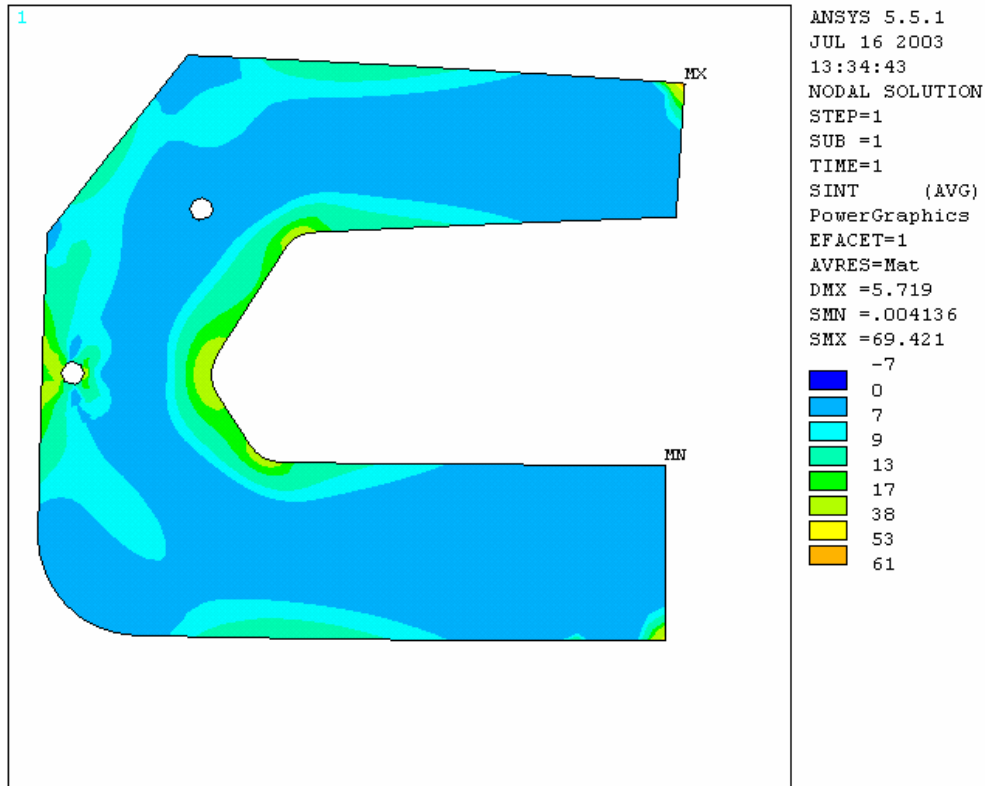
Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μεγέθη των τάσεων των πειραματικών και αναλυτικών δεδομένων, για τη περίπτωση της φλάντζας.



Σχήμα 5.15 Ο κάναβος που δημιούργησε το ANSYS για τη φλάντζα



Φωτογραφία 5.7 Fringe pattern όπως αποτυπώθηκε με τη βοήθεια ψηφιακής μηχανής. Το δοκίμιο υφίσταται φορτίο 65 Nt



Σχήμα 5.16 Ανάλυση Intensity για τη φλάντζα. Οι περιοχές με το ίδιο χρώμα παρουσιάζουν ίδια διαφορά μεταξύ κυρίων τάσεων

Φωτοελαστικότητα			FEA	
Fringe order	1	1,22	Γαλάζιο	ανοιχτό πράσινο
Διαφορά κύριων τάσεων (Mpa)	7,16	8,74	7-9 M	9-13

Πίνακας 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μεθόδου της φωτοελαστικότητας και των FEA. Η γαλάζια περιοχή των FEA αντιστοιχεί σε fringe order 1, ενώ η ανοιχτή πράσινη αντιστοιχεί σε fringe order 1,22

5.27 Συμπεράσματα

Από τις εργαστηριακές δοκιμές που διεξήχθησαν φαίνεται ότι τα δοκίμια στερεολιθογραφίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτοελαστικά πειράματα αποδίδοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Το φαινόμενο του edge effect, αν και εμφανίστηκε στις δοκιμές μας, (είναι ορατό στις φωτογραφίες των σελίδων 105-106), δεν φαίνεται να επηρέασε ιδιαίτερα τη πορεία των δοκιμών και τα αποτελέσματα. Swelling δεν εμφανίστηκε σχεδόν καθόλου. Εξάλλου έχει αποδειχθεί ότι εποξικές ρητίνες παρουσιάζουν αυτό το πρόβλημα σε μικρότερο βαθμό [26]. Τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.2 και 5.3 δείχνουν ότι η τιμή του f_{σ} της ρητίνης που αποκομίστηκε από τη διαδικασία βαθμονόμησης, ισχύουν για κάθε περίπτωση που εξετάσαμε.

Συμπεραίνεται ότι, παρόλα τα προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπισθούν, η τεχνική της φωτοελαστικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την στερεολιθογραφία, για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς εξαρτημάτων, σηματοδοτώντας έτσι έναν επιπρόσθετο τρόπο αξιοποίησης των πρωτοτύπων στερεολιθογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ

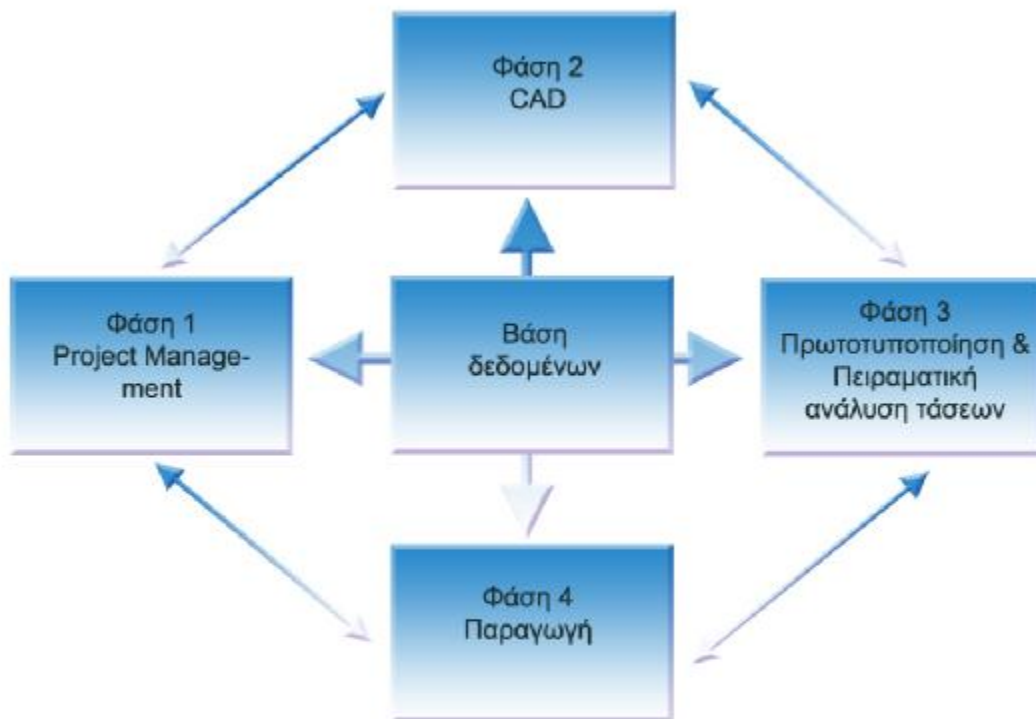
6.1 Εισαγωγικά

Μια σημαντική πρόκληση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της ανάπτυξης μηχανικών μερών και εξαρτημάτων είναι το πώς θα παρθούν σωστές αποφάσεις στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, σε ότι αφορά τη μηχανική τους συμπεριφορά. Όπως αναφέρθηκε, η δοκιμή προϊόντων σε ένα αρχικό στάδιο σχεδιασμού είναι επιθυμητή διότι οι βελτιώσεις στη σχεδίαση είναι λιγότερο δαπανηρές και καταναλώνουν λιγότερο χρόνο, εφόσον το σχέδιο δεν είναι πλήρως καθορισμένο και έτσι δεν έχουνε παγωθεί συμφωνίες με προμηθευτές και κατασκευαστές εργαλείων.

Κατά κανόνα, η επίγνωση των αποτελεσμάτων των μεταβολών της γεωμετρίας και των υλικών που χρησιμοποιούνται, στην επιθυμητή δομική συμπεριφορά του εξαρτήματος μπορεί να αποκτηθεί με προσομοιώσεις μέσω H/Y (FEA). Όμως η αριθμητική ανάλυση δεν λαμβάνει απαραίτητα υπόψη της όλες τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή των τάσεων σε πραγματικές συνθήκες, κάνοντας έτσι απαραίτητη την διεξαγωγή πειραματικής ανάλυσης των τάσεων [53]. Επιπλέον, πολλές φορές κρίσιμα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος μπορούν να αξιολογηθούν κατά την φάση πριν τη παραγωγή και μετά τη κατασκευή εργαλείων. Το μειονέκτημα τέτοιων δοκιμών αξιολόγησης είναι ότι γίνονται μετά από συγκεκριμένες ενέργειες (reactive) και ποτέ πριν από αυτές (pro-active). Αν ανακύψει ένα σοβαρό θέμα αξιοπιστίας από αυτές

τις δοκιμές, η αντιμετώπιση του μέσω των απαραίτητων αλλαγών θα είναι εξαιρετικά δαπανηρή και προβληματική λόγω μεγάλης παρέλευσης χρόνου.

Σε μια διαδικασία παράλληλης μηχανολογικής σχεδίασης χρειάζονται εξίσου δοκιμές αξιολόγησης και ανάλυσης για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού σχεδίου μέσα από την εποπτεία πραγματικών και δυνητικών αποτυχιών του μηχανισμού. Επίσης απαραίτητη είναι και η εξέταση του κατά πόσο η ποιότητα και η αξιοπιστία του εξαρτήματος ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Από αυτά φαίνεται ότι η διεξαγωγή δοκιμών αξιολόγησης πάνω σε ένα «μη υπαρκτό» εξάρτημα θα μπορούσε να είναι πολύ χρήσιμη.



Σχήμα 6.1 Φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος και οι τρόποι που αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους

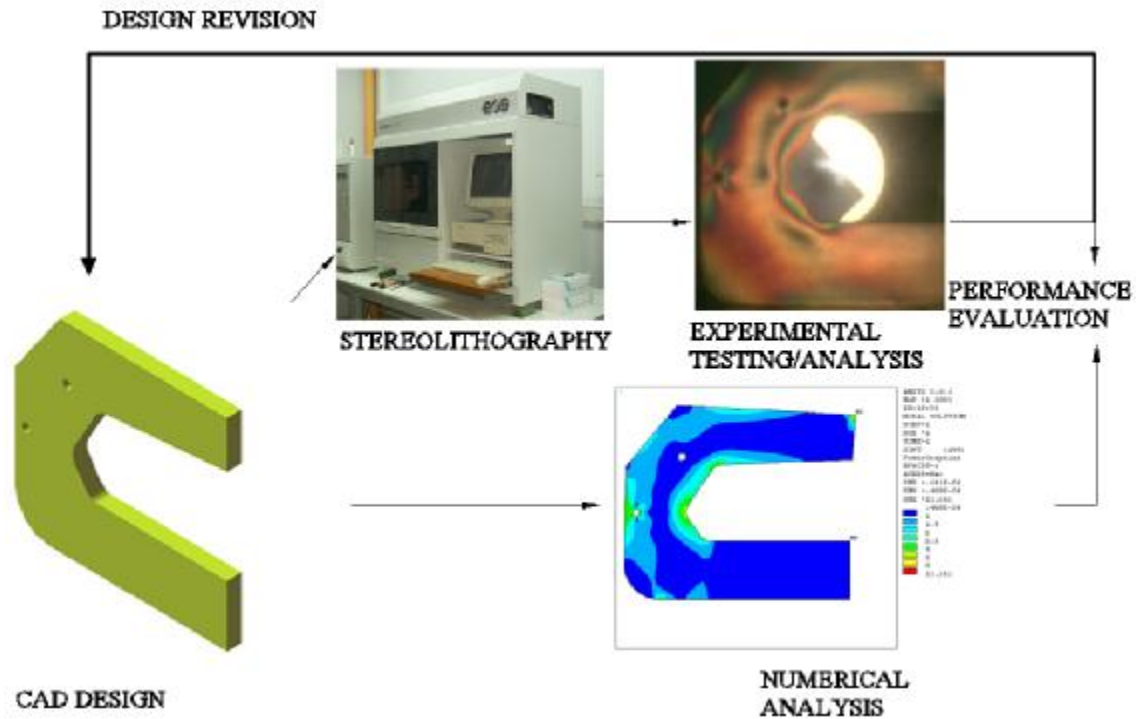
6.2 Σχεδιασμός μηχανικών εξαρτημάτων: μια καινοτομική προσέγγιση

Με βάση τα πειράματα φωτοελαστικότητας σε δοκίμια στερεολιθογραφίας που παρουσιάστηκαν, μπορεί να ακολουθηθεί μια εναλλακτική καινοτομική διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής καλύτερων προϊόντων, σε σύντομο χρόνο. Μια τέτοια διαδικασία περιλαμβάνει ένα διαδραστικό και επαναληπτικό κλειστό κύκλο από μοντέλα CAD, προσομοίωση με FEM, δοκιμές μοντέλων στερεολιθογραφίας με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης, και εκτιμήσεις και μετατροπές των σχεδίων με στόχο τη συνεχή βελτίωση τους. Το δοκίμιο της στερεολιθογραφίας μπορεί να αναλυθεί πειραματικά, τοποθετώντας το σε μια φωτοελαστική διάταξη, και εφαρμόζοντας του μετρήσιμο φορτίο με τη βοήθεια μιας μηχανής εφελκυσμού/θλίψης. Με αυτό τον τρόπο, αναπτύσσονται στο σώμα του μοντέλου τάσεις το που προκαλούν την ανάπτυξη έγχρωμων περιοχών (fringes) που γίνονται ορατές με τη βοήθεια του φωτοελαστικού εξοπλισμού. Από το μέγεθος και το σχήμα αυτών των περιοχών μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος αυτών των τάσεων, και να τις συγκρίνουμε με τα στοιχεία που παίρνουμε από την προσομοίωση. Μια τέτοια πρακτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπίσει τους προβληματισμούς που αναπτύσσονται κατά τη σχεδίαση και να αποκαλύψει έγκαιρα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν, μειώνοντας έτσι τα κόστη και συντομεύοντας την όλη διαδικασία ανάπτυξης.

Κατά την προτεινόμενη μεθοδολογία, η χρήση μοντέλων στερεολιθογραφίας για φωτοελαστική διερεύνηση επιτρέπει την δομική ανάλυση του σχεδίου σχεδόν αμέσως μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου CAD. Η ακρίβεια και η ποιότητα της επιφάνειας των δοκιμίων στερεολιθογραφίας είναι παραπάνω από επαρκής για μια τέτοια εφαρμογή.

Με αυτό τον τρόπο, τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση των μαθηματικών μοντέλων, επιλύοντας προβλήματα σχεδίασης πριν από οποιαδήποτε κατασκευή εργαλείων και παραγωγή, σε μια πλήρως παράλληλη λογική μηχανικής.

Συμπεράσματα από την εφαρμογή αυτής της τεχνική μπορούν να εξαχθούν για τα μεταλλικά εξαρτήματα σε συνδυασμό με κάποιες βασικές αρχές της θεωρίας similarity. Με τη χρήση αυτών των σχέσεων είναι δυνατόν να γίνουν σχετικά ακριβείς μετρήσεις σχετικά με τη κατανομή των τάσεων στα τελικά εξαρτήματα.



Σχήμα 6.2 Σχηματική αναπαράσταση της βελτιωμένης διαδικασίας ανάπτυξης

6.3 Εφαρμογές

Η μέθοδος ανάπτυξης και σχεδιασμού που παρουσιάστηκε μπορεί να βρει πεδίο εφαρμογής είτε σε παραδοσιακά θέματα σχεδιασμού, είτε σε θέματα που η φύση τους επιβάλλει τη χρήση πρωτοτύπων. Πρωτότυπα στερεολιθογραφίας έχουν χρησιμοποιηθεί για φωτοελαστικά πειράματα, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης θέσης και διαμέτρου ανακουφιστικών οπών (stress relief holes) για τις τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση των δοντιών των γραναζιών, όπου τα μοντέλα βοηθούν τη σύγκριση των προτεινόμενων λύσεων [49].

Στην οδοντιατρική κλασσικά φωτοελαστικά πειράματα εφαρμόζονται ήδη για την εύρεση των τάσεων και των τροπών σε οδοντικές υποστηρικτικές κατασκευές. Ο ρόλος της φωτοελαστικότητας εδώ, δεν είναι η ακριβής καταγραφή των τάσεων, αλλά η κατανόηση του πως κατανέμονται οι τάσεις [50].

Στην ιατρική η χρήση πρωτοτύπων SL καθώς και η μελέτη φωτοελαστικών ιατρικών μοντέλων μπορούν να συμβάλλουν στον σχεδιασμό και ανάπτυξη εφαρμογών που αφορούν την μελέτη της κατανομής τάσεων σε μέρη του σκελετού του ανθρώπινου σώματος, όπως για παράδειγμα οι σπόνδυλοι, και στη βελτίωση της κατασκευής πρόσθετων τεχνητών μελών, σε όλη δηλαδή την έκταση της επιστήμης της εμβιομηχανικής, όπου η μελέτη των τάσεων είναι απαραίτητη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΝΟΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης των πρωτοτύπων στερεολιθογραφίας για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς προϊόντων. Κατασκευάστηκαν ομοιόμορφες πλάκες από ρητίνη και χρησιμοποιήθηκε το φαινόμενο μοιγέ για να μελετηθεί το φαινόμενο της συρρίκνωσης των στερεολιθογραφικών πρωτοτύπων. Εξακριβώθηκε έτσι με πειραματικές μεθόδους ο βαθμός ακρίβειας των πρωτοτύπων και μελετήθηκαν τρόποι για τη τυχόν βελτίωση αυτής της ακρίβειας. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε προσφέρει το πλεονέκτημα της απλότητας σε σύγκριση με τεχνικές που χρησιμοποιούνται διεθνώς

Στη συνέχεια μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης των μοντέλων στερεολιθογραφίας για φωτοελαστική διερεύνηση. Διερευνήθηκε η φωτοελαστική σταθερά της ρητίνης από την οποία κατασκευάστηκαν τα πρωτότυπα, καθώς και οι επιπτώσεις που μπορούν να έχουν τα φαινόμενα ερπυσμού που παρατηρούνται έντονα όταν τα πρωτότυπα είναι ακόμα σε κατάσταση green. Εξετάστηκε επίσης το αν επηρεάζεται η φωτοελαστική σταθερά από τον διαφορετικό προσανατολισμό που μπορεί να έχει το πρωτότυπο από τον τρόπο κατασκευής του.

Η μελέτη και ο προσδιορισμός της φωτοελαστικής σταθεράς παρουσιάζει μεγάλη σπουδαιότητα καθώς καταδεικνύει την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της μεθόδου ενώ έχει γίνει αντικείμενο μελέτης διεθνώς (Curtis, J.D., Hanna, S. D., Patterson, E. A.

Taroni), με τη βοήθεια σημαντικών ερευνητικών κέντρων και εταιριών (Airbus, SNECMA, 3D Systems, University of Sheffield) [44], η οποία υποδεικνύει τα σημεία που μπορεί να υπάρξει βελτίωση και εξέλιξη της μεθόδου.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός υλικών με τις κατάλληλες οπτικές ιδιότητες για το «στήσιμο» μιας πολωροσκοπικής διάταξης. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα αναλυτικών μεθόδων (ANSYS) και οι τιμές των φωτοελαστικών πειραμάτων επαληθεύθηκαν (Πίνακες 5.2, 5.3). Προκύπτει ότι η χρήση φωτοελαστικών μοντέλων μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων ως προς την μηχανική συμπεριφορά χωρίς απαραίτητα να απαιτείται η διεξαγωγή χρονοβόρων αναλύσεων (FEM).

Μια άλλη προοπτική που διερευνήθηκε είναι η χρήση μοντέλων στερεολιθογραφίας υπό κλίμακα για τη πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς τελικών πρωτοτύπων. Χρησιμοποιήθηκε μια απλή γεωμετρία (απλός κύλινδρος με δύο εγκάρσιες οπές). Από το σχέδιο CAD κατασκευάστηκε το πρωτότυπο της στερεολιθογραφίας και υποβλήθηκε σε θλίψη. Από τα αποτελέσματα του πειράματος και με βάση τη θεωρία της ομοιότητας (similarity theory) έγινε μια εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός αντικειμένου τη ίδιας γεωμετρίας και μεγέθους κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Στη συνέχεια το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε και με το αντικείμενο από αλουμίνιο και η σύγκριση της εκτίμησης με τα δεδομένα του πειράματος υπήρξε ικανοποιητική. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συνεπικουρούν τα ελάχιστα δημοσιευμένα αποτελέσματα προς τη κατεύθυνση αυτή.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται πως η διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων μπορεί να ανασχεδιαστεί έτσι ώστε δεδομένα τα οποία αποκτώνται με τις

πρακτικές που παρουσιάστηκαν να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός προϊόντος για τη συνεχή διόρθωση του σχεδίου και για εμπλουτισμό των δεδομένων που έχουν στη διάθεση τους τα μέλη μιας ομάδας ανάπτυξης-σχεδιασμού.

Στα πλαίσια της μελλοντικής εργασίας μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος του stress freezing για ανάλυση δοκιμίων στερεολιθογραφίας, με την οποία μπορεί να γίνει ανάλυση τριών διαστάσεων. Στη συγκεκριμένη πρακτική ασκείται τάση στο πρωτότυπο σε περιβάλλον μεγάλης θερμοκρασία, και με αυτό τον τρόπο οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη τάση παραμένουν. Στη συνέχεια το μοντέλο κόβεται φέτες και η ανάλυση συνεχίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως και στην ανάλυση δύο διαστάσεων.

Επίσης, τα ερευνητικά αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια κάτι που θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση μονοχρωματικού φωτός, ιδιαίτερα σε τομείς όπως ιατρικές εφαρμογές και εμβιομηχανική. Σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός της φωτοελαστικής σταθεράς είναι απαραίτητος καθώς αυτή διαφέρει από ρητίνη σε ρητίνη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kochan, D., Kai, C. C. and Zhaohui, D., "Rapid prototyping issues in the 21st century," *Computers in Industry*, Vol. 39, 1999, Pages 3-10.
2. Acosta, R., Burns, C., Rzepka, W. and Sidoran, J., "Applying Rapid Prototyping Techniques in the Requirements Engineering Environment," *Proceeding of the April 1994 1st International and then they are in the and the Conference on Requirements Engineering, Colorado Springs*.
3. Wiedemann, B. and Jantzen, H. -A., "Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG", *Computers in Industry, Volume 39, Issue 1, June 1999, Pages 11-25*.
4. Pham, D. T. and Gault, R. S., "A comparison of rapid prototyping technologies," *International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 38, Issues 10-11, October 1998, Pages 1257-1287*.
5. Giannatsis, J., Dedoussis V. and Laios, L. "A study of the build-time estimation problem for Stereolithography systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 17, Issue 4, August 2001, Pages 295-304*
6. Choi S.H., Samavedam S., "Modeling and optimization of Rapid Prototyping" *Computers in Industry 47 (2002) pp. 39-53*.
7. Vainikainen M., Jarvela P., "The prediction of Mechanical Properties of Injection Moulding Parts by Vacuum Casting", *Polymer Testing, Vol 17, 1998, pp. 543-548*.
8. Barlow J., Beaman J., Balasubramanian B., "A rapid mould-making system: material properties and design considerations", *Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, Number 3, 1996, pp. 4-15*.
9. Atcholi K. E., Vantomme J., Perreux D., "Characterization of the Torsional Behavior of Photosensitive Polymer Obtained by Stereolithography", *Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 8, pp203-281, 2003*.
10. Chen, Y. H. and Ng, C. T., "Integrated reverse engineering and rapid prototyping," *Computers & Industrial Engineering, Volume 33, Issues 3-4, December 1997, Pages 481-484*.
11. Bradley C., "The Application of Reverse Engineering in Rapid Product Development", *Sensor Review, Vol. 18, No. 2, 1998, pp. 115-120*.

12. Ferreira J.C., Alves N.F., "Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology", *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) pp. 374-382.
13. Nyaluke A. P., Donke A., Leep H., Parsei H., "Rapid Prototyping: Applications in Academic Institutions and Industry", *Computers and Industrial Engineering*, Vol 29, No 1-4, pp. 345-349, 1995.
14. Fuh, J.Y.H., Lu, L., Tan, C. C., Shen, Z. X. and Chew, S., "Curing Characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, Number 1, 1999, Pages 27-34.
15. Fuh, J.Y.H., Lu, L., Tan, C. C., Shen, Z. X. and Chew, S., "Processing and characterizing photosensitive polymer in the rapid prototyping process," *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 1999, Pages 211-217.
16. Cheah, C. M., Nee, A. Y. C., Fuh, J. Y. H., Lu, L., Choo, Y. S., and Miyazawa, T., "Characteristics of photopolymeric material used in rapid prototypes Part I. Mechanical properties in the green state," *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 67, Issues 1-3, May 1997, Pages 41-45.
17. Cheah, C. M., Nee, A. Y. C., Fuh, J. Y. H., Lu, L., Choo, Y. S., and Miyazawa, T., "Characteristics of photopolymeric material used in rapid prototypes Part II. Mechanical properties at post-cured state," *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 67, Issues 1-3, May 1997, Pages 46-49.
18. Nee, A. Y. C., Fuh, J. Y. H. and Miyazawa, T., "On the improvement of the stereolithography (SL) process," *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 113, Issues 1-3, 15 June 2001, Pages 262-268
19. Cheah, C. M., Nee, A. Y. C., Fuh, J. Y. H., Lu, L., Kang, E. T., and Miyazawa T., "Origin of shrinkage, distortion and fracture of photopolymerized material," *Materials Research Bulletin*, Volume 30, Issue 12, December 1995, Pages 1561-1569.
20. Wang W. L., Cheah C. M., Fuh J. Y. H. and Lu L., "Influence of process parameters on stereolithography part shrinkage", *Materials & Design*, Vol. 17, pp. 205-213, 1996.
21. Zhou, J. G., Herscovici, D. and Chen, C. C., "Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 40, Issue 3, February 2000, Pages 363-379.
22. Fuh J. Y. H., Choo Y. S., Lu L., Nee A. Y. C., Cheah C. M., Wong Y. S., Wang W. L., and Miyazawa T., "Post-Cure Shrinkage of Photo-Sensitive Material Used

- in Laser-Lithography Process” *Journal of Materials Processing Technology Vol. 63 pp. 88-893, 1997.*
23. Harper, B., Peretz, D., Weitsman, Y., “Assessment of chemical cure shrinkage stresses in two technical resins,” *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS 24th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Lake Tahoe, Nevada, May 2-4, 1983.*
 24. Chartoff R. P., Flach L. and Weissman P. “Material and Process Parameters that Affect Accuracy in Stereolithography”, *in the Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, pp. 245-252, September 1993, Austin Texas.*
 25. Weissman P. T., Linden S. M., and Chartoff R. P., “The Relationship Between Crosslink Density and Tensile Properties of UV Cured Multifunctional Acrylates”, *in the Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 225-233, June 12-15 1994, Ohio.*
 26. Weissman P. T., Chartoff R. P., Rodrigues S. J. and Linden S. M., “Real Time Measurements of Linear Shrinkage during Laser Photopolymerization: Implications Concerning Post Cure Shrinkage”, *in the Proceedings of the Fourth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 263-270, June 14-17, 1993, Ohio.*
 27. Ullett J. S., Rodrigues S. J. and Chartoff R. P., “Linear Shrinkage of Stereolithography Resins”, *in the Proceedings of the Sixth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 261-269, June 4-7, 1995, Ohio.*
 28. Flach L. and Chartoff R. P., “Laser Scan Rates and Shrinkage in Stereolithography”, *in the Proceedings of the Fourth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 239-248, June 14-17 1993, Ohio.*
 29. Ulett J. S., Chartoff R. P., Lightman A. J., Murhy J. P., Jinghong L., “Reducing Warpage in Stereolithography through Novel Draw Styles”, *in the Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 242-249, June 12-15, 1994, Ohio.*
 30. Ullett J., Benson-Tolle T., Schultz J., Chartoff R.P., “Thermal-expansion and fracture toughness properties of parts made from liquid crystal stereolithography resins”, *Materials and Design Vol. 20, 1999, pp. 91-97.*
 31. Shimbo M., Ochi M., Shigeta Y., “Shrinkage and Internal Stress during Curing of Epoxide Resins”., *Journal of Applied Polymer Science, Vol 26, 2265-2277, 1981.*
 32. Flach L. and Chartoff R. P., “A Simple Polymer Shrinkage Model Applied to Stereolithography”, *in the Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, pp 225-233, June 14-17, 1993, Ohio.*

33. Flach L. and Chartoff R. P., "Stereolithography Process Modeling: Shrinkage Prediction", in the *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, pp 181-190, June 12-15, 1994, Ohio.
34. Karalekas, D., Daniel, I. M. and Gotro, J. T., "Studies of the Warpage of Woven-glass-Epoxy Laminates,"
35. Karalekas, D., Daniel, I. M. and Gotro, J. T. in: Paipetis, S. A., Papanicolaou, G. C. (Eds), "Phase Interaction in Composite Materials," *Omega Scientific, London, 1988, Pages 574-584.*
36. Daniel, I. M., Wang, T. M., and Karalekas, Gotro, D., "Determination of Chemical Cure Shrinkage in Woven-Glass/Epoxy Laminates," *J. Comp. Technology Res.* 12/3, 1990, Pages 172-176.
37. Karalekas, D., "A proposed analysis and experimental methodology for the determination of cure shrinkage in SL formed plates," *Proceedings of the 9th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Athens, Greece, July 17-19, 2000.*
38. Colton, J., Blair, B., "Experimental study of post-build cure of stereolithography polymers for injection molds," *Rapid Prototyping Journal*, 5/2, 1999, Pages 72-81.
39. Ottemer X. and Colton J., "Effects of aging on epoxy-based rapid tooling materials", *Rapid Prototyping*, Vol. 8, Number 4, 2002, pp 215-223.
40. Uichung Cho and Kristin L. Wood, "Empirical Similitude Method for the Functional Test with Rapid Prototypes", in the *proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin Texas 11-13/8, 1997.*
41. Alan J. Dutson, Kristin L. Wood, Joseph J. Beaman, Richard H. Crawford and David L. Bourell, "Application of similitude techniques to functional testing of rapid prototypes" *Rapid Prototyping Journal*, Volume 9, Number 1, 2003, pp 6-13.
42. Uichung Cho, Kristin L. Wood and Richard Crawford, "Online functional testing with rapid prototypes: a novel empirical similarity method", *Rapid Prototyping Journal*, Volume 4, Number 3, 1998, pp 128-138.
43. Wykes, C., Buckberry, C., Dale, M., Reeves, M., Towers, D., "Functional testing using rapid prototyped components and optical measurement," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 31, 1999, Pages 411-424.

44. Curtis, J.D., Hanna, S. D., Patterson, E. A. and Taroni, M., "On the Use of Stereolithography for the Manufacture of Photoelastic Models," *Experimental Mechanics Vol. 43, no2, June 2003*.
45. Zenina, A., Dupré, J. C. and Lagarde, A., "Separation of isochromatic and isoclinic patterns of a slice optically isolated in a 3-D photoelastic medium," *European Journal of Mechanics - A/Solids, Volume 18, Issue 4, July 1999, Pages 633-640*.
46. Steinchen, W., Kramer, B. and Kupfer, G., "Cost Reduction by Rapid Prototyping Photoelasticity," *Proceedings of the 1996 3rd Biennial Joint Conference on Enineering Systems Design And Analysis, ESDA. Part 4 (of 9), Montpellier, France*.
47. Patterson, E. A., Ji, W. and Wang, Z. F., "On image analysis for Birefringence measurements in Photoelasticity," *Optics and Lasers in Engineering, Volume 28, Issue 1, September 1997, Pages 17-36*.
48. Measurments Group Tech Note, "Introduction to Stress Analysis by the Photostress® Method," Vishay Measurments Group, 1989, USA.
49. Ahlqvist A., Ionescu I., Moslehey F.A., "Stress Reduction in a Gear Tooth using Photoelasticity and Finite Element Analysis", *Experimental Techniques, Vol 25 no 5 pp 19-21, 200*
50. Asundi Anand., Kishen Anil, "A strain gauge and photoelastic analysis of in vivo strain and in vitro stress distribution in human dental supporting structures", *Archives of Oral Biology, Vol 45, 2000, pp. 543-550*.
51. Szaroletta W., Anderson J., "An Innovative Approach to Visualization of Stress", 31st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference T3C-6, October 10-13,2001 Reno, NV
52. Lau, H, Jiang, B., Chan, F., Ip, R., "An Innovative scheme for product and process design," *Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, 2002, Pages 85-92*.
53. Kumbakonam A., Dwivendi S., "Implementation of Product Realization in Engineering Curriculum for a Changing World" *in the Proceeding fo 2002 ASEE-Gulf Southwest Annual Conference, The University of Louisiana at Lafayette, March 20-22, 2002*.
54. Fearis P., "The Polaroid experience: Countdown to market", *World Class Design to Manufacture, Vol. 2, Number 4, 1995, pp. 4-10*.

55. Ardayfio D., "Principles and Practices of Design Innovation", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol 64, 2000, pp. 165-169.
56. Dusel, K. H., Eschl, J. and Wiedemann, B., "Improvement of part accuracy-investigations into the basics of photopolymerisation," *Proceedings of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, Finland, June 4-6, 1995.*
57. Dally, J. W. and Riley, W. F., "Experimental Stress Analysis," *McGraw-Hill, New York, 1992.*
58. Cloud, L., "Optical Methods of Engineering Analysis," *Cambridge University Press, 1998, United Kingdom.*
59. Jacobs, P. F., "Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography," *McGraw-Hill, 1992, New York.*
60. Otto, K., Wood, K., "Product Design Techniques in Reverse Engineering and New Product Development," *Prentice Hall, 2001.*
61. Ulrich, K., Eppinger, S., "Product Design and Development," *Irwin McGraw-Hill, 2000, International Edition*

Βιογραφικό Σημείωμα

Αγγελόπουλος Αγγελος

ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ημερομηνία Γεννήσεως: 30/09/1972
Τόπος Γεννήσεως: Αθήνα
Τόπος καταγωγής: Ηλεία
Οικογενειακή Κατάσταση: Άγαμος
Διεύθυνση: Ρόδων 1, 142 35, Αλσούπολη, Αθήνα
Τηλέφωνο: Οικ. 210 2779201 , Κιν. 6946820771
E-mail: solegga@yahoo.com

ΣΠΟΥΔΕΣ

1991-1998

Σπουδές στο Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας (Πρώην Τεχνολογίας και Συστημάτων Παραγωγής) του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Ιανουάριος 2000-Μάρτιος 2004

Διδακτορική Διατριβή στο ανωτέρω τμήμα, με τίτλο: «Διερεύνηση της Λειτουργικής / Μηχανικής Συμπεριφοράς Προϊόντων με τη Χρήση Μοντέλων Στερεολιθογραφίας».

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Ιανουάριος 2000- Ιούνιος 2001

Σχεδίαση και δημιουργία τρισδιάστατων πρωτοτύπων με τις μεθόδους της στερεολιθογραφίας και της χύτευσης υπό κενό. Μελέτη των φωτοελαστικών ιδιοτήτων πολυμερών που χρησιμοποιούνται στην ταχεία πρωτοτυποποίηση.

Συμμετοχή στην ερευνητική ομάδα του έργου με τίτλο: «ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΙΑΛΩΝ PET, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΩΝ ΛΥΣΕΩΝ», με αντικείμενο τη διεκπεραίωση πειραμάτων, καθώς και τη δημιουργία

μοντέλων με πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Το έργο ήταν χρηματοδοτούμενο από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

Επικουρική διδασκαλία του μαθήματος «Στοιχεία μηχανών» στο τμήμα Τεχνολογίας και Συστημάτων Παραγωγής του Πανεπιστημίου Πειραιά, και επίβλεψη των εργαστηριακών ασκήσεων στα πλαίσια του ιδίου μαθήματος.

2002

Διδασκαλία σχεδιασμού μέσω Η/Υ (Autocad) για τον εκπαιδευτικό οργανισμό Carrieria.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Karalekas D., and **Aggelopoulos A.**, “*Study of Shrinkage Strains in a Stereolithography Cured Acrylic Photopolymer Resin,*” Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science, Vol 136 (2003) pp. 146-150.
2. Karalekas D., Rapti D., Gdoutos E. E., and **Aggelopoulos A.**, “*Investigation of Shrinkage Induced Stresses in Stereolithography Photo-Curable Resins,*” Experimental Mechanics, Sage Publications Ltd, Vol. 42, No. 4, December 2002, pp. 1-6.
3. **Aggelopoulos A.**, and Karalekas D., “*Determination of Cure Shrinkage in SL Layer Build Plates Using Lamination Theory,*” Advanced Composites Letters, Vol. 10, No. 1, 2001, pp. 7-12.
4. Karalekas D., Gdoutos E. E., Rapti D., and **Aggelopoulos A.**, “*Experimental Investigation of Shrinkage Induced Stresses in Two Stereolithography Photopolymer Systems,*” in “Proceedings of the SEM Annual Conference on: Experimental and Applied Mechanics, Published by the Society for Experimental Mechanics, Inc., June 4-6, 2001, Portland, Oregon, USA, pp. 678-681 (ISBN: 0-912053-74-7).
5. Kontomitros C., Bei K., Karalekas D., **Aggelopoulos A.**, and Zacharopoulos D., “*Investigation of Stereolithography Prototypes Polymerization Degree using a Non-Destructive Evaluation Method,*” (in Greek), in “Proceedings of the 2nd National Conference of Non-Destructive Evaluation Techniques”, Hellenic Society of Non-Destructive Testing (HSNT), June 17, 2000, Volos, Greece, pp. 81-86.
6. **A. Agelopoulos**, and D. Karalekas, “*Rapid Practices and Tools Innovating the Product Development Process,*” in “Proceedings of the 6th SMESME International Conference, Athens, Greece, June 2003

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ

1. 9th European Conference of Rapid Prototyping and Manufacturing, July 17-19, 2000, Athens, Greece.
2. 2^o Εθνικό Συνέδριο Ελληνικής Εταιρείας μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΕΛΕΜΚΕ), 17 Ιουνίου 2000, Βόλος.

3. Παρουσίαση εργασίας στο 6th SMESME International Conference, Athens, Greece, June 2003

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά: Πολύ Καλά. Ιαπωνικά: Βασικό Επίπεδο

ΓΝΩΣΕΙΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Χρήση λογισμικού σχεδίασης (AutoCad, Inventor). Χειρισμός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus, Ansys), και τρισδιάστατου σχεδιασμού (3d Studio max).

Αρκετά μεγάλη εξοικείωση με τις νεώτερες εκδόσεις των λειτουργικών συστημάτων της Microsoft (MS Windows 95, MS Windows 98), καθώς και των πακέτων οργάνωσης γραφείου της ίδιας εταιρίας (MS Office 95, MS Office 97, MS Office 2000).

Αρκετά μεγάλη εξοικείωση στη χρήση των τεχνολογιών του διαδικτύου (Internet technologies), και ειδικότερα καθημερινή χρήση του Web και επικοινωνία μέσω e-mail. Τυφλή πληκτρολόγηση.

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΕΣ ΔΕΞΙΟΤΗΤΕΣ

Χειρισμός μηχανής στερεολιθογραφίας EOS για κατασκευή τρισδιάστατων πρωτότυπων από πολυμερισμένη ρητίνη. Χειρισμός συστήματος vacuum casting της EOS.