

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Τομέας Μηχανικής

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Β. Κυτόπουλος

Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνείο

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Τομέας Μηχανικής

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Β. Κυτόπουλος

Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 23^η Φεβρουαρίου 2018

(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)
Βίκτωρ Κυτόπουλος	Δημήτριος Ευταξιόπουλα	ος Α	θανάσιος Ζήσης
Αναπλ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.	E	πικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

ΠΙ Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Διπλωματούχος Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Εφαρμογών Ε.Μ.Π.

© 2018 – All rights reserved

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ

(πογραφη)

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρουσα διπλωματική εργασία αρχικά προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας Ε του σύνθετου υλικού ενισχυμένου με εγκλείσματα, εξετάζοντας ένα τριφασικό θεωρητικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την έννοια της ενδιάμεσης φάσης. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού είναι η πρόσφυση που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός στρώματος μεταξύ μεταξύ του εγκλείσματος και της μήτρας, το οποίο διαθέτει θερμομηχανικές ιδιότητες διαφορετικές από εκείνες της συνιστώμενης φάσης. Επομένως προκύπτει ένας τύπος για το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson της ενδιαμέσου φάσεως. Η προκύπτουσα θεωρητική τιμή συγκρίθηκε με εκείνες που προβλέπονταν από άλλες θεωρητικές εκφράσεις καθώς και από τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε εποξειδικές ρητίνες με εγκλείσματα σιδήρου και αργιλίου. Στη συγκεκριμένη διπλωματική γίνετε μια πειραματική μελέτη της μικροθραυστικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών με τη μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM). Πιο αναλυτικά μελετώνται εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένες με κόκκους SiC και Al. Τέλος στο κεφάλαιο διεξάγεται μια μελέτη για την υδροαπορροφητικότητα των συνθέτων υλικών με βάση το μοντέλο διάχυσης του Fick και την επίδραση αυτής στη δυσκαμψία και στην αντοχή των σύνθετων υλικών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ.Αιμίλιο Σιδερίδη Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π και τον κ.Βίκτωρ Κυτόπουλο Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π για την αδιάκοπη και ουσιαστική βοήθεια που προσέφεραν για την τεκμηρίωση και την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Abstract

In this thesis at first the elastic modulus of particle-reinforced composite was determined by considering a three-phase theoretical model which takes into account the concept of interphase. According to this model an important parameter affecting the behavior of the composite is the adhesion characterized by the existence of an interphase layer between filler and matrix, which possesses thermo mechanical properties different from those of the constituent phase. A convenient law of variation was assumed for the elastic modulus and Poisson ratio of the interphase vs the polar radius. The derived theoretical value were compared to those predicted by other theoretical expressions as well as with the experimental results obtained from experiments carried out on iron and aluminium epoxy composites. The thickness and volume fraction of the interphase were determined by thermal heat capacity measurements according to an existing theory experimental works is to try to explain and/or to interpret in a convincing manner observed discrepancies between theory and experiment. In this sense, our task is carried out based on a qualitative approach supported by scanning election microscopy(SEM).

Finaly, a comparative investigation of water absorption stiffness and strength of particle reinforced composites was performed.

<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

ΠΟΛΥΜΕΡΗ-ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ- ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

		Σελ.
1.1	Ιστορική αναδρομή	1
1.2	Εποξειδικές ρητίνες	1
1.2.1	Γενικοί ορισμοί	1
1.2.2	Ιδιότητες υγρών –εποξειδικών ρητινών	2
1.3	Πολυμερή υλικά	4
1.3.1	Περιγραφή του πολυμερούς	4
1.3.2	Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή	4
1.3.3	Τεχνολογικές προδιαγραφές για τα πρόσθετα υλικά	5
1.3.4	Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή	5
1.3.5	Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες	6
1.4	Σύνθετα υλικά-εγκλείσματα στις εποξειδικές ρητίνες	6
1.4.1	Ιστορική αναδρομή	6
1.4.2	Γενικοί ορισμοί	9

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

1.4.3	Παράμετροι που ορίζουν ένα σύνθετο υλικό	10
1.4.4	Κατάταξη και ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	10
1.5	Διάκριση και χαρακτηριστικά τψν φάσεων στα υλικά	11
1.5.1	Κύρια φάση	11
1.5.2	Διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση	12
1.6	Επίδραση των εγκλεισμάτων στις ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών	13
1.6.1	Γενική περιγραφή	13
1.6.2	Ιδιότητες	13
1.7	Εφαρμογές σύνθετων υλικών	14
1.7.1	Αεροναυπηγική	15
1.7.2	Αυτοκινητοβιομηχανία	18
1.7.3	Εφαρμογές στην γειρουργική	19

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>

<u>ΚΟΚΚΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ</u> <u>ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ</u>

2.2 Μέτος ελαστικότητας των κοκκωδών σύνθετων υλικών		2.2	Μέτρο ελαστικότητας των κοκκωδών σύνθετων υλικών	22
--	--	-----	--	----

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

2.2.1	Μέτρα ελαστικότητας με σφαιρικά εγκλείσματα	24
2.2.2	Περιορισμοί θεωρητικών μοντέλων σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών	27
2.3	Θεωρητική μελέτη μοντέλων για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του κοκκώδους υλικού	29
2.4	Διφασικό μοντέλο	29
2.5	Αντοχή των κοκκωδών υλικών	30
2.5.1	Τάση θραύσης	30
2.5.1.1	Μοντέλο των Sahu-Broutman	30
2.5.1.2	Ο νόμος των δυνάμεων	31
2.5.1.3	Η εξίσωση των Leidner-Woodhams	32
2.5.2	Περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων σχετικά με την αντοχή των σύνθετων υλικών	33
2.5.2.1	Παραμόρφωση θραύσης των κοκκωδών σύνθετων υλικών	34
2.6	Η ενισχυτική δράση των εγκλεισμάτων στα πολυμερή	34
2.7	Ενέργεια θραύσης στερρότητα	36

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>

$\frac{\Pi P \Omega T O K O \Lambda \Lambda A - \Pi P O \Delta I A \Gamma P A \Phi E \Sigma - \Sigma X O \Lambda I A \Sigma M O \Sigma - T \Omega N \Pi E I P A M A T I K \Omega N}{A \Pi O T E \Lambda E \Sigma M A T \Omega N}$

3.1	Υλικά κατασκευής δοκιμίων	37
3.2	Μετρήσεις υδροαπορροφητικότητας	40
3.2.1	Προδιαγραφη ASTM D570	40
3.2.1.1	Σκοπός	40
3.2.1.2	Σημασία	40
3.2.1.3	Συσκευές (Εξαρτηματα)	41
3.2.1.4	Δοκίμια	41
3.2.1.5	Προετοιμασία δοκιμών	42
3.2.1.6	Διαδικασία εμβαπτισης	42
3.2.1.7	Συνοπτική διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων υγροαπορρόφησης	43
3.2.1.8	Επαναληπτική προετοιμασία των δοκιμίων	44
3.3	Προδιαγραφή θλίψης ASTM D695 Θλιπτικές ιδιότητες των πλαστικών	44
3.3.1	Σκοπός	44

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών XI υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.3.2	Εφαρμόσιμοι κανονισμοί	44
3.3.3	Σημασία	44
3.3.4	Ορισμοί	45
3.3.5	Μηχανές και εξαρτήματα	45
3.3.6	Δοκίμια	46
3.3.7	Προετοιμασία δοκιμίων	47
3.3.8	Δοκίμια	47
3.3.9	Ταχύτητα δοκιμής	47
3.3.10	Διαδικασία	47
3.3.11	Υπολογισμοί	48
3.3.12	Έκθεση αποτελεσμάτων	49
3.4	Προδιαγραφή κανονισμού ASTM D-638	49
3.4.1	Σκοπός και περιγραφή της μεθόδου	49
3.5	Θεωρητική μελέτη μοντέλων για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του κοκκώδους υλικού	50
3.5.1	Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων	51
3.6	Πειραματική μελέτη της μικροθραυστικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών με τη μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM)	54

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.6.1	Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σαρώσεως	54
3.7	Ηλεκτρονική μικροθραυσιογραφικη ανάλυση εποξειδικών ρητινών ενισχυμένων με κόκκους SiC και αλουμινίου (Al)	56
3.8	Ποιοτική μικροθραυστική ανάλυση και ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων	59
3.8.1	Γενικά	59
3.8.2	Ανάλυση και καταγραφή των μικροφαινομένων θραύσης	59
	Παράρτημα κεφαλαίου 3-Γραφικές παραστάσεις	61

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

<u>ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ</u> <u>ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u>

4.1	Τριφασικό μοντέλο	80
4.2	Συνθήκη ισορροπίας ενέργειας παραμορφώσεως στο σύνθετο υλικό	84
4.2.1	Λόγος Poisson v _c του συνθέτου υλικού	86
4.3	Νόμοι μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της ενδιαμέσου φάσης	86
4.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεταβολής Ε _i και v _i συναρτήσει της ακτίνας r _i	88
4.4.1	Μελέτη του τριφασικού μοντέλου για εγκλείσματα (Al) με r _f =80μm	90

4.5	Μεταβολή της μεσοφάσης συναρτήσει της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων για διάφορες διατάξεις	92
Παράρι	τημα κεφαλαίου 4-Γραφικές παραστάσεις	94
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>	
<u>M</u>	ελέτη της υγροαπορροφητικότητας των συνθέτων υλικών μοντέλα διάχυσης του Fick	<u>)</u>
5.1	Χαρακτηρισμός συνθέτων υλικών μήτρας εποξειδικής ρητίνης με τη βοήθεια του φαινομένου της υγροαπορρόφησης	106
5.1.1	Βασικές έννοιες της μεσοφάσης των κοκκωδών σύνθετων υλικών	106
5.2	Μοντέλο διάχυσης του Fick	108
5.3	Επίδραση της υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες	112
5.3.1	Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης	113
5.3.2	Μέτρο ελαστικότητας Ε	113

5.3.3 Λόγος Poisson

5.3.4	Τάση θραύσης	114
5.3.5	Παραμόρφωση θραύσης	116
5.3.6	Ειδική ενέργεια θραύσης	117

113

Σύγκριση με θεωρητικά μοντέλα 5.3.7 117

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών Σελίδα υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης XIV

5.3.7α	Μέτρο ελαστικότητας Ε	118
5.3.7β	Τάση θραύσης σ _θ	118
5.3.7γ	Παραμόρφωση θραύσης ε	119
Παράρτ	ημα κεφαλαίου 5-Γραφικές παραστάσεις	120
Βιβλιογ	ραφία	165

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u> <u>ΠΟΛΥΜΕΡΗ - ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ – ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ</u>

1.1 Ιστορική αναδρομή:

Η παραγωγή των ρητινών ξεκίνησε ουσιαστικά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και πιο συγκεκριμένα στα τέλη του 1920 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (Η. Π. Α.). Η παραγωγή τους αυξήθηκε από τα μέσα τις δεκαετίας του 1950 με τη δημιουργία νέων εποξειδικών ρητινών όπως της epichlorohydrin και της polyhydric. Την ίδια όμως χρονική περίοδο γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη και τα σύνθετα υλικά λόγω της αλματώδους εξέλιξης της επιστήμης των πολυμερών. Τα πολυμερή είναι απαραίτητα για την σύνθεση νέων υλικών και συνεπώς για τη δημιουργία υλικών που πληρούν τις ανάγκες της σύγχρονης ζωής.

1.2 Εποξειδικές ρητίνες:

<u>1.2.1 Γενικοί ορισμοί:</u>

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων ή θερμοσταθερών πολυμερών. Είναι προϊόντα ατελούς πολυμερισμού, τα οποία όταν θερμανθούν γίνονται μαλακά. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ο πολυμερισμός καθίσταται πλήρης και οι ρητίνες σκληραίνονται οριστικά.

Το εποξείδιο είναι μια χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου (O₂) ενωμένο με δύο άτομα άνθρακα (C) τα οποία είναι ήδη ενωμένα με άτομα άλλων στοιχείων. Επομένως, το μόριο μίας εποξειδικής ρητίνης αποτελείται από έναν αριθμό εποξειδίων που ενώνονται υπό μορφή ευθείας ή δακτυλίου και σχηματίζουν ένα γιγάντιο μόριο.

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι απαραίτητες για τη δημιουργία των σύνθετων υλικών γιατί σχεδόν πάντα είναι το ένα τουλάχιστον από τα προϊόντα που συνδυάζονται στο τελικό σύνθετο υλικό. Σε πολλές περιπτώσεις δε χρησιμοποιούνται και μόνες τους και θεωρούνται πάλι ως σύνθετα υλικά εξαιτίας του ότι σε μικροσκοπική κλίμακα είναι και οι ίδιες σύνθετα υλικά.

Οι εποξειδικές ρητίνες εμφανίζονται από χαμηλού ιξώδους υγρά μέχρι υψηλού σημείου τήξεως στερεά. Οι στερεές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση τριβής και πολύ καλή χημική αντίσταση. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες διακρίνονται σε σχέση με τις υγρές για την υψηλή τους μηχανική αντοχή, την εύκολη επεξεργασία τους, το άριστο κολλώδες τους και την υψηλή χημική αντίσταση.

1.2.2 Ιδιότητες υγρών εποξειδικών ρητινών

Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να αλλάζουν ανάλογα με το σκοπό που προορίζεται το υλικό να επιτελέσει. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάμιξής τους με κάποιο υλικό. Το χαρακτηριστικό αυτό δικαιολογεί την εφαρμογή των εποξειδικών ρητινών σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Οι ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών παρουσιάζονται παρακάτω και είναι:

- Καλή αντοχή στην επίδραση διαλυμάτων οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών και χαμηλή υγροσκοπικότητα. Η κατεργασία τους είναι εύκολή εξαιτίας του χαμηλού ιξώδους
- Υψηλή δύναμη συγκόλλησης. Η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη στη σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών και είναι από τις πιο σημαντικές που έχουν παρατηρηθεί.
- Άριστη ηλεκτρική μόνωση εξαιτίας της απουσίας φορέων ηλεκτρισμού.
- Υψηλές μηχανικές ιδιότητες.
- Εύκολη επεξεργασία των ρητινών στο θερμοκρασιακό φάσμα μεταξύ των 5°C και 150°C. Ο βαθμός της οποίας εξαρτάται από το πρόσθετο υλικό που έχει επιλεγεί.
- Μικρή συστολή κατά το πολυμερισμό στη διάρκεια της επεξεργασίας τους. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική για τις εποξειδικές ρητίνες.
- Εξασφαλίζουν την πρόσφυση σε ξηρές και υγρές επιφάνειες. Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να σταθεροποιηθούν ακόμη και κάτω από την επιφάνεια του ύδατος. Η πρόσφυση εξασφαλίζεται πάνω σε γνωστά δομικά υλικά, όπως στο σκυρόδεμα, σε μέταλλα, σε μάρμαρο, σε πέτρα και ξύλο.
- Καλή χημική αντίσταση που εξαρτάται άμεσα από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Οι περισσότερες ρητίνες έχουν υψηλή αντίσταση στα καυστικά και στα οξέα.
- Συνδυάζουν υψηλή αντοχή, με μειωμένο όγκο κατά την σκλήρυνση. Παρουσιάζουν μικρή διάβρωση και αντοχή στο θρυμματισμό, οπότε καθίστανται κατάλληλες για χρήση σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή δομικό χάλυβα.
- Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος τεχνολογικών εφαρμογών με πολύ καλά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών είναι:

- Στην κατασκευή κτηρίων, αυτοκινητοδρόμων, και σε όσες κατασκευές απαιτούν υψηλή χημική αντίσταση.
- Στην κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων και πλοίων βασικό συγκολλητικό υλικό είναι οι εποξειδικές ρητίνες για τα δομικά μέρη της ατράκτου λόγω της υψηλής στεγανότητας.
- Στην κατασκευή τριχών για πινέλα.
- Στην κατασκευή τελειωμάτων αεροσκαφών και πυραύλων ως φυλλώδεις ρητίνες (laminated retins).

- Στη συντήρηση και την κατασκευή των τελειωμάτων θαλάσσιας υφής, τελειώματα λιθοδομής και τελειώματα αεροσκαφών, ή για επαλείψεις κατασκευαστικού χάλυβα, δεξαμενών, πτυσσόμενων αγωγών και πλακών σκυροδέματος, ως διαλύματα επίστρωσης με βασικό συστατικό τη ρητίνη.
- Σε ηλεκτρικά εξαρτήματα ως μέσα συγκόλλησης, επικάλυψης, ή ενσωμάτωσης..
- Στην κατασκευή ανθεκτικών σε χημικά αντλιών και σωλήνων, εργαλείων, μητρών καθώς και ηλεκτρομαγνητικών μονωτικών υλικών χρησιμοποιούνται χυτές εποξυ-ρητίνες.
- Για επαλείψεις επιφανειών υγρών και στερεών χρησιμοποιούνται ρητίνες δυο συστατικών (wetcome). Η ξηρή μεμβράνη που σχηματίζουν έχει πυρανασχετικές ιδιότητες και έτσι δεν επιτρέπουν την εξάπλωση της φωτιάς.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής για τις εποξυ-ρητίνες:

- Προορίζονται για υγρομόνωση,
- Εφαρμόζονται για προστασία και διακόσμηση δαπέδων, τοίχων και ορόφων σε οικοδομικούς,
 βιομηχανικούς, αγροτικούς κ.α. χώρους.
- Εφαρμόζονται σε διάφορες επιφάνειες όπως στο σκυρόδεμα, το τσιμεντοκονίαμα, την πέτρα κ.α.
- Συνδέουν συνήθως το παλιό και το νέο σκυρόδεμα σε υγρούς χώρους.
- Προστατεύουν τα κτίρια από τη διάβρωση και διείσδυση της υγρασίας.

1.3 Πολυμερή υλικά

1.3.1 Περιγραφή του πολυμερούς

Το μόριο ενός πολυμερούς είναι ένα μόριο μεγάλου μεγέθους (μακρομόριο) που αποτελείται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες. Οι δομικές αυτές μονάδες είναι απλά χημικά παράγωγα τα οποία προέρχονται από τα αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά με άνοιγμα διπλού δεσμού. Τα πολυμερή θεωρούνται σύνθετα υλικά γιατί αποτελούνται από δομικές μονάδες προερχόμενες από τα αντίστοιχα μονομερή ή αρχικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες από το τελικό σύνθετο στοιχείο.

1.3.2 Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή

Τα πολυμερή υλικά είναι χρήσιμα γιατί μπορούν να ενσωματώσουν διάφορα πρόσθετα υλικά με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια μεγάλη ποικιλία σύνθετων υλικών με διάφορες ιδιότητες. Αυτή η ιδιότητά τους έγινε αντιληπτή από τα πρώτα στάδια ανάπτυξή τους.

Ως πρόσθετα υλικά θεωρούνται εκείνα τα υλικά που διαχέονται μέσα στο πολυμερές χωρίς να προκαλούν σημαντική αλλαγή στη δομή του. Σε αυτή τη κατηγορία υλικών δεν μπορούν να συμπεριληφθούν τα μέσα σκλήρυνσης και οι καταλύτες διότι επεμβαίνουν άμεσα στη δομή του πολυμερούς. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται.

Παρατίθεται μια ταξινόμηση των πρόσθετων υλικών ανάλογα τη λειτουργία τους.

- Πρόσθετα που τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητες:
 - 1. Πλαστικοποιητές
 - 2. Εγκλείσματα
 - 3. Μέσα δυσκαμψίας
- Πρόσθετα που μειώνουν το κόστος:
 - 1. Διαλύτες
 - 2. Κοκκώδη εγκλείσματα
- Πρόσθετα που βοηθούν στην παραγωγική διαδικασία:
 - 1. Σταθεροποιητές
 - 2. Λιπαντικά
 - 3. Θιξοτροπικά
- Πρόσθετα που τροποποιούν τις ιδιότητες επιφάνειας
 - 1. Τροποποιητές οπτικών ιδιοτήτων
 - 2. Μέσα πρόληψης γύρανσης

1.3.3 Τεχνολογικές προδιαγραφές για τα πρόσθετα υλικά

Σχετικά με τα πρόσθετα υλικά παρουσιάζονται οι κάτωθι τεχνολογικές προδιαγραφές:

α) ικανότητα ανάμειξης και κινητικότητα των πρόσθετων υλικών

Το πρόσθετο υλικό πρέπει να ενσωματώνεται ικανοποιητικά στη μήτρα του πολυμερούς. Η ανάμειξη, η κινητικότητα, και η διάχυση των μορίων του πρόσθετου μέσα στη μήτρα πρέπει να είναι πλήρης ακόμη και όταν η σύνθεση δε διενεργείται σε μοριακό επίπεδο. Αντίθετα, όταν ασκείται ισχυρή έλξη μέσα στη μήτρα μεταξύ του πολυμερούς και του πρόσθετου η ανάμιξη είναι μερική.

β) Τοξικότητα των πρόσθετων υλικών

Το πρόσθετο υλικό που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της ανάμειξης δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να αποτελεί κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου τόσο κατά την διαδικασία της ανάμειξης του, όσο και ύστερα από τη διαδικασία παραγωγής ως τελικό προϊόν που θα χρησιμοποιηθεί από το καταναλωτικό κοινό. Πρέπει να επιδεικνύεται η δέουσα προσοχή σε περίπτωση που το πολυμερές πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη συσκευασία τροφίμων ή τη κατασκευή παιχνιδιών.

γ) Μετανάστευση και κατανάλωση των πρόσθετων υλικών.

Το πρόσθετο υλικό πρέπει να έχει σε μεγάλες θερμοκρασίες χαμηλή τάση ατμών και δεν πρέπει να υφίσταται καθίζηση ή κρυσταλλοποίηση έξω από τη μήτρα του πολυμερούς. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα διότι κατά τη διάρκεια της διεργασίας το πρόσθετο δεν πρέπει να εξαερώνεται, ούτε να εκρέει στην επιφάνεια της μήτρας, ή να εκχειλίζεται από υγρά με τα οποία μπορεί να έρθει σε επαφή το πολυμερές.

1.3.4 Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή

α) Το πολυμερές είναι αναμείξιμο με το πρόσθετο

Το σύστημα που προκύπτει σε αυτή τη περίπτωση είναι μονοφασικό και οι αλυσίδες του πολυμερούς περιβάλλονται από τα μόρια του πρόσθετου [2]. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλαστικοποιητές.

β) Το πολυμερές είναι μη αναμίξιμο με το πρόσθετο.

Το σύστημα τώρα είναι διφασικό και τα μίγματα που προκύπτουν καλούνται σύνθετα υλικά. Τα εγκλείσματα είναι πάντα πιο σκληρά από τη μήτρα και οι ιδιότητες του συστήματος συνταιριάζουν τις ιδιότητες των δύο συστατικών. Τα εγκλείσματα τις περισσότερες φορές είναι μεταλλικής φύσεως. Υπάρχει μια σειρά από παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται η ενσωμάτωση των πρόσθετων υλικών στη μήτρα του υλικού, οι οποίες είναι:

1. Από τη φυσική μορφή και τη συγκέντρωση του πρόσθετου.

2. Από τη φυσική μορφή του συστήματος που πρόκειται να παραχθεί.

3. Από το βαθμό διαλυτότητας ή διασποράς του προσθέτου στο τελικό μίγμα

Σελίδα 5 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

4. Από τη φυσική μορφή και τα χαρακτηριστικά τήξης του πολυμερούς.

1.3.5 Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες.

Ο όρος πλαστικοποιητής στην τεχνολογία των εποξειδικών ρητινών περιγράφει ένα συστατικό μοριακού βάρους που αντιδρά με τη ρητίνη στη διαδικασία της σκλήρυνσης Στα πλαίσια αυτής αυξάνει την απόσταση μεταξύ των σημείων διασταύρωσης και προκαλεί ευκαμψία. Το συστατικό αυτό είναι αδρανές μεγάλου μοριακού βάρους που προστίθεται στη ρητίνη για να προκαλέσει μηχανική πλαστικοποίηση.

Οι πλαστικοποιητές προστίθενται στις εποξειδικές ρητίνες για να μειωθεί η επίπτωση του εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Με τη προσθήκη του αυξάνεται, ακόμη, η δυνατότητα παραμόρφωσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται πολλά υλικά. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πλαστικοποιημένων υλικών είναι οι υποβαθμισμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, η μικρή αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια, ιδιαίτερα σε διαλύτες, καθώς και σε μεγάλες θερμοκρασίες.

<u>1.4 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ-ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ ΣΤΙΣ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ</u>

<u>1.4.1 Ιστορική Αναδρομή</u>

Με το πέρασμα των αιώνων, η σταδιακή εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την ανάδυση νέων αναγκών οδήγησε στην ανάγκη δημιουργίας νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Ιδιαίτερα, όμως, κατά τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια εκρηκτική αύξηση δημιουργίας νέων υλικών που οφείλεται, κυρίως, στην εξέλιξη της επιστήμης των πολυμερών. Κατά το διάστημα αυτό, έχουν κάνει την εμφάνισή τους υλικά με ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες.

Η ύπαρξη των υλικών αυτών δεν είναι όμως, αποκλειστικό επίτευγμα των τελευταίων δεκαετιών. Είναι φανερό ότι ο άνθρωπος γνώριζε από νωρίτερα ότι μπορεί να συνδυάζει δύο ή περισσότερα υλικά για να επιτύχει τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές, κατά τα παλαιότερα χρόνια, έβρισκαν εφαρμογές κυρίως στο χώρο των κατασκευών, της ναυσιπλοΐας, της κατασκευής όπλων και της γραφικής ύλης. Αναζητώντας την ιστορία των σύνθετων υλικών, αντιπαραβάλλεται, ουσιαστικά, η ταυτόχρονη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού.

Στους προϊστορικούς και τους πρώτους ιστορικούς χρόνους, όπου τα σπίτια ήταν φτιαγμένα από λάσπη και άχυρο, η κατασκευή και η χρήση των συνθέτων υλικών βασιζόταν σε εμπειρικούς κανόνες και σε μια στοιχειώδη τεχνογνωσία, ακόμη και μέχρι τον 19° αιώνα μ. Χ.. Στην Αρχαία Αίγυπτο, οι Ισραηλίτες πρόσθεταν άχυρα στα τούβλα για τη βελτίωση της δομικής τους συμπεριφοράς (Εξοδος). Στην Μεσοποταμία, λύθηκε το πρόβλημα της επικάλυψης των τούβλινων τοίχων, περί το 2500 π.Χ. με την ενσωμάτωση πέτρας ή κώνων από πηλό σε κρίσιμα σημεία του τοιχίου, ενώ ταυτόχρονα τα διακοσμούσαν. Στην ίδια περιοχή εφαρμόσθηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων γύρω στο 1000 πχ, με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους εφαρμόσθηκε η ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Στον 20ο αιώνα, ο συνδυασμός μεταλλικών ράβδων, τσιμέντου και αδρανών οδήγησε στο σχεδιασμό του οπλισμένου σκυροδέματος.

Σελίδα 6 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Στη Βίβλο αναφέρεται η χρήση συνθέτων από τους Βαβυλωνίους από το 4000 π.Χ., ενώ στην Αίγυπτο κατασκευαζόταν ο πρόδρομος των σημερινών πλαστικών σκαφών από καλάμια εμβαπτισμένα σε πίσσα από το 3000 π.Χ. Αντίστοιχα οι Ασσύριοι χρησιμοποίησαν σανίδες εμβαπτισμένες σε αδιάβροχη άσφαλτο για να κατασκευάσουν βάρκες το 1000 π.Χ.. Αυτές οι βάρκες γνωστές με το όνομα **gufas**, χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στην Αίγυπτο. Περίπου 500 χρόνια αργότερα οι ελληνικές τριήρεις, όντας πολύ μεγαλύτερες από τις απλές ξύλινες βάρκες, απαιτούσαν τη χρήση συνδυασμού υλικών για να κατασκευασθούν.

Εκτός από τη ναυσιπλοΐα, υπάρχουν πολλές αναφορές στην κατασκευή όπλων με το συνδυασμό δύο ή περισσοτέρων υλικών. Περί το 1000 πχ, κατασκευάσθηκε ένα σύνθετο τόζο στη Δυτική Ασία και στην Κίνα με αλλεπάλληλες στρώσεις κεράτου (Εικόνα 1.1). Είχε σχεδιασθεί να είναι μικρού μεγέθους και συγχρόνως ισχυρό, έτσι ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιείται από τον αναβάτη ενός άρματος. Η περίοδος άνθισης και επιβολής των Μογγόλων στους γειτονικούς λαούς συνδυάσθηκε με την κατασκευή ενός είδους τόξου που περιείχε μεγαλύτερη ποικιλία υλικών από αυτό των Κινέζων. Ήταν ιδιαίτερα ευλύγιστο και ελαφρύ καθιστώντας το έτσι πολύτιμο όπλο στα χέρια των ιππέων τους. Το τόξο αυτό ήταν κατασκευασμένο από ένα είδος κεράτου συνδεδεμένο με διάφορες στρώσεις από τένοντες ζώων. Οι Ιάπωνες πολεμιστές, Σαμουράι, χρησιμοποιούσαν, επίσης, πολυστρωματικά μέταλλα για να προσδώσουν στα σπαθιά τους τις επιθυμητές ιδιότητες (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 Πολύστρωτο τόξο – Τομή Ιαπωνικού σπαθιού

Στην αρχαία Ελλάδα χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες σύνθετες κατασκευές για όπλα, όπως *οι ασπίδες*. Το σώμα της ασπίδας κατασκευαζόταν από κλαδιά ιτιάς, τα οποία πεπλεγμένα, από στρώματα δερμάτων βοδιών στερεώνονταν μέσω μιας μεταλλική ταινία. Αργότερα κατασκευάζονταν ολόκληρες από μεταλλικά φύλλα, οι οποίες συνδύαζαν την υψηλή δυσκαμψία σχήματος με την πολύ υψηλή αντοχή σε διάτρηση από τα εχθρικά δόρατα και βέλη. Ο Όμηρος στην Ιλιάδα περιγράφει την ασπίδα του Αχιλλέα, αναφέροντας ότι την αποτελούσαν επτά εναλλασσόμενες στρώσεις από δέρμα-χρυσό και σίδηρο. Η ασπίδα των αρχαίων μπορεί να συγκριθεί μόνο με τους σημερινούς προηγμένους θώρακες των σημερινών αρμάτων μάχης και τα αλεξίσφαιρα γιλέκα. Η δομή των κατασκευών αυτών είναι πολύστρωτη από διαφορετικά υλικά, όπως υφάσματα ινών αραμιδίου και πολυεστερικών φιλμ στα αλεξίσφαιρα γιλέκα και συνδυασμός

Σελίδα 7 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

χάλυβα – χαλκού – κεραμικών για τα άρματα . Τέλος, στις *πανοπλίες* και *τα ξίφη* του Μεσαίωνα γινόταν χρήση της ίδιας τεχνικής.

Από τις πιο ενδιαφέρουσες ιστορίες ανάπτυξης είναι ενός άλλου φυσικού σύνθετου υλικού, του χαρτιού. Ο πάπυρος αποτέλεσε την πρώτη βασική γραφική ύλη στην αρχαιότητα. Η χρήση του διήρκεσε μέχρι το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Το ομώνυμο υδρόφοβο φυτό, αφθονούσε στις όχθες του Νείλου αλλά και στις αρχαίες Συρακούσες. Οι κατασκευαστές χώριζαν το παχύ τριγωνικό του στέλεχος σε φύλλα τα οποία αποτελούσαν τους κυλίνδρους του παπύρου. Έπειτα εφάρμοζαν αυτές τις λωρίδες σταυροειδώς, τις κολλούσαν και τις χτυπούσαν μ' ένα ξύλινο σφυράκι ώστε να δημιουργηθεί μια επιφάνεια όσο το δυνατόν πιο ενιαία. Μ' ένα ελαφρό κολλάρισμα μπορούσε κανείς να γράψει στον πάπυρο, ο οποίος πρέπει να σημειωθεί ότι είχε μεγάλη αντοχή και διάρκεια.

Στην συνέχεια ήρθε στο προσκήνιο η περγαμηνή. Η πρώτη χρήση της ως γραφική ύλη πραγματοποιήθηκε το 197 π.Χ. στην Πέργαμο της Μικράς Ασίας, από όπου πήρε και το όνομά της. Η διαδικασία κατασκευής της περιελάμβανε την κατεργασία δέρματος ώστε να γίνει πολύ λεπτό σαν φύλλο χαρτιού. Λόγω της δύσκολης μεθόδου, αλλά και του κόστους κατασκευής της προέκυψε η ανάγκη χρήσης μιας νέας γραφικής ύλης. Οπότε γύρω στον 8ο αιώνα έγιναν οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής χαρτιού. Σε αντίθεση με τους Ευρωπαίους, οι Κινέζοι είχαν ανακαλύψει αυτό το υλικό σχεδόν 11 αιώνες πριν. Ξεκίνησαν με χειροποίητη κατεργασία ινών μπαμπού και στη συνέχεια με τη συγκόλλησή τους σε φύλλα. Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της τεχνογνωσίας τους ήταν να τις εμβαπτίζουν σε μια πολτοποιημένη ''ζύμη''. Πειραματίστηκαν ακόμη και με ίνες άλλων φυτών, άχυρα, ξύλα κ.λ.π.

Αργότερα οι Άραβες άλλαξαν την πρώτη ύλη και χρησιμοποίησαν αντί των φλοιών των δέντρων, υφαντά από λινάρι και κάνναβη προμηνύοντας έτσι τον ερχομό του σύγχρονού χαρτιού. Τον 12ο αιώνα η επινόηση του χαρτιού περνάει στους Ιταλούς και μόλις στα τέλη του 15ου αιώνα όλες οι ευρωπαϊκές πόλεις προμηθεύονται με σχετική ευκολία το χαρτί.

Τα σύνθετα υλικά του 19ου αιώνα δεν διαφέρουν πολύ από αυτά των Αρχαίων Αιγυπτίων ή των Αρχαίων Ελλήνων ούτε σε ποιότητα ούτε σε τεχνική κατασκευής. Η έκρηξη παραγωγής των σύνθετων υλικών σημειώνεται τον 20° αιώνα και ιδιαίτερα κατά τα τελευταία 50 χρόνια με την παράλληλη εξέλιξη των πολυμερών.

Η εμφάνιση των πολυμερικών υλικών είχε ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μετάλλων σε πολλές κατασκευές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά τους ως υλικά, στην επάρκειά τους και στο χαμηλό κόστος τους. Στις αρχές του 20ου αιώνα η χημεία έπαιξε έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην ανάπτυξη των πολυμερικών υλικών. Η επιστήμη δημιούργησε μια νέα, την επιστήμη των πολυμερών, η οποία στη συνέχεια αναπτύχθηκε τόσο από τους ακαδημαϊκούς όσο και από τους βιομηχανικούς ερευνητές.

Στην Ευρώπη πραγματοποιήθηκαν αρκετές μελέτες στη σύνθεση των πολυμερών. Προηγμένα σύνθετα υλικά άρχισαν να κατασκευάζονται μαζικά το 1935 με τη χρήση ινών υαλοβάμβακα ως ενισχυτικό πληρωτικό μέσο σε πλαστικά υλικά. Αυτά τα πρώιμα πλαστικά είχαν την πρώτη τους εφαρμογή σε πολεμικές επιχειρήσεις. Η ιστορία των πολυμερικών σύνθετων υλικών ξεκινάει με την παραγωγή της εποξειδικής ρητίνης το 1939. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 ενισχύοντάς τα με ίνες γυαλιού κατασκευάσθηκαν τα πρώτα διαφανή πλαστικά. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογής είναι η κατασκευή πλαστικών επικαλύψεων (καρίνα) στα σκάφη για

Σελίδα 8 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

σκελετούς αυτοκινήτων και καμπίνες φορτηγών.

Το 1963 κατόπιν καταλλήλων βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στις ίνες άνθρακα, οδήγησαν στη χρήση αυτών σε ειδικές εφαρμογές, όπου το κόστος δεν αποτελούσε αποτρεπτικό παράγοντα, όπως στο σχεδιασμό αεροσκαφών και την παραγωγή αθλητικών ειδών. Στην τελευταία δεκαετία του 20ου αιώνα, οι αραμιδικές ίνες, οι ίνες άνθρακα καθώς και άλλα υλικά ενισχύουν τα υλικά μήτρας, αφού επιδεικνύουν εξαιρετικά υψηλά μέτρα ελαστικότητας. Μετά τις εξελίξεις αυτές, η εφαρμογή των Σύνθετων Υλικών επεκτάθηκε σχεδόν σε όλους τους τομείς της σύγχρονης ζωής.

Παρακάτω παραθέτεται με τη μορφή Πίνακα η συνοπτική ιστορική ανασκόπηση των σύνθετων υλικών:

Ημερομηνία (περίπου)	Υλικά
5000 π.Χ.	Πάπυρος/πίσσα (βάρκες)
1500 π.Χ.	Ξύλινα επιστρώματα
1909 µ.X	Φαινολικό σύνθετο
1928 µ.X	Σύνθετο ουρίας φορμαλδεΰδης
1938 µ.X	Σύνθετο μελαμίνης φορμαλδεΰδης
1942 μ.X	Πολυεστέρας ενισχυμένος με γυαλί
1946 µ.X	Σύνθετα εποξειδικών ρητινών
	Νάυλον ενισχυμένο με γυαλί
1951 µ.X	Πολυστυρένιο ενισχυμένο με γυαλί
1956 µ.X	Σύνθετα φαινόλης αμιάντου
1964 µ.X	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 µ.X	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 µ.X	Υβριδικά συστήματα ινών άνθρακα, γυαλιού
1972 μ.X	Πολυμερή ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες
1975 μ.X	Υβριδικά συστήματα αραμιδικών ινών και ινών Άνθρακα

Πίνακας 1.1: Ιστορική ανάπτυξη των σύνθετων [1]

T

<u>1.4.2 Γενικοί-Ορισμοί</u>

Τα πολυμερή και οι ρητίνες με εγκλείσματα ανήκουν στη κατηγορία των σύνθετων υλικών. Ως σύνθετο υλικό ονομάζεται εκείνο το υλικό το οποίο εξεταζόμενο μακροσκοπικά σχηματίζεται από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών και έχει ιδιότητες διαφορετικές από τα αρχικά υλικά που το δημιούργησαν. Στη πλειονότητα των περιπτώσεων τα υλικά αυτά παρουσιάζουν

Σελίδα 9 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

βελτιωμένες ιδιότητες από τις επιμέρους των υλικών που το αποτελούν ή και εντελώς διαφορετικές από αυτά. Τα διάφορα υλικά του συνθέτου αντιδρούν μεταξύ τους χημικά και ως εκ τούτου δημιουργείται μια νέα φάση.

Με τον όρο «φάση» νοείται κάθε ομογενές τμήμα του σύνθετου υλικού. Η περιοχή μεταξύ των ορίων των φάσεων που εμφανίζει διαφορετικές φυσικές ιδιότητες από τα αρχικά υλικά ονομάζεται «ενδιάμεση φάση». Τα σύνθετα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από μια συνεχή μήτρα με μια ή περισσότερες διάχυτες φάσεις (τα εγκλείσματα). Το απλούστερο σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο υλικά από τα οποία το ένα είναι η μήτρα (matrix) και το δεύτερο το έγκλεισμα (filler).

1.4.3 Παράμετροι που ορίζουν ένα σύνθετο υλικό

Ένα σύνθετο υλικό για να μπορέσουμε να το περιγράψουμε πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Τη συγκέντρωση και την κατανομή συγκέντρωσης των σωματιδίων
- Το σχήμα των σωματιδίων
- Το προσανατολισμό των σωματιδίων
- Το μέγεθος και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων
- Την τοπολογία των σωματιδίων

Οι περιεκτικότητες των αρχικών υλικών σ' ένα σύνθετο υλικό επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν για την περιγραφή ενός σύνθετου υλικού με μια ή περισσότερες διάχυτες μέσα σε μια συνεχή είναι:

- α) Το είδος των υλικών των διάχυτων φάσεων (εγκλεισμάτων)
- β) Το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται ως μήτρα
- γ) Η γεωμετρία της διάχυσης φάσης

1.4.4 Κατάταξη και ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά μπορούμε να τα ταξινομήσουμε είτε με βάση τη φύση της μήτρας είτε με βάση των συστατικών πρόσμειξής των εγκλεισμάτων ως εξής:

- 1. Ως προς τη φύση της μήτρας
- Σύνθετα με πλαστική μήτρα
- Σύνθετα με μεταλλική μήτρα
- Σύνθετα με κεραμική μήτρα
- 2. Ως προς τη μορφή του εγκλείσματος
- Έγκλεισμα με μορφή κόκκων
- Έγκλεισμα με μορφή φύλλων
- Έγκλεισμα σε μορφή ινών

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 10 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

1.5 Διάκριση και χαρακτηριστικά των φάσεων στα υλικά

<u>1.5.1 Κύρια φάση</u>

Ως κύρια φάση του σύνθετου υλικού, ορίζεται αυτή που βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% της περιεκτικότητας του συνόλου του συνθέτου. Τα σύνθετα υλικά τα οποία η μήτρα τους είναι πλαστική, διακρίνονται σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες της μήτρας σε:

1. <u>Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (Thermoseting)</u>

Τα υλικά αυτά είναι προϊόντα ατελούς πολυμερισμού και για το λόγο αυτό όταν θερμαίνονται στην αρχή γίνονται μαλακά και στη συνέχεια με την αύξηση της θερμοκρασίας σκληραίνουν οριστικά καθώς ο πολυμερισμός τους γίνεται πλήρης.

Οι χημικές αντιδράσεις που είναι υπεύθυνες για τις ιδιότητες των πολυμερών καθοδηγούν τη δημιουργία πολυμερών μακρομορίων. Οι καταλύτες είναι πολύ σημαντικοί διότι διευκολύνουν αυτές τις χημικές αντιδράσεις. Μερικά θερμοσκληρυνόμενα υλικά που είναι πολύ σημαντικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία είναι οι πολυεστερικές ρητίνες, οι ρητίνες φαινόλης – φορμαλδεΰδης, μελαμίνης, ρητίνες σιλικόνης και οι εποξειδικές ρητίνες.

2. <u>Ελαστομερή (Elastomers)</u>

Τα ελαστομερή είναι τα υλικά εκείνα τα οποία όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία δωματίου και υποστούν εφελκυσμό τότε διπλασιάζουν το αρχικό του μήκος, ενώ μετά την απομάκρυνση της τάσης επανέρχεται σχεδόν απότομα στις αρχικές διαστάσεις. Στα ελαστομερή υλικά τα μακρομόρια βρίσκονται με τη μορφή ίνας συσπειρωμένης κατά τρόπο τυχαίο που ξεδιπλώνεται κατά την έκτασή της. Με την άρση της έντασης το μόριο επανέρχεται στην αρχική του μορφή. Τα ελαστομερή ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών προσθήκης και συνήθως χρησιμοποιούνται σαν εγκλείσματα σε υλικά από πυριτικά άλατα, άργιλο, άνθρακα, ίνες γυαλιού, τάλκ κ.α.

Θερμοπλαστικά

Τα θερμοπλαστικά ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών συμπύκνωσης που λαμβάνονται από την αντίδραση δύο μορίων με δυο χαρακτηριστικές ομάδες από μονομερή με ένα διπλό δεσμό. Τα υλικά αυτά όταν θερμανθούν και φτάσουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης γίνονται διαλυτά σε ορισμένους διαλύτες και μαλακώνουν. Στη περίπτωση όμως που ξεπεράσουν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης και στη συνέχεια ψυχθούν τότε επανακτούν την αντοχή τους. Στις υψηλές θερμοκρασίες οι δεσμοί όμως σπάνε με αποτέλεσμα το πολυμερές να αποσυντίθεται.

Τα υλικά αυτά καλύπτουν μεγάλο αριθμό προϊόντων και χρησιμοποιούνται σαν μέσα ενίσχυσης διότι από μόνα τους εμφανίζουν μεγάλο συντελεστή διαστολής και πτωχές μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε σκληρότητα, ερπυσμό, εφελκυσμό και κρούση.

1.5.2 Διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση

Η διάχυτη ή δευτερεύουσα φάση μπορεί να διακριθεί ως εξής:

α) Δευτερεύουσα συνεχής φάση:

Το γυαλί αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό και συνηθισμένο αντιπρόσωπο αυτής της κατηγορίας υλικών. Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε αυτή τη δευτερεύουσα φάση πρέπει να συνενώσουμε πολλά φύλλα μαζί με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ελάσματος, στο οποίο θα προστεθεί ρητίνη και με την επίδραση θερμότητας και πίεσης θα στερεοποιηθούν σε μια ενιαία μάζα. Άλλα υλικά που χαρακτηρίζουν τη φάση ως συνεχή λόγω της μορφολογίας τους είναι το Rayon και το πολυακριλονιτρίλιο. Ένας άλλος συνδυασμός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μια σειρά λεπτών φύλλων από μέταλλά με τη παρακάτω αλληλουχία χαλκός, αλουμίνιο και νικέλιο σε συνδυασμό με εποξειδικές ρητίνες ή πολυεστέρες.

β) Δευτερεύουσα διασπαρμένη φάση:

Το κοινό χαρακτηριστικό για τη ποικιλία των υλικών που μπορεί να χαρακτηρισθεί ως διασπαρμένη φάση είναι το παρεμφερές μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων των υλικών και δεν πρέπει να ξεπερνά το 1μm. Τα υλικά αυτά προστίθενται στο πολυμερές για την τροποποίηση των ιδιοτήτων με παράλληλη επιδίωξη τη μείωση του κόστους του σύνθετου. Τα υλικά αυτά συνήθως είναι στερεά και χημικά αδρανή για να μην αντιδρούν με το πολυμερές.

Η ταξινόμηση των εγκλεισμάτων σε συνάρτηση κάποιων παραμέτρων και τις αντίστοιχες ιδιότητές τους είναι απαραίτητο να γίνουν λόγω της μεγάλης ποικιλίας τους. Οι παράμετροι αυτοί είναι η χημική τους σύνθεση (π.χ ανθρακικό ασβέστιο), η προέλευσή τους (π.χ ορυκτό σύνθετο), η φυσική τους μορφή (π.χ ίνα, σφαίρα, ράβδος και δισκίο) και η λειτουργία τους (π.χ ενίσχυση και κόστος). Ο πιο απλός τρόπος ταξινόμησης των εγκλεισμάτων είναι σε οργανικά και ανόργανα και στη συνέχεια σε ινώδη και μη ινώδη. Μπορούν επίσης, να ταξινομηθούν ανάλογα με το μέγεθός τους, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, την πυκνότητά τους κ.α.

Υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα εγκλείσματα για να μπορέσουν να ενσωματωθούν σε ένα πολυμερές, αυτές είναι:

- Χαμηλό κόστος και εύκολη διαθεσιμότητα
- Χαμηλή διαλυτότητα στο νερό όπως και σε άλλους διαλύτες
- Ιδανικό ειδικό βάρος
- Μέγιστη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων
- Ικανοποιητική αντοχή
- Μικρή απορρόφηση υγρασίας
- Ικανότητα διαβρέξεως
- Απουσία χημικών τοξικών ουσιών
- Θερμική αντοχή
- Απουσία οσμών
- Μη αναφλεξιμότητα
- Επιθυμητό χρώμα

1.6 Επίδραση των εγκλεισμάτων στις ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών

<u>1.6.1 Γενική περιγραφή</u>

Τα εγκλείσματα που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν πολύ μικρές διαστάσεις και μορφή σκόνης με μέση διάμετρο 0,015mm. Τα εγκλείσματα είναι ανόργανα υλικά και χρησιμοποιούνται εσωτερικά της μήτρας των εποξειδικών ρητινών. Η αύξηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας του εγκλείσματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους δηλαδή η ρητίνη μετατρέπεται από υγρό σε μια πιο στερεή μορφή.

Τα εγκλείσματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα σύνθετα υλικά με αποτέλεσμα να επηρεάζουν αρκετές φυσικές ιδιότητές τους. Τα εγκλείσματα ρυθμίζουν το ιξώδες των ρητινών, ελαττώνουν το ποσοστό συστολής και το συντελεστή θερμικής διαστολής, ενώ ταυτόχρονα δίνουν χρώμα στο σύνθετο. Τα εγκλείσματα πρέπει να είναι από χημικής απόψεως ουδέτερα ή ελαφρά βασικά και να μην αντιδρούν με τη ρητίνη ή το μέσο σκλήρυνσης. Η πιο σημαντική όμως ιδιότητα των εγκλεισμάτων είναι ότι ελαττώνουν το κόστος του συνθέτου και παράλληλα βελτιώνουν τις φυσικές του ιδιότητες.

Για καλύτερα αποτελέσματα έτσι ώστε τα εγκλείσματα να εφαρμόζουν καλύτερα στη μήτρα πρέπει τα εγκλείσματα να θερμαίνονται για την απομάκρυνση της υγρασίας και του αέρα, που τυχόν απορροφήθηκε, και μετά να ενσωματώνονται με καλύτερη εφαρμογή. Τέλος είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση κάποιου μηχανήματος ανάδευσης για την καλύτερη ανάμειξή του.

<u>1.6.2 Ιδιότητες</u>

Συμπεριφορά στον εφελκυσμό

Η ύπαρξη εγκλεισμάτων στις ρητίνες έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας τους ενώ η παραμόρφωση θραύσης ελαττώνεται και η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη με την περιεκτικότητά της σε έγκλεισμα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν μόνο για μετρήσεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Συστολή

Η συστολή κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης της ρητίνης ελαττώνεται ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα του σύνθετου υλικού. Αυτό οφείλεται εξαιτίας του ότι η ρητίνη αντικαθίσταται τοπικά από υλικό που δεν εμφανίζει μεταβολή στις διαστάσεις του, σε αντίθεση με τη καθαρή ρητίνη.

Αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια και σε διάβρωση

Μερικά εγκλείσματα όπως π.χ το ανθρακικό ασβέστιο μειώνουν την αντοχή των ρητινών σε οξέα ενώ αλλά όπως το αλουμίνιο μειώνουν την αντοχή αυτή σε υγρασία, τα εγκλείσματα γενικά μειώνουν την ταχύτητα διάχυσης του νερού στα σύνθετα υλικά. Τα εγκλείσματα επίσης συμμετέχουν στην διάβρωση των πολυμερών στην επαφή τους με μέταλλα.

Εξαιτίας των ιόντων που υπάρχουν στη στερεοποιημένη μήτρα μπορούν να μεταφέρουν γαλβανικά ρεύματα και να ενισχύσουν την διάβρωση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της

αγωγιμότητας του συνθέτου υλικού, λόγω της ικανότητας των εγκλεισμάτων να απελευθερώνουν ιόντα.

1.7 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα είναι τα υλικά με το πιο ευρύ πεδίο εφαρμογών χάρη στην ευκολία προσαρμογής τους σε διαφορετικές καταστάσεις και στην ικανότητα τους να συνδυάζονται εύκολα με άλλα υλικά, προκειμένου να παράγουν τις επιθυμητές εκείνες ιδιότητες για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων εφαρμογών.

Σε αυτό το κεφάλαιο στόχος είναι να παρουσιασθούν μερικές από τις εφαρμογές των συνθέτων υλικών, ώστε να γίνουν εμφανείς οι λόγοι για τους οποίους προτιμώνται έναντι των συμβατικών υλικών, καθώς επίσης και οι παράγοντες που εμπλέκονται στη διαμόρφωση της εμπορικής τους αξίας και χρήσης. Επίσης, με τα παραδείγματα εφαρμογών που παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο καλύπτεται ένα ικανοποιητικό εύρος διαφορετικών τύπων συνθέτων υλικών, μηχανικής πολυπλοκότητας, διαδικασιών παραγωγής και μεγεθών αγοράς. Παρ' όλα αυτά θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος των συνθέτων υλικών που παράγονται και χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία αποτελούν κυρίως ινώδη σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε ένα πολύ ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. Πρωταρχικό πεδίο εφαρμογής τους ήταν η αεροναυπηγική. Ο τομέας αυτός απαιτεί την καλύτερη ποιότητα και απόδοση υλικών με αναγκαία προϋπόθεση την μείωση του βάρους. Πολύ σύντομα οι ευνοϊκές ιδιότητες των συνθέτων έγιναν αντιληπτές και από άλλα πεδία εφαρμογών, τα οποία δεν σχετίζονταν με την αεροναυπηγική και τα οποία ερεύνησαν τις ενδεχόμενες χρήσεις τους και εισήγαγαν τα σύνθετα υλικά επιπλέον και στην ιατρική, την επικοινωνία, την μεταφορά και τον αθλητισμό.

Αξιοσημείωτο είναι ότι τα σύνθετα υλικά κοστίζουν πολύ περισσότερο από τα αντίστοιχα παραδοσιακά υλικά. Οι τιμές τους όμως διαμορφώνονται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως η πολυπλοκότητα της μορφής του προϊόντος, η διαδικασία παραγωγής τους και η μορφή με την οποία παράγονται τα σύνθετα. Στην περίπτωση των ινών, για παράδειγμα, η τιμή τους εξαρτάται από το αν αυτές που παράγονται είναι μακριές ή βραχείες, σε μορφή pre-legs ή όχι. Επομένως, κατά την απόφαση για το αν ένα τμήμα κατασκευής συμφέρει να κατασκευασθεί με σύνθετα ή με παραδοσιακά υλικά, θα πρέπει να ποσοτικοποιείται όχι μόνο το κόστος των υλικών και της παραγωγής τους, αλλά και τα πλεονεκτήματα που προσδίδει η χρήση των συνθέτων στην κατασκευή σε βάθος χρόνου. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν είναι η μικρή πυκνότητα και επομένως οι υψηλές ειδικές ιδιότητες, η αντοχή σε διάβρωση, η μεγάλη διάρκεια ζωής σε κόπωση, η ευελιξία σχεδιασμού και επομένως η εξοικονόμηση υλικού κ.α.

1.7.1 Αεροναυπηγική

Οι εφαρμογές στα εμπορικά αεροσκάφη αποτελούν το σημαντικότερο πεδίο χρήσης των συνθέτων υλικών. Τα αεροσκάφη, αντίθετα από άλλα οχήματα, δίνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην ασφάλεια και το βάρος, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών με υψηλές ειδικές ιδιότητες.

Υπάρχει σταθερή αύξηση στη χρήση των συνθέτων σε δευτερεύουσες δομές πολιτικών ή στρατιωτικών αεροπλάνων, όπου χρησιμοποιούνται πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και αμιάντου, και σε πρωτεύουσες δομές όπου χρησιμοποιούνται προηγμένα σύνθετα (advanced composites) βασισμένα κυρίως στο γυαλί, το βόριο, τον άνθρακα και στο αρωματικό πολυαμίδιο (aramid). Ένα σύγχρονο αεροσκάφος πρέπει να σχεδιασθεί έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα πολυάριθμα κριτήρια αντοχής και ασφάλειας.

Το βάρος είναι το κύριο πρόβλημα που απασχολεί τους μηχανικούς που συμμετέχουν στην ανάπτυξη βελτιωμένων και καταλληλότερων κατασκευαστικών δομών για τα πολιτικά αεροσκάφη. Η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι βασικό χαρακτηριστικό των πολιτικών αεροσκαφών, το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας τους. Στα εμπορικά αεροπλάνα, η κόπωση και η διάβρωση είναι τα βασικά προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπισθούν.

Υπάρχουν λειτουργικοί λόγοι για τους οποίους δομικές εφαρμογές συνθέτων τοποθετούνται σε πολιτικό παρά σε στρατιωτικό αεροπλάνο. Τα μεγάλα επιβατικά αεροσκάφη διανύουν μεγάλες διαδρομές κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπως ακριβώς ένα λεωφορείο, με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται με έναν μεγάλο αριθμό πτήσεων ανά έτος. Επομένως βασικά χαρακτηριστικά ενός πολιτικού επιβατικού αεροπλάνου είναι η μακροχρόνια λειτουργία του και η ανθεκτικότητά του στο χρόνο. Το σύστημα της επιθεώρησης και αναφοράς είναι μια καθιερωμένη ρουτίνα για την συντήρηση των πολιτικών αεροσκαφών.

Οι πρωταρχικές λειτουργίες πολιτικών και στρατιωτικών αεροσκαφών στις οποίες βρίσκουν εφαρμογή τα σύνθετα υλικά περιλαμβάνουν τα φρένα των αεροσκαφών, τα πτερύγια της προπέλας, τις μηχανές Jet, τα πτερύγια των ελικοπτέρων, τις τουρμπίνες των φτερών κ.α.

Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRCs) είναι τα πιο επιθυμητά υλικά, ως αποτέλεσμα της τεχνολογίας των προηγμένων υλικών η οποία δεν περιορίζεται μόνο στον σχεδιασμό και την εφαρμογή. Ινώδη σύνθετα με εποξειδική μήτρα έχουν χρησιμοποιηθεί στις μηχανές των αεροσκαφών για να ενισχύσουν την απόδοση του συστήματος. Για την κατασκευή της πόρτας της καμπίνας του πιλότου έχει γίνει χρήση συνθέτων γυαλιού/ρητίνης, τα οποία χρησιμοποιούνται τώρα και σε άλλα μέσα μεταφοράς, ή όπου είναι απαραίτητες αυτές οι προσφερόμενες ιδιότητες του υλικού. Τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού βρίσκουν χώρο πλέον σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές εξαιτίας της ενίσχυσης που προσφέρουν και του μειωμένου βάρους τους σε σχέση με άλλα υλικά.

Τα σύνθετα με ίνες βορίου και γραφίτη, σχεδιάσθηκαν αρχικά για τα τμήματα των μαχητικών αεροσκαφών. Η χρήση τους στα εμπορικά αεροσκάφη είναι πολύ λιγότερη λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά και λόγω κάποιων μειονεκτημάτων τα οποία τα καθιστούν ακόμη απαγορευτικά στη κατασκευή μερών για εμπορικά (πολιτικά) αεροπλάνα. Με το πέρασμα του χρόνου, βέβαια, θα καταλάβουν και αυτά όπως και άλλα υλικά παλιότερα μεγάλο μέρος στη κατασκευή εξαρτημάτων για πολιτικά αεροπλάνα.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 15 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Συνθήκες στατικής και δυναμικής φόρτισης συνδυάζονται στις "turbojet" μηχανές, οι οποίες σχεδιάστηκαν αρχικά για τα πολεμικά αεροσκάφη και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και στα πολιτικά. Σε τέτοιες εφαρμογές συνδυάζονται ελαφριά υλικά προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα το βάρος στο στροφείο μηχανής, στους συμπιεστές και στα ρουλεμάν.

Μερικές από τις "turbofan" μηχανές σχεδιάζονται για να καλύψουν τις πολλαπλές απαιτήσεις του τομέα των μεταφορών. Η μηχανή μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση της αποδοτικότητας του μηχανισμού προώθησης ή με τη μείωση του βάρους της. Οι ξεχωριστές ιδιότητες της ακαμψίας και της αντοχής των συνθέτων επιτρέπουν τη σταδιακή μείωση του αριθμού πιέσεων λόγω της μεγάλης φόρτισης των πτερυγίων. Η χρήση των συνθέτων στους στροφείς, τους συμπιεστές και στα μέρη των μηχανών γίνεται με σκοπό την μείωση βάρους.

Η μηχανική των αεροσκαφών εκλύει πληροφορίες από διάφορα ευδιάκριτα επιστημονικά πεδία παράγοντας έτσι οχήματα ικανά να εκτελέσουν ξεχωριστά σενάρια πτήσης. Αρχικά ο σχεδιασμός τους επικεντρώθηκε στο βάρος, την ταχύτητα και τη δύναμη. Υπάρχουν όμως και άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν την εμπορική αποδοχή των αεροσκαφών και θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη κατά τον σχεδιασμό. Οι λόγοι αυτοί απαιτούν την επιλογή υλικών που εμφανίζουν λιγότερη από τη βέλτιστη αποτελεσματικότητα δομής του συστήματος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να εξετασθούν οι ανάγκες απόδοσης καθώς και οι ιδιότητες λειτουργίας τους.

Πτερύγια έλικα ελικοπτέρου (Helicopter rotor blade)

Υπάρχει μια γενική εκτίμηση ότι με τον κατάλληλο σχεδιασμό, τα πτερύγια της έλικος ελικοπτέρων κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής 1500 ωρών από τα αντίστοιχα μεταλλικά. Τα μεταλλικά πτερύγια σπανίως αντέχουν παραπάνω από 2000 ώρες πτήσης, ενώ αντίθετα στα πτερύγια από σύνθετα υλικά οι 3.000 ώρες ή περισσότερες είναι σύνηθες φαινόμενο.

Το πτερύγιο του έλικα ενός ελικοπτέρου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τμήματος κατασκευής που απαιτεί άριστη ειδική ακαμψία. Τα πτερύγια λειτουργούν ως αεροτομές, οι οποίες προκαλούν την ανύψωση του ελικοπτέρου. Τα σύνθετα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων του στροβίλου (έλικα) και για άλλα τμήματα του ελικοπτέρου, από τη δεκαετία του '60. Το ενδιαφέρον για τη χρήση των συνθέτων έναντι των συμβατικών υλικών έγκειται στην καλή αντίσταση σε κόπωση, στην υψηλή ακαμψία σε κάμψη και στρέψη καθώς επίσης και στη χαμηλή πυκνότητα. Επίσης γίνεται πλήρης χρήση της δυνατότητας προσαρμογής των ελαστικών ιδιοτήτων μέσω του ελέγχου της αρχιτεκτονικής των ινών, ενώ βελτιωμένα αεροδυναμικά σχέδια πτερυγίων προκύπτουν με την προσομοίωση των εφαρμοζόμενων τάσεων και της αεροδυναμικής όπου λαμβάνονται οι ανισότροπες ιδιότητες του υλικού.

Ένα βασικό πρόβλημα όσον αφορά τα πτερύγια της έλικος, προκύπτει από το συνδυασμό της έμπροσθεν και της περιστροφικής κίνησης του ελικοπτέρου. Δεδομένου ότι η ταχύτητα των αεροσκαφών κατά την κίνηση προς τα εμπρός μπορεί να είναι μέχρι 100m/s και η γραμμική ταχύτητα του περιστρεφόμενου πτερυγίου, ακόμη και στην άκρη του, είναι συχνά κάτι περισσότερο από 200 m/s, η πραγματική ταχύτητα του πτερυγίου κατά τη φάση της προώθησης

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 16 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

του περιστροφικού κύκλου είναι συχνά σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που σημειώνεται κατά τη φάσης οπισθοχώρησης. Εάν η γωνία κλίσης του πτερυγίου ως προς τον άξονα του στροβίλου παρέμενε σταθερή κατά τη διάρκεια κάθε φάσης του περιστροφικού κύκλου, το ποσοστό ανύψωσης θα ποίκιλλε σημαντικά στις δύο πλευρές του ελικοπτέρου οδηγώντας στην ανατροπή του. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου επιτυγχάνεται με την αλλαγή της γωνίας κλίσης κάθε πτερυγίου κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής. Επιπλέον αλλαγές στη γωνία κλίσης γίνονται για να αλλάξουμε κατεύθυνση κατά τη διάρκεια του ελιγμού.

Είναι επομένως πολύ σημαντικό τα πτερύγια να εμφανίζουν επαρκή στρεπτική ακαμψία, δεδομένου ότι θα πρέπει ανταποκριθούν γρήγορα και αξιόπιστα στις αλλαγές της γωνίας κλίσης που επιβάλλονται στον άξονα του στροβίλου. Η καμπτική ακαμψία επίσης θα πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η άκρη του πτερυγίου δεν θα καθυστερεί μένοντας πίσω κατά την περιστροφή ή θα λυγίζει υπερβολικά λόγω του βάρους του. Τα πτερύγια του έλικα όμως παρουσιάζουν σημαντική πολυπλοκότητα υπό την έννοια του σχήματος, της διαμόρφωσης του φορτίου και της συμπεριφοράς σε κόπωση.

Η κατασκευή ενός πτερυγίου ελικοπτέρου παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 1.2. Ενώ μερικά πτερύγια σχεδιάζονται πλήρως με ίνες γυαλιού, σημαντικά πλεονεκτήματα εμφανίζει και μια κατασκευή από υβριδικά σύνθετα. Η απαραίτητη στρεπτική ακαμψία παρέχεται από ίνες άνθρακα ± 45° ως προς τον άξονα του πτερυγίου. Ο άνθρακας και οι ευθυγραμμισμένες παράλληλα στον άξονα του πτερυγίου ίνες γυαλιού, παρέχουν την απαραίτητη αξονική ακαμψία ώστε να ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση και το χτύπημα της άκρης του πτερυγίου κατά την περιστροφή. Συγχρόνως η απόδοση με τις ίνες άνθρακα, που χρησιμοποιούνται στο χείλος και στο πίσω από τον κύριο ορθοστάτη, βελτιώνεται πάρα πολύ όσον αφορά την αντίσταση σε κόπωση λόγω κάμψης.



Εικόνα 1.2

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 17 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

1.7.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Σασί αυτοκινήτων

Στα οδικά μέσα μεταφοράς τα ενισχυμένα πλαστικά είναι το είδος των συνθέτων που χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω της ποικιλίας υλικών που μπορούν να παραχθούν από αυτά, και λόγω της δεκτικότητας που εμφανίζουν ως προς άλλα υλικά σε σχεδιαστικές αλλαγές, και διαδικασίες. Η υψηλή τους ειδική αντοχή, σε σύγκριση με άλλα υλικά, η ακαμψία, το χαμηλό κόστος τους και η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών τους, τα καθιστά πρώτη επιλογή σε εφαρμογές στα οδικά μέσα μεταφοράς.

Στα βαριά οχήματα, τα σύνθετα χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση τμημάτων με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση κόστους. Η δυνατότητα καλής αναπαραγωγής και ο προσεκτικός χειρισμός είναι οι βασικές προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός καλού συνθέτου υλικού. Αν και οι δαπάνες των προηγμένων συνθέτων υλικών, όπως σύνθετα εποξικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή γυαλιού, μπορεί να μην δικαιολογούν την αποταμίευση που επιτυγχάνεται από την άποψη του βάρους στην παραγωγή οχημάτων, παρ' όλα αυτά εποξικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί στα αγωνιστικά αυτοκίνητα και πρόσφατα για την ασφάλεια των αυτοκινήτων. Σύνθετα με μήτρα ρητίνης πολυεστέρα με το κατάλληλο ενισχυτικό υλικό, ήταν ο πρώτος τύπος συνθέτων που εφαρμόστηκε στην οδική μεταφορά. Η επιλογή υπαγορεύθηκε από τις ιδιότητες που εμφάνιζαν, όπως το χαμηλό κόστος, η ευκολία σχεδιασμού και παραγωγής των λειτουργικών μερών κ.λπ. Χρησιμοποιώντας μια ποικιλία ενισχύσεων, ο πολυεστέρας εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στη βελτίωση αυτών των συστημάτων και άλλων εφαρμογών.

Τα σύνθετα πλαστικής ρητίνης κοστίζουν περισσότερο σε σύγκριση με το χάλυβα. Επομένως άλλες ιδιότητες του συνθέτου θα πρέπει να δικαιολογήσουν το υψηλό αυτό κόστος. Οι μηχανικές ιδιότητες τους, οι οποίες επηρεάζουν το πάχος και το βάρος, θα πρέπει να προσφέρουν αρκετή αποταμίευση ώστε να τα καθιστά αποτελεσματικότερα από το χάλυβα. Ωστόσο, ο λόγος κόστους/πυκνότητας δεν μπορεί από μόνος του να αποτελέσει κριτήριο της αποτελεσματικότητας ενός υλικού από άποψη κόστους, καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι ποσότητες αποβλήτων που παράγονται κατά τη χρήση του υλικού. Τα πλαστικά σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ μικρό ποσοστό αποβλήτων από' ότι ο χάλυβας και αυτό γιατί μπορούν να διαμορφωθούν πλησιέστερα στην τελική τους μορφή.

Ορισμένα περίπλοκα τμήματα των οχημάτων, που κατασκευάζονταν με χύτευση μετάλλου, μπορούν να κατασκευαστούν με σύνθετα υλικά σε μορφή φύλλων με τη μέθοδο της μορφοποίησης με συμπίεση (compression moulding). Οι τεχνολογίες μορφοποίησης, σχεδιασμού και κατασκευής έχουν διευρύνει τις δυνατότητες κατασκευής οχημάτων με σύνθετα ενισχυμένου πολυεστέρα. Τα ενισχυμένα πλαστικά δεν κοστίζουν τόσο στην παραγωγή τους, και πλέον χρησιμοποιούνται εκτενώς σε τμήματα του αυτοκινήτου, όπως στους λαμπτήρες δεικτών και σε άλλα εξαρτήματα. Στα φορτηγά και στα τρέιλερ χρησιμοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό ενισχυμένα πλαστικά για τις συνδέσεις και για την κατασκευή κάποιων τμημάτων τους.

Οι παράμετροι σχεδιασμού και επιλογής των υλικών, διαφέρουν για τα δύο αυτά είδη οχημάτων. Στην περίπτωση των φορτηγών και βαρέων οχημάτων, σημαντικός παράγοντας

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

επιλογής υλικού είναι η αποταμίευση βάρους, καθώς το βάρος επηρεάζει άμεσα την αποδοτικότητα, το ωφέλιμο φορτίο και το κόστος του οχήματος. Επιπλέον, καθώς τα οχήματα αυτά αποτελούν μεγάλες οικονομικές επενδύσεις, η αντοχή τους στο χρόνο αποτελεί πρωταρχικό κριτήριο. Επομένως, ο χρόνος, η συχνότητα και το κόστος συντήρησής τους αποτελούν επιπλέον παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την επιλογή υλικών.

Τα ιδιωτικά οχήματα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευκολία στο σχεδιασμό, η μορφή τους τείνει να είναι διαφορετική και είναι πιο ελκυστικά στη μορφή. Σε αυτού του είδους τα οχήματα, πρότυπα μεγέθη αυτοκινήτων λαμβάνονται με την τεχνική της μορφοποίησης με καλούπι. Άκαμπτα τμήματα παράγονται ως επι το πλείστον με σύνθεση μιας μήτρας πολυεστέρα, ίνες γυαλιού και διάφορα εγκλείσματα (fillers). Μεγάλα πολύπλοκα τμήματα μπορούν να παραχθούν με αυτή την τεχνική, ενώ η αναπαραγωγή τους είναι εξίσου γρήγορη. Τμήματα του αυτοκινήτου που κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο είναι ομοιόμορφου πάχους, καθώς πρόσθετη ενίσχυση ινών δεν μπορεί εύκολα να εφαρμοσθεί.

Η αντοχή των υλικών είναι μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με άλλες διαδικασίες μορφοποίησης με καλούπι και η μορφή με την οποία παράγονται είναι αυτή των προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης (pre-pregs).

Αυτής της μορφής σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ολοκλήρου της εξωτερικής επιφάνειας των οχημάτων, δίνοντας τους μοναδική μορφή. Η εσωτερική και εξωτερική ενίσχυση επιτυγχάνεται με πάνελ τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με μια συγκολλητική ουσία. Χάρη στη σταθερότητα τους έναντι της διάβρωσης και της κρούσης, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως και για την κατασκευή των μπροστινών και οπίσθιων προφυλακτήρων.

Τα χαρακτηριστικά της αντοχής σε κόπωση και του χαμηλού βάρους, η δυνατότητα να αντιστέκονται στην παραμόρφωση λόγω της θερμότητας που παράγεται από την μηχανή, και οι χαμηλής συχνότητας οδικές δονήσεις, είναι εκείνα τα γνωρίσματα που ευνοούν τη χρήση συνθέτων υλικών στα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και άλλα βαριά οδικά οχήματα.

1.7.3 Εφαρμογές στην χειρουργική

Τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πλαστικά υλικά, χρησιμοποιούνται χρόνια ως δευτερεύοντες νάρθηκες. Το σχήμα τους λαμβάνεται άμεσα από το σώμα του ασθενούς. Για τις πιο περίπλοκες αρθρώσεις, κατασκευάζεται αρχικά μία φόρμα από κονίαμα (plaster cast), έτσι ώστε το σύνθετο υλικό να μπορεί να μορφοποιηθεί (moulded) από αυτό, χωρίς να απαιτείται η παρουσία του ασθενούς.

Τα τεχνητά πόδια καλουπώνονται σε μία φόρμα γυαλί/πολυεστέρα και για να σταθεροποιηθεί το λεπτό τους κέλυφος, χρησιμοποιείται αφρός πολυουρεθανίου (polyurethane foam) ως filler. Τέτοιου τύπου σύνθετα χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν το μέταλλο. Συχνά, ένα ύφασμα με ίνες γυαλιού συνδέεται απευθείας με την εξωτερική επιφάνεια του plaster cast, καθιστώντας το ανθεκτικότερο στο γδάρσιμο και σε κρουστικά φορτία. Με την εμφάνιση των ανθρακικών ινών και των συνθέτων υλικών πλαστικής μήτρας ενισχυμένης με ίνες άνθρακα (CFRP), σημειώθηκε θεαματικότερη πρόοδος στην ιατρική με διάφορους τρόπους.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 19 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Πλαίσια στήριξης τεχνητών άκρων (Frames for power assisted arms)

Μια συνηθισμένη τεχνική για την κατασκευή ελαφριών εξαρτήσεων για τη σύνδεση των τεχνητών άκρων (power assisted arms) περιλαμβάνει, έχοντας την ακριβή φόρμα (cast), την εν θερμώ μορφοποίηση ταινιών από αφρό πολυαιθυλενίου (PE) πάνω στη φόρμα. Προηγουμένως έχουν δημιουργηθεί ρηχές αυλακώσεις πάνω σε αυτές τις ταινίες, έτσι ώστε οι ίνες άνθρακα και η ρητίνη να οδηγηθούν απευθείας στο εσωτερικό των αυλακώσεων και να σταθεροποιηθούν (cure). Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας, είναι ένα άκαμπτο ελαφρύ πλαίσιο, που μπορεί να φορεθεί άνετα λόγω του "μαξιλαριού" από αφρό PE που τοποθετείται πάνω από το σκελετό.

Δεδομένου ότι καθώς ένα παιδί ,για παράδειγμα μεγαλώνει, χρειάζεται ένα μεγαλύτερο πλαίσιο στο οποίο θα στηριχθούν τα μακρύτερα αυτή τη φορά τεχνητά μέλη (power assisted arms), αυτή η τεχνική μορφοποίησης με καλούπι (moulding method) αποτελεί μια γρήγορη και εύκολη μέθοδο ανακατασκευής.



Εικόνα 1.3: Τεχνητό μέλος προσθετικής από διάφορα σύνθετα υλικά της εταιρίας Ossur

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
20	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u> <u>ΚΟΚΚΩΛΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ- ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ</u> <u>ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ</u>

2.1 Κοκκώδη σύνθετα υλικά (particulare Composites)

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από κόκκους ενός υλικού μέσα σε μήτρα ενός άλλου. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως και η μήτρα. Έτσι, από αυτή την άποψη έχουμε τέσσερις δυνατούς συνδιασμούς.

1. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας.

Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το σκυρόδεμα (όχι το οπλισμένο). Το σκυρόδεμα αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μίγμα τσιμέντου και νερού, το οποίο έχει αντιδράσει χημικά και έχει σκληρύνει. Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται στην ύπαρξη των κόκκων πέτρας.

2. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μη μεταλλικής μήτρας.

Πολλά υλικά αυτού του είδους έχουν κατασκευασθεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μείωση της φθοράς της μήτρας. Παράδειγμα, τέτοιου υλικού είναι έγκλεισμα χαλκού μέσα σε εποξειδική ρητίνη, που αυξάνει κατά πολύ την ηλεκτρική αγωγιμότητα αυτής. Επίσης είναι συνήθη τα σύνθετα υλικά με εγκλείσματα από μέταλλο σε μορφή φλούδας.

3. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας.

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Το μεταλλικό έγκλεισμα έχει τη μορφή κόκκων μέσα στη μήτρα και δεν είναι διαλυμένο μέσα σε αυτήν, όπως στα κράματα. Σαν παράδειγμα για αυτήν την κατηγορία μπορούμε να αναφέρουμε τους κόκκους μολύβδου εντός κραμάτων χαλκού και χάλυβα, που σκοπό έχουν τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του κράματος στις εργαλειομηχανές.

4. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος εντός μεταλλικής μήτρας

Μη μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μορφή κοκκώδους εγκλείσματος μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα προκύπτοντα υλικά ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορούν να είναι δύο ειδών ανάλογα με το έγκλεισμα. Το πρώτο είδος είναι κεραμμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου πάνω σε μεταλλική μήτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στη κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το άλλο είδος κεραμομέταλλων είναι με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα στη μεταλλική μήτρα. Για αυτό το λόγο το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν μεγάλη αντοχή στη οξείδωση και στη

Σελίδα 1

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
διάβρωση. Επίσης το καρβίδιο του τιτανίου μέσα σε μήτρα νικελίου ή κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπως επίσης και σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ως καύσιμα.

2.2 Μέτρο ελαστικότητας των κοκκωδών σύνθετων υλικών.

Τα σύνθετα υλικά έχουν γνωρίσει πολύ μεγάλη εξέλιξη και ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Πλέον τα σύνθετα υλικά έχουν πλέον πολύ βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με αυτές που είχαν παλιότερα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές. Επειδή τα σύνθετα υλικά αποτελούνται, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, τουλάχιστον από δύο διαφορετικά υλικά είναι αρκετά δύσκολο να υπολογίσουμε διάφορες ιδιότητές τους. Έτσι πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας των κοκκωδών σύνθετων υλικών και έχουν αναπτύξει διάφορα θεωρητικά μοντέλα για τον υπολογισμό του. Τα μοντέλα αυτά και οι εξισώσεις που προέκυψαν ανάλογα με τις παραδοχές που ο καθένας χρησιμοποίησε είναι άλλοτε απλά και άλλοτε πολύπλοκα. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε για τους θεωρητικούς μας υπολογισμούς ορισμένα από αυτά τα μοντέλα. Εκτενέστερη αναφορά στους διάφορους ερευνητές υπάρχει στη βιβλιογραφία που ακολουθεί στο τέλος της εργασίας.

<u>Το μοντέλο του Counto</u>

Ο Counto [16] για τα σύνθετα υλικά δύο φάσεων θεωρεί ότι υπάρχει τέλεια πρόσφυση ανάμεσα στο κόκκο και τη μήτρα. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού δύο φάσεων θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - U_f^{1/2}}{E_m} + \frac{1}{[(1 - U_f^{1/2})U_f E_m] + E_f}$$
(2.1)

Αυτό το μοντέλο μπορεί να προβλέπει τα μέτρα ελαστικότητας, κυρίως για υλικά από σκυρόδεμα, και συμφωνεί για ένα ευρύ φάσμα από πειραματικά δεδομένα.

<u>Το μοντέλο του Paul.</u>

Ο Paul στη προσεγγιστική του λύση [17] θεωρεί τα συστατικά (οι φάσεις) του σύνθετου υλικού να είναι στη κατάσταση μακροσκοπικώς ομοιογενούς τάσης. Η πρόσφυση υποτίθεται ότι υπάρχει στην ενδιάμεση επιφάνεια ενός κυβικού εγκλείσματος, το οποίο είναι μέσα σε κυβική μήτρα. Όταν μια ομοιόμορφη τάση εφαρμοστεί στο σύνορο, το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού δίνεται από τη σχέση:

Σελίδα 2	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$E_{c} = E_{m} \frac{1 + (m-1)U_{f}^{3/2}}{1 + (m-1)(U_{f}^{2/3} - U_{f})}$$
(2.2)

όπου m= $\frac{E_f}{E_m}$

<u>Το μοντέλο του Hirsh</u>

Ο Hirsh στο μοντέλο του βασίστηκε ουσιαστικά σε δύο πολύ βασικά μοντέλα:

Α) Το αναλογικό μοντέλο:

Δίνεται από το τύπο: $\mathbf{E}_c = E_m \upsilon_m + E_f \upsilon_f$

όπου v_m είναι το κλάσμα όγκου της μήτρας και v_f είναι το κλάσμα όγκου του εγκλείσματος.

Αυτός ο τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγκλείσματα μόνο όταν 1<c<2.

Β)Το αρμονικό μοντέλο:

Χρησιμοποιείται όταν έχουμε σύνδεση σε σειρά μεταξύ της μήτρας και του εγκλείσματος.

Δίνεται από το τύπο
$$\frac{1}{E_c} = \frac{\upsilon_m}{E_m} + \frac{\upsilon_f}{E_f}$$
,

όπου και πάλι υ_m είναι το κλάσμα όγκου της μήτρας και υ_f είναι το κλάσμα όγκου του εγκλείσματος.

Τώρα όμως ½<
c<1 για να ισχύει το μοντέλο για εγκλείσματα.

Επομένως η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για ένα σύνθετο υλικό σύμφωνα με το μοντέλο του Hirsh θα δίνεται από το τύπο:

$$E_{c} = x(E_{f}\upsilon_{f} + E_{m}\upsilon_{m}) + (1-x)\frac{E_{f}E_{m}}{(E_{f}\upsilon_{m} + E_{m}\upsilon_{f})}$$
(2.3)

όπου x είναι ένας συντελεστής στάθμισης.

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E_c του σύνθετου υλικού, λόγο του συντελεστή στάθμισης, θα βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζουν τα δύο προηγούμενα μοντέλα (αναλογικό και αρμονικό). Το πρόβλημα που προκύπτει οφείλεται κυρίως στο x, που δίνει σε κάθε περίπτωση το ποσοστό του συνθέτου το οποίο διατηρείται υπό ομοιόμορφη καταπόνηση (x) και το ποσοστό που διατηρείται υπό ομοιόμορφη τάση (1-x), δεν παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με το v_f .

Σελίδα 3	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
----------	--

<u>Το μοντέλο του Nielsen</u>

Ο Nielsen κατάφερε να περιγράψει με εξαιρετικό τρόπο όλες τις κατηγορίες των σύνθετων υλικών. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο συντελεστής του μέτρου ελαστικότητας E_c μπορεί να υπολογιστεί μέσω μιας ημιεμπειρικής εξίσωσης.

$$\frac{\mathrm{E}_{c}}{E_{m}} = \frac{1 + AB\upsilon_{f}}{1 - B\psi\upsilon_{f}}$$
(2.4)

όπου: A =
$$k_e - 1$$
, B = $\frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + A}$
και $\psi = 1 + (\frac{1 - p_f}{p_f^2}) \upsilon_f$ (2.5)

Η σταθερά k_e ονομάζεται σταθερά Einstein και p_f είναι το μέγιστο ποσοστό των εγκλεισμάτων που θα μπορούσε η εξίσωση να δεχτεί. Οι τιμές αυτών των σταθερών κυμαίνονται ανάλογα τη περίπτωση, το k_e μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ του 1.8 και 6 ενώ το p_f μεταξύ του 0.74 και 0.42. Ο Nielsen βασίστηκε στην εξίσωση του Kerner με μόνη διαφορά ότι περιέλαβε το κλειστό παράγοντα εγκλεισμάτων p_f , το παράγοντα σχήματος k_e και τις ιδιότητες τις μήτρα στο μοντέλο του. Υπάρχει πάρα πολύ ικανοποιητική προσέγγιση του μέτρου ελαστικότητας για σύνθετα υλικά που έχουν πολύ υψηλή συγκέντρωση εγκλεισμάτων v_f . Επομένως η εισαγωγή των δύο σταθερών k_e και την αλληλεπίδραση στη διεσπαρμένη φάση εξηγεί την υπεροχή αυτής της εξίσωσης σε σχέση με τις προηγούμενες.

<u>2.2.1 Μέτρα ελαστικότητας με σφαιρικά εγκλείσματα</u>

Τα εγκλείσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αρκετά μεγάλα, με αποτέλεσμα η μέση απόσταση μεταξύ τους ακόμα και για μεγάλες περιεκτικότητες να είναι μεγάλη σε σχέση πάντα με τις τιμές της τετραγωνικής ρίζας της απόστασης μεταξύ των άκρων των μακρομορίων του πολυμερούς. Τα σωματίδια δεν συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας απλής αλυσίδας πολυμερούς μιας και είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους.

Στη περίπτωση που το πάχος του στρώματος του πολυμερούς μεταξύ των σωματιδίων είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του οριακού στρώματος η επίδραση του μπορεί να αμεληθεί στις διάφορες ιδιότητες. Πολλοί είναι αυτοί που κατά καιρούς έχουν προτείνει διάφορες εξισώσεις που να περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με σφαιρικά εγκλείσματα.

Σελίδα 4	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Ο Einstein εν έτη 1906 ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με σφαιρικά εγκλείσματα. Πιο αναλυτικά έκανε παρατηρήσεις στο ιξώδες αιωρήματος στερεών σφαιρών διασπαρμένων σε κάποιο Νευτώνιο υγρό καταλήγοντας στην εξίσωση:

$$E_c = E_m (1 + 2.5U_f) \tag{2.6}$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν ισχύει για όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα η εξίσωση αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρές περιεκτικότητες σε εγκλείσματα και για περιπτώσεις πλήρους συνοχής μεταξύ εγκλείσματος και μήτρας. Η απουσία σχετικής κίνησης μήτρας και σωματιδίων εκφράζεται με τον όρο τέλεια συνοχή, κατά την διάρκεια φόρτισης μέχρι κάποιου ορίου πάνω από το οποίο σπάει ο δεσμός μήτρας και σωματιδίου.

Η παραπάνω εξίσωση προϋποθέτει ότι το έγκλεισμα θα πρέπει να είναι σκληρότερο από το υλικό της μήτρας. Επίσης ο όγκος του εγκλείσματος είναι η σημαντική παράμετρος της εξίσωσης και όχι το βάρος του. Τέλος το μέγεθος των σωματιδίων δεν επηρεάζει την ενισχυτική δράση.

Αυτοί που συνέχισαν την έρευνα είναι οι: Guth [20] και Smallwood [21], προτείνοντας τη παρακάτω εξίσωση.

$$E_c = E_m (1 + 2.5U_f + 14.1U_f^2)$$
 (2.7)

Ο Kerner [10] και αυτός με τη σειρά του πρότεινε μια εξίσωση εισάγοντας όμως στην εξίσωση το μέτρο διάτμησης G και το λόγο Poisson ν για το κάθε υλικό.

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{\frac{U_f G_f}{(1 - 5\nu_m)G_m + (8 - 10\nu_m)G_f} + \frac{U_m}{15(1 - \nu_m)}}{\frac{U_f G_f}{(1 - 5\nu_m)G_m + (8 - 10\nu_m)G_f} + \frac{U_m}{15(1 - \nu_m)}}$$
(2.8)

Στη περίπτωση που έχουμε σ' ένα σύνθετο υλικό τα εγκλείσματα να είναι πιο σκληρά από τη μήτρα η εξίσωση (2.8) μπορεί και να απλοποιηθεί στη παρακάτω σχέση.

$$\frac{\mathbf{E}_{c}}{E_{m}} = 1 + \frac{U_{f}}{U_{m}} \frac{15(1 - \nu_{m})}{8 - 10\nu_{m}}$$
(2.9)

Η προϋπόθεση αυτή της συνοχής μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος δεν ισχύει διότι η πραγματική ενισχυτική δράση του εγκλείσματος είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται θεωρητικά. Με αποτέλεσμα σε ακραίες περιπτώσεις να μπορεί να επιφέρει ελάττωση παρά αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού. Ο Einstein από παρατηρήσεις που έκανε σχετικά με τη συνοχή που αναφέραμε και παραπάνω, κατέληξε πως όταν μεταξύ του αιωρήματος στερεών σφαιρών και του Νευτόνιου υγρού δεν μπορεί να υπάρξει τέλεια συνοχή ισχύει η εξίσωση:

$$E_c = E_m (1 + U_f)$$
 (2.10)

Σελίδα 5 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Η εξίσωση *Kerner* για τη περίπτωση που τα σωματίδια είναι φυσαλίδες αέρα ή βρίσκονται μέσα σε κενά γράφεται ως εξής:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_m} + \frac{U_f}{U_m} \frac{15(1 - \nu_m)}{7 - 5\nu_m}$$
(2.11)

Για τις παραπάνω θεωρίες πρέπει να κάνουμε μια παραδοχή ότι τα εγκλείσματα δεν σχηματίζουν συσσωματώματα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα συσσωματώματα δημιουργούν κοιλότητες αέρα με αποτέλεσμα ο φαινομενικός όγκος του εγκλείσματος να είναι μεγαλύτερος του πραγματικού.

Ο Mooney [25] για τη περίπτωση που έχουμε έναρξη δημιουργίας συσσωματωμάτων έδειξε τη παρακάτω εξίσωση για αυτό το φαινόμενο:

$$\frac{E_c}{E_m} = e^{(\frac{2.5U_f}{1-SU_f})}$$
(2.12)

όπου με S ορίζουμε το λόγο του φαινομενικού όγκου προς το πραγματικό όγκο του εγκλείσματος. Η τιμή του S που μας δίνει η θεωρία είναι S=1.35 υπάρχει όμως ένας περιορισμός ότι το S δεν μπορεί να πάρει τιμή μικρότερη της μονάδας. Τα πειράματα που μελετήσαμε μας έδωσαν τιμές για το S μεταξύ του 1.2 έως 2.

Οι Eilers και Van Dyck ασχολήθηκαν με αυτό το φαινόμενο και πρότειναν μια θεωρία που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{kU_f}{1 - SU_f} \qquad (2.13)$$

όπου S=1.20 και k=1.25.

Όμως και το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ [31] έχει ασχοληθεί με το βαθμό πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος. Το μοντέλο που πρότεινε για την περίπτωση κοκκωδών εγκλεισμάτων έχει βασιστεί στον ορισμό της ενδιάμεσης φάσης. Ο δείκτης i αναφέρεται στην ενδιάμεση φάση ενώ ο k περιγράφει το βαθμό σύνδεσης μεταξύ εγκλείσματος και ενδιάμεσης φάσης.

$$E_{c} = E_{f}U_{f}k + E_{m}U_{m} + E_{i}U_{i} \qquad (2.14)$$

Η μελέτη του καθηγητή Π.Σ Θεοχάρη [32,33] δίνει μια καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος. Προτείνει μια σειρά μοντέλων στα οποία θεωρείται ότι αναπτύσσεται μια τρίτη ψευδο-φάση μεταξύ μήτρας και εγκλεισμάτων κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού της μήτρας. Αργότερα οι κ. Π.Σ Θεοχάρης και Αιμ. Σιδερίδης [34] πρότειναν μια άλλη εξίσωση για το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού με εγκλείσματα, η οποία φαίνεται παρακάτω:

Σελίδα 6 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$\frac{2(1-2v_c)}{E_c} = \frac{2\lambda^2 U_f}{E_f} + \frac{1}{E_m} \frac{U_f (1-\lambda)^2 (1-v_m) + 2(\lambda U_f - 1)^2 (1-2v_m)}{1-U_f}$$
(2.15)

όπου τα ν,ς και λ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{1}{V_c} = \frac{U_f}{V_f} + \frac{U_m}{V_m}$$

και

$$\lambda = \frac{3(1 - v_m)E_f}{[2U_f(1 - 2v_m) + 1 + v_m)E_f + 2(1 - 2v_m)(1 - U_f)E_m]}$$

2.2.2 Περιορισμοί θεωρητικών μοντέλων σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών.

Προηγουμένως κάναμε μια απλή αναφορά σε χρήσιμες θεωρητικές υποθέσεις που περιγράφουν τα μέτρα ελαστικότητας ενός συστήματος εγκλεισμάτων. Δηλαδή δεν κάναμε ουδεμία προσπάθεια προσέγγισης αυτών. Για τη λεπτομερή συζήτηση των θεωριών γίνεται αναφορά στους Hashin και Hill [17].

Στην πραγματικότητα έχουμε συσσωματώματα από κόκκους μιας και τα εγκλείσματα κόκκων δεν μπορούν να αποχωριστούν πλήρως το ένα από το άλλο. Η ενίσχυση του στοιχείου μπορεί να είναι σε μικρή κλίμακα. Επομένως, σε ένα εφαρμοζόμενο φορτίο η τάση θα κατανεμηθεί ομοιόμορφα μεταξύ των κόκκων και των συσσωματωμάτων και η παράδοχη τάση ή ομοιόμορφη επιμήκυνση (παραμόρφωση) είναι καθαρή υπεραπλούστευση.

Σύμφωνα με θεωρίες που ασχολούνται με συστήματα εγκλεισμάτων τα μέτρα ελαστικότητας για δεδομένο έγκλεισμα και μήτρα θα εξαρτώνται μόνο από την περιεκτικότητα σε όγκο του εγκλείσματος και όχι από το μέγεθος των κόκκων. Εντούτοις, το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει αύξηση αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος των κόκκων. Πιο απλά όσο το μέγεθος των κόκκων μειώνεται τόσο το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει [18,19,20,21]. Οι Lewis και Nielsen [18] υποστηρίζουν ότι όσο το μέγεθος του κόκκου μειώνεται τόσο η επιφάνεια των κόκκων αυξάνεται με αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός πιο ενεργού επιφανειακού δεσμού μεταξύ των δύο φάσεων. Υπάρχει, επίσης, μια εξάρτηση μεταξύ των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με το σχήμα (μορφή) του κόκκου με αποτέλεσμα διαφορετικές μορφές εγκλεισμάτων να επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως παρατήρησε και ο Bueche [22]. Αυτό παρατηρείται όταν μη σφαιρικοί ή πολλοί

Σελίδα 7	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

μεγάλοι κόκκοι που ανάλογα με το προσανατολισμό τους μπορούσαν να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά της παραμόρφωσης και το σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Μη λαμβάνοντας υπόψιν ο Wu [23] την ανισοτροπία η οποία συνδέεται με τη χρήση μη σφαιρικών κόκκων σε σύνθετα υλικά έδειξε ότι οι κόκκοι σε μορφή δίσκου έδωσαν καλύτερη ενίσχυση σε σχέση με βελονοειδούς ή σφαιρικής μορφής κόκκους.

Ο Chow [24] προέβλεψε το εγκάρσιο και το διάμηκες μέτρο ελαστικότητας για ευθυγραμμισμένους ελλειψοειδείς κόκκους, αγνοώντας τις οποιεσδήποτε επιδράσεις από το μέγεθος και την επιφάνεια του εγκλείσματος. Στη πραγματικότητα, όμως, η παραδοχή του Chow για ομοιόμορφη διάταξη των εγκλεισμάτων (κόκκων) στο υλικό είναι αδύνατη σύμφωνα με τη θεώρηση του.

Η περιεκτικότητα του εγκλείσματος στη μήτρα εξαρτάται από τη κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Μίγματα κόκκων με διαφορετικό μέγεθος εγκλεισμάτων μπορούν να διαταχθούν πιο πυκνά σε σχέση με εγκλείσματα ενός μεγέθους γιατί τα μικρά εγκλείσματα μπορούν και καταλαμβάνουν καλύτερα το χώρο μεταξύ των στενά διατεταγμένων μεγάλων εγκλεισμάτων σχηματίζοντας συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα αυτά που δημιουργούνται αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας για την ίδια περιεκτικότητα που προβλέπεται από τις περισσότερες θεωρίες.

Οι Ahmed και Jones παρατήρησαν ότι η επίδραση αυτή δημιουργείται όπου υπάρχει μια διαφορετική ενισχυτική ικανότητα άμμου. Ο Dickie [27] πρότεινε μια τροποποίηση της εμπειρικής εξίσωσης του Kerner η οποία περιλαμβάνει ένα συντελεστή αλληλεπίδρασης του εγκλείσματος.

Ο Christensen [28] έκανε ένα σχόλιο για την εξίσωση Kerner που λέει ότι το σαφές σφάλμα σ' αυτήν την εξίσωση δεν μπορεί να δειχθεί λόγω της συντομίας της παραγωγίσεως. Αποτέλεσμα ήταν να δημιουργεί αμφιβολίες στην εξίσωση του Kerner και στις επακόλουθες τροποποιήσεις τις.

Υπάρχει τέλεια πρόσφυση ανάμεσα στα εγκλείσματα και τη πολυμερική μήτρα όπως παραδέχονται οι περισσότερες από τις θεωρίες οι οποίες εξηγούν την ενισχυτική δράση των εγκλεισμάτων. Οι Sato και Furukawa [29] ασχολήθηκαν με τη περίπτωση της ελλιπούς προσφύσεως στην ελαστική περιοχή προβλέποντας τη μείωση των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε εγκλείσματα υποστηρίζοντας ότι οι συνδεδεμένοι κόκκοι λειτουργούν σαν οπές. Επειδή αυτοί οι κόκκοι συγκρατούν, βέβαια, τη μήτρα μη επιτρέποντάς της να καταρρεύσει μπορούμε να υποστηρίζουμε ότι η μη συνδεδεμένοι κόκκοι δεν λειτουργούν ως οπές. Το μέτρο ελαστικότητας συστήματος εγκλεισμάτων πρέπει λοιπόν, να αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας του εγκλείσματος.

Μια μεταβολή που θα συμβεί στη πρόσφυση μήτρας και εγκλείσματος θα έχει μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή παρά στο μέτρο ελαστικότητας μιας και η αντοχή εξαρτάται περισσότερο από τη κατεργασία της επιφάνειας [19,30,31]. Όσο οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των φάσεων δεν υπερβαίνουν την εφαρμοζόμενη τάση ο βαθμός πρόσφυσης δεν είναι σημαντικός παράγοντας. Οι Spanoudakis και Young [19] εξέτασαν εγκλείσματα γυαλιού σε εποξειδική ρητίνη και βρήκαν ότι οι καλύτερες συνολικές μηχανικές ιδιότητες αποκτήθηκαν από σύνθετα υλικά που περιείχαν κόκκους

Σελίδα 8 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτα υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης	ων υλικών
--	-----------

που είχαν εμβαπτιστεί σε ουσία (coupling agent) με σκοπό την αύξηση της πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω είναι εμφανές ότι τα μέτρα ελαστικότητας ενός συστήματος εγκλεισμάτων είναι μια λεπτομερειακή συνάρτηση της μικροδομής όπως επίσης και της ποιότητας πρόσφυσης μεταξύ των δύο φάσεων.

2.3 Θεωρητική μελέτη μοντέλων για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του κοκκώδους υλικού.

Πρέπει να βασιστούμε σε κάποιες παραδοχές για τη θεωρητική μελέτη που θα κάνουμε παρακάτω. Αυτές είναι:

- 1. Για να θεωρηθεί το σύνθετο υλικό ομοιογενές και μακροσκοπικώς ισότροπο θα πρέπει ο αριθμός των εγκλεισμάτων να είναι μεγάλος και η κατανομή τους ομοιόμορφη.
- Τα εγκλείσματα και η μήτρα του σύνθετου υλικού πρέπει να είναι ελαστικά ισότροπα και ομοιογενή υλικά.
- 3. Τα εγκλείσματα δηλαδή οι κόκκοι πρέπει να έχουν τέλειο σφαιρικό σχήμα.
- 4. Η κατ' όγκο περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων πρέπει να είναι αρκετά μικρή για να μπορέσουμε να μην λάβουμε υπόψιν την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών.
- 5. Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά μικρές έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις των παραμορφώσεων.

Εφαρμόζοντας τη θεωρία ελαστικότητας στο στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο του σύνθετου υλικού με τη θεώρηση ότι έχει κατά μέσο όρο τις ιδιότητες του κοκκώδους σύνθετου υλικού, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις θεωρητικές σχέσεις που δίνουν το μέτρο ελαστικότητας.

2.4 Διφασικό μοντέλο

Θεωρώντας ως διφασικό μοντέλο το κοκκώδες σύνθετο υλικό το χωρίζουμε σε δύο φάσεις. Αυτές οι φάσεις αποτελούνται από δύο ομόκεντρες σφαίρες με ακτίνες r_f και r_m που παριστάνουν τις δύο φάσεις του υλικού, δηλαδή το έγκλεισμα και τη μήτρα. Εφαρμόζοντας στην εξωτερική επιφάνεια της κοίλης σφαίρας μια εξωτερική τάση P_i , στο εσωτερικό της σφαίρας λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος θα έχουμε κοινή τάση P_o . Με τη βοήθεια της τασικής συνάρτησης [32]

$$\Phi = \frac{L}{r} + Mr^2 \qquad (2.16\alpha)$$

όπου L και M σταθερές και εφαρμόζοντάς την για κάθε μια από τις δύο φάσεις του μοντέλου μπορούμε να βρούμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις του παραπάνω προβλήματος.

Σελίδα 9	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
-----------------	--

Είναι γνωστό ότι η ενέργεια παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού είναι ίση με το άθροισμα των ενεργειών παραμόρφωσης των δύο φάσεων. Με την εφαρμογή της συνθήκης ενεργειακής ισορροπίας στο διφασικό μοντέλο μπορούμε να βρούμε το μέτρο ελαστικότητας E_c του σύνθετου υλικού. Μετά από πράξεις καταλήγουμε στη παρακάτω σχέση,

$$\frac{2(1-2\nu_c)}{E_c} = \frac{2\lambda^2 U_f (1-2U_f)}{E_f} + \frac{1}{E_m} \frac{U_f (1-\lambda)^2 (1+\nu_m) + 2(\lambda U_f - 1)^2 (1-2\nu_m)}{1-U_f}$$
(2.16)

όπου ο λόγος του Poisson του σύνθετου υλικού ν_c δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{v_c} = \frac{U_f}{v_f} + \frac{U_m}{v_m}$$
(2.17)

Και η παράμετρος λ από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{P_0}{P_1} = \frac{3(1 - \nu_m)E_f}{[2U_f(1 - 2\nu_m) + 1 + \nu_m]E_f + 2(1 - 2\nu_f)(1 - 2U_f)E_m}$$
(2.18)

2.5 Αντοχή των κοκκωδών υλικών

Οι θεωρίες για την αντοχή των σύνθετων υλικών όπως επισήμανε και ο Nielsen [33] είναι λιγότερο ανεπτυγμένες σε σχέση με αυτές για τα μέτρα ελαστικότητας, με εξαίρεση μόνο την περίπτωση για ελαστικό (rubber) με εγκλείσματα που υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί.

2.5.1 Τάση θραύσης:

<u>2.5.1.1 Μοντέλο των Sahu-Broutman</u>

Οι Sahu-Broutman [34] στη προσέγγιση τους κάνουν την υπόθεση ότι το σύνθετο υλικό αστοχεί όταν ένα στοιχείο υποστεί θραύση ως αποτέλεσμα μιας συγκεντρώσεως τάσεως γύρω από το έγκλεισμα. Έπεται ότι η αντοχή πίπτει ταχέως με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων εγκλεισμάτων και παραμένει βασικά σε αυτό το επίπεδο με περαιτέρω προσθήκη εγκεισμάτων.

Για αυτή την υπόθεση χρησιμοποίησαν την ανάλυση για πεπερασμένα στοιχεία για να μοντελοποιήσουν το σύνθετο υλικό και συσχέτισαν τα αποτελέσματα με τις πειραματικές αντοχές υλικού με εγκλείσματα από σφαίρα γυαλιού μέσα σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη.

Οι θεωρητικές προβλέψεις δεν έχουν καλή σύμπτωση με τα πειραματικά δεδομένα διότι το μοντέλο αγνοεί την αλληλεπίδραση κόκκων. Επιπροσθέτως τα σύνθετα υλικά είναι πιθανόν να μην έχουν αστοχήσει ως αποτέλεσμα της αστοχίας του πρώτου στοιχείου.

Σελίδα	α Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλυ	
10	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης	

2.5.1.2 Ο νόμος των δυνάμεων(The power low)

Η δεύτερη προσέγγιση υποθέτει ότι η αντοχή σύνθετου υλικού προσδιορίζεται από την υπάρχουσα έκταση της φέρουσας φορτίο μήτρας λόγω της παρουσίας του εγκλείσματος [35-39].

Για την περίπτωση που έχουμε πολύ χαμηλή πρόσφυση ανάμεσα στη μήτρα και στο έγκλεισμα και της απουσίας συγκεντρώσεως τάσης στην ενδιάμεση επιφάνεια κόκκου-μήτρας η αντοχή περιγράφεται από το νόμο δυνάμεως:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - a U_f^n) \qquad (2.19)$$

όπου σ_{cu} και σ_{mu} είναι οι αντοχές ή τάσεις θραύσεως του σύνθετου υλικού και της μήτρας αντιστοίχως, α και n είναι σταθερές εξαρτώμενες από το υποτιθέμενο σχήμα κόκκου και την ταξινόμηση στο μοντέλου του συνθέτου.

Ο Nielsen [35] εισηγήθηκε την προσθήκη ενός παράγοντα συγκεντρώσεως τάσεως Κ με προτεινόμενη τιμή την 0,5. Ακόμη για κυβικούς κόκκους μέσα σε κυβική μήτρα η παραπάνω εξίσωση θα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - a U_f^n) \qquad (2.20)$$

Οι Nicolais και Narkis [38] θεώρησαν μια κυβική μήτρα ενισχυμένη με ομοιόμορφα διασκορπισμένους κόκκους όπου υποτίθεται ότι η θραύση γίνεται στην ελάχιστη εγκάρσια διατομή συνεχούς φάσεως,η σχέση για την αντοχή έχει ως εξής:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - 1, 21 U_f^{2/3}) \qquad (2.21)$$

Οι Piggot και Leidner υποστήριξαν ότι η υποτιθέμενη ομοιόμορφη κατανομή των εγκλεισμάτων σε πάρα πολλά μοντέλα είχε μικρή πιθανότητα επιτεύξεως στην πράξη και προτείνουν μια εμπειρική σχέση:

$$\sigma_{cu} = K\sigma_{mu} - bU_f \qquad (2.22)$$

όπου K ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων και b μια σταθερά εξαρτώμενη από την πρόσφυση κόκκου-μήτρας.

Ο Landon πρότεινε και αυτός με τη σειρά του εξίσωση όμοια με:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - U_f) - K U_f d \qquad (2.23)$$

όπου d είναι η μέση διάμετρος κόκκου και K είναι η κλίση στο διάγραμμα εφελκυόμενης αντοχής μέσης διαμέτρου κόκκου.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών	
11	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης	

2.5.1.3 Η εξίσωση των LEIDNER-WOODHAMS

Ο Leidner [40] ανέπτυξε μια απλούστερη αλλά πιο λεπτομερή προσέγγιση όπου το μοντέλο του σύνθετου υλικού αποτελείται από σφαιρικούς κόκκους μέσα σε μη ελαστική μήτρα. Για να εφαρμοστεί η θεωρία ενισχύσεως [41] το μέγεθος του κόκκου θα προσεγγιστεί στον κύλινδρο. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσδιορισθεί η κατανομή των τάσεων στο έγκλεισμα στο σημείο θραύσεως.

Στη περίπτωση που οι κόκκοι δεν είναι καλά συνδεδεμένοι η μεταβίβαση τάσεως ανάμεσα στον κόκκο και την μήτρα υποτίθεται ότι γίνεται ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της τριβής του κόκκου με τη μήτρα και των παραμένουσων θλιπτικών τάσεων οι οποίες ενεργούν πάνω στην ενδιάμεση επιφάνεια κόκκου και μήτρας.

Αντίθετα στην περίπτωση που έχουμε καλά συνδεδεμένους κόκκους οι τάσεις μεταβιβάζονται δια μέσου μηχανισμού διάτμησης. Η μέγιστη τάση είναι στο κόκκο, συνεπώς εξαρτάται από την αντοχή του δεσμού κόκκου-μήτρας.

Η τελική εφελκυστική τάση (αντοχή) του σύνθετου ελήφθη απλά ως το άθροισμα του μεγίστου φορτίου που αναλαμβάνεται από την μήτρα και από το έγκλεισμα και δίνεται ως:

$$\sigma_{cu} = (\sigma_{\alpha} + 0.83\tau_m) + \sigma_{\alpha} K(1 - U_f) \qquad (2.24)$$

για τη περίπτωση που έχουμε καλή πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων ενώ για τη περίπτωση μη προσφύσεως μεταξύ των δύο φάσεων ο παραπάνω τύπος έχει ως εξής:

$$\sigma_{cu} = 0,83\sigma_{th}aU_f + k\sigma_{mu}(1 - U_f) \qquad (2.25)$$

τα σ_α και σ_{mu} είναι η αντοχή του ενδιάμεσου επιφανειακού δεσμού και η αντοχή της μήτρας αντιστοίχως, τ_m είναι η αντοχή σε διάτμηση της μήτρας, Κ είναι ο συντελεστής συγκεντρώσεως τάσεων, k είναι μια παράμετρος η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων σ_{th} είναι η θλιπτική θερμική τάση η οποία ενεργεί επάνω στο σύνορο του κόκκου και α είναι ο συντελεστής τριβής.

Αρκετοί προσπάθησαν τον συσχετισμό της αντοχής των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κόκκους με την διάμετρο d των εγκλεισμάτων. Παραδείγματος χάριν, ο Hojo έχει βρει ότι η αντοχή εποξειδικής ρητίνης με εγκλείσματα πυριτίου ελαττώνεται όταν το μέγεθος κόκκου αυξάνει ακολουθώντας μια σχέση της παρακάτω μορφής:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} k d^{-1/2} \qquad (2.26)$$

όπου k είναι σταθερά και η d είναι η μέση διάμετρος κόκκου.

Ο Schrager πρότεινε κάποιο μοντέλο που περιγράφεται από της διαφορετικής μορφής από τις προηγούμενες που είναι:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} \exp(-rU_f) \qquad (2.27)$$

με r=2,66 που βρέθηκε πειραματικά.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 12 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης Αυτό το μοντέλο έχει το μειονέκτημα ότι είναι ακριβώς για περιορισμένη περιοχή εγκλεισμάτων. Η εξ.(2.26) είναι αντίστοιχη με εκείνη που προτάθηκε από το Passmore για την περίπτωση των πορωδών συστημάτων:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{f_0} \exp(-aP) \qquad (2.28)$$

όπου σ_{f_0} είναι η αντοχή τις μήτρας χωρίς πόρους, α μια σταθερά και P η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε πόρους.

2.5.2 Περιορισμοί των θεωρητικών μοντέλων σχετικά με την αντοχή των σύνθετων υλικών:

Η αντοχή σε εφελκυσμό των συστημάτων επηρεάζεται καταλυτικά από το μέγεθος των κόκκων. Έχει παρατηρηθεί ότι με την ελάττωση του μεγέθους των κόκκων η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνει. Η αύξηση της ενδιάμεσης επιφάνειας μεταξύ δύο φάσεων παρέχει έναν πολύ αποτελεσματικό δεσμό στην επιφάνεια μεταξύ δύο φάσεων παρέχει έναν πολύ αποτελεσματικό δεσμό στην επιφάνεια μεταξύ των δύο φάσεων και θεωρείται ότι είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Υπάρχει επίσης συσχέτιση του μεγέθους του κόκκου από το μέγεθος της ατέλειας του υλικού.

Ο Goodier έχει αποδείξει ότι το τασικό πεδίο κοντά σ' ένα κόκκο, είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος του κόκκου. Επειδή όμως η αύξησης του μεγέθους του κόκκου επιφέρει και αύξηση του όγκου του πολυμερούς που υφίσταται συγκέντρωση τάσεων, η πιθανότητα εύρεσης μιας μεγάλης ατέλειας αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου.

Η επίδραση από την διεπιφανειακή πρόσφυση επί της αντοχής μπορεί να δικαιολογηθεί με όμοιο τρόπο εφόσον ένας αδύναμος δεσμός μεταξύ εγκλεισμάτων και μήτρας θα δράσει ως μια υπάρχουσα ατέλεια που θα παράγει μια κοιλότητα ίση με το μέγεθός της.

Το σχήμα του εγκλείσματος αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της αντοχής του συστήματος εγκλεισμάτων. Στη περίπτωση που τα εγκλείσματα δεν έχουν κανονική μορφή υπάρχει εξασθένιση της αντοχής του συστήματος εγκλεισμάτων που οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση τάσεων που συζευγνύεται με επίδραση μεγέθους. Για σφαιρικές ρωγμές ή εγκλείσματα η συγκέντρωση τάσεως είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με εγκλείσματα με οξείες γωνίες.

Τα παραπάνω μοντέλα έχουν ένα άνω όριο στην αντοχή ενός συστήματος εγκλεισμάτων που οφείλεται στους παραπάνω λόγους που αναφέραμε και αναλύσαμε προηγουμένως.

Η χρήση του νόμου των δυνάμεων (power law) για την πρόβλεψη της αντοχής του υλικού η εκλογή των κατάλληλων σταθερών επηρεάζεται από το σχήμα των κόκκων και η διάταξή τους μέσα στο γεωμετρικό μοντέλο. Επιπλέον η συγκέντρωση τάσεων θα χαμηλώσει αυτές τις τιμές κατά ακαθόριστη ποσότητα.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών	
13	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης	

Από την άλλη, στις αναλύσεις των Leidner και Woodhams, οι θερμικές τάσεις σ_{th} και της αντοχής του δεσμού μήτρας-κόκκου σ_c είναι δύσκολο να μετρηθούν για πραγματικά σύνθετα υλικά. Για τις πολύ χαμηλές περιεκτικότητες κατ' όγκο U_f μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για τις θέρμικές τάσεις[42], αλλά σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες κατ' όγκο U_f οι υπολογισμοί περιπλέκονται από την παρουσία γειτονικών κόκκων.

<u>2.5.2.1 Παραμόρφωση θραύσης των κοκκωδών σύνθετων υλικών:</u>

Παρακάτω θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στα διάφορα θεωρητικά μοντέλα που έχουν προβλεφθεί από τους διάφορους ερευνητές για την παραμόρφωση θραύσης.

Ο Smith [43] πρότεινε με $ε_c$ και $ε_m$ την παραμόρφωση θραύσης του σύνθετου και της μήτρας αντίστοιχα:

$$\varepsilon_{c} = \varepsilon_{m} (1 - 1, 106 U_{f}^{1/3})$$
 (2.29)

Ο Bueche [44] πρότεινε και αυτός με την σειρά του μια εξίσωση χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο από κυβικά σωματίδια σε κυβική διάταξη:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m (1 - U_f^{-1/3}) \qquad (2.30)$$

Ο Nielsen εισήγαγε μια εξίσωση που έχει την ίδια μορφή με την παραπάνω εξίσωση:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m (1 - U_f^{-1/3}) \qquad (2.31)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις στηρίζονται περισσότερο στο πείραμα και πολύ λιγότερο στη θεωρία. Περιγράφουν τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά με κοκκώδες έγκλεισμα και παρουσιάζουν την επίδραση διαφόρων παραγόντων της, της κατ' όγκο περιεκτικότητας του εγκλείσματος, των συσσωματωμάτων, του μεγέθους των σωματιδίων, του μέτρου πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών.

2.6 Η ενισχυτική δράση των εγκλεισμάτων στα πολυμερή:

Με την ενσωμάτωση στη μήτρα του πολυμερούς [21] πολύ λεπτών σωματιδίων (κόκκων), ινωδών υλικών, ανόργανης ή οργανικής φύσης έχουμε αλλαγή των φυσικοχημικών, θερμικών, μηχανικών, ηλεκτρικών και άλλων ιδιοτήτων του υλικού, αν και ως βασικότερο σκοπό έχουμε τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών	
14	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης	

Τα εγκλείσματα που ενσωματώνονται διακρίνονται σε ενεργά και αδρανή. Ενεργά ονομάζονται εκείνα που προκαλούν ενίσχυση, ενώ αδρανή αυτά που δεν βελτιώνουν τις ιδιότητες του υλικού, αλλά μπορούν να προκαλέσουν μόνο αλλαγή χρωματισμού και μείωσης κόστους. Τα ενεργά εγκλείσματα με τη σειρά τους διακρίνονται ανάλογα με τη δραστηριότητά τους και μπορεί να χαρακτηρισθεί ως δομική, κινητική και θερμοδυναμική.

Με τον όρο δομική δραστηριότητα νοείται η ικανότητα του εγκλείσματος να επηρεάζει τη δομή του πολυμερούς. Επομένως με την ενσωμάτωση των εγκλεισμάτων στη μήτρα παρατηρούνται αλλαγές στο μέγεθος, στο σχήμα και στη κατανομή των δομικών μονάδων. Ενώ με τον όρο κινητική δραστηριότητα εννοείται η ικανότητα του εγκλείσματος να επηρεάζει διάφορες θερμοδυναμικές παραμέτρους του σύνθετου υλικού.

Η ενέργεια θραύσης W του πολυμερούς συσχετίζεται με την ενίσχυση του υλικού λόγο των εγκλεισμάτων. Ισούται με το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων. Με L_b το μήκος του δοκιμίου στη θραύση Lo το αρχικό μήκος και σ η εφαρμοζόμενη τάση.

$$W = \int_{L_o}^{L_b} \sigma dL \qquad (2.32)$$

Αποτέλεσμα της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων στα πολυμερή στην ελαστική κατάσταση είναι η αύξηση της ενέργειας θραύσης ανά μονάδα όγκου με την παρουσία εγκλεισμάτων. Για το λόγο αυτό τα εγκλείσματα που αυξάνουν την ενέργεια θραύσης θεωρούνται ενεργά, ενώ εκείνα που δεν την αυξάνουν θεωρούνται αδρανή. Το ποσό της αύξησης ή της ελάττωσης εξαρτάται από τη φύση του εγκλείσματος. Το ποσό του εγκλείσματος που κάνει πιθανή την ύπαρξη κάποιας ενδιάμεσης φάσης ή ενδιαμέσου στρώματος μεταξύ των σωματιδίων ονομάζεται θεωρητικό όριο της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα.

Υπάρχει ένας άλλος τρόπος ελέγχου της ενισχυτικής δράσης των εγκλεισμάτων και είναι η επίδραση των εγκλεισμάτων στην αντοχή των σύνθετων υλικών. Η αντοχή αυτή επηρεάζεται από πάρα πολλούς παράγοντες λόγω της αλληλεπίδρασης της μήτρας και του εγκλείσματος. Οι φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού επηρεάζονται, επίσης, από τη διαφοροποίηση της δομής της ενδιάμεσης φάσης.

Με βάση τις άνωθεν παρατηρήσεις μπορεί να υποστηριχθεί ότι η μηχανική αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει ανάλογα με τη περιεκτικότητα και τη λεπτότητα του εγκλείσματος. Η προσθήκη λεπτών κοκκωδών σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των πολυμερών που οφείλεται στο σχηματισμό ενός συνεχούς ενισχυτικού σκελετού, σαν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους. Παράλληλα η αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνει με τη περιεκτικότητα σε έγκλεισμα, με τη βέλτιστη (optimum) περιεκτικότητα όπου προκαλείται κορεσμός των κέντρων προσρόφησης μακρομορίων επάνω στην επιφάνεια του εγκλείσματος [2].

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
15	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

2.7 Ενέργεια θραύσης-στερρότητα

Τα υλικά αντιδρούν με δύο θεμελιώδεις τρόπους στην επιβολή εξωτερικών δυνάμεων και αυτοί είναι η αλλαγή του όγκου τους ή η αλλαγή του σχήματός τους. Η αλλαγή όγκου ενός στοιχειώδους κύβου μπορεί να γίνει με ομοιόθετη αλλαγή όλων των γραμμικών διαστάσεων και προφανώς θα πρέπει να εξαρτάται μόνον από τις ορθές συνιστώσες των τάσεων. Σε αυτή τη περίπτωση ο στοιχειώδης κύβος διατηρεί το σχήμα του αλλά με νέες διαστάσεις των ακμών του. Η αλλαγή σχήματος μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

A) Με αλλαγή των γωνιών του κύβου χωρίς αισθητή αλλαγή των γραμμικών του διαστάσεων (π.χ περίπτωση καθαρής διατμήσεως).

B) Με ομοιόθετη αλλαγή των γραμμικών διαστάσεων του στοιχειώδους κύβου, οπότε αυτός μετατρέπεται σε στοιχειώδες ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Αυτό βέβαια έχει ως αποτέλεσμα ότι μερικές γωνίες, θα αλλάξουν τιμή, όπως εκείνες των διαγωνίων του. Επομένως, η αλλαγή σχήματος επιτυγχάνεται από ορθές και διατμητικές τάσεις.

Για τις αλλαγές αυτές απαιτείται η επιβολή εξωτερικού έργου που προσφέρεται από τη μηχανή επιβολής φορτίων. Το έργο αυτό αποθηκεύεται στο δοκίμιο ως ενέργεια παραμορφώσεως, η οποία αποτελείται από δύο προσθετέους, έναν που αντιστοιχεί στην αλλαγή όγκου και ονομάζεται ενέργεια μεταβολής όγκου και έναν που αντιστοιχεί στις αλλαγές σχήματος ή στρέβλωσης του υλικού και καλείται στροφική ενέργεια. Το άθροισμα αυτών των δύο είναι ίσο με το σύνολο της ενέργειας παραμορφώσεως που αποθηκεύτηκε στο υλικό και ισούται με το έργο των εξωτερικών δυνάμεων που δαπανήθηκε για τη φόρτιση του δοκιμίου.

Το εμβαδόν του χωρίου ανάμεσα στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και τον άξονα παραμορφώσεων παριστάνει τη συνολική πυκνότητα της ενέργειας των παραμορφώσεων που έχει αποθηκευθεί στο υλικό ή καταναλωθεί από αυτό από την αρχή της φορτίσεως μέχρι τη στιγμή που η τάση είναι σ και η αντίστοιχη παραμόρφωση ε. Όταν το ζεύγος αυτών των δύο τιμών αντιστοιχεί στο σημείο θραύσεως Θ του υλικού τότε η συνολική πυκνότητα της ενέργειας παραμορφώσεων καλείται στερρότητα (toughness) του υλικού και αποτελεί μέτρο της απαιτούμενης από το υλικό ενέργειας για τη θραύση.

Σελίδα 16 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u> <u>ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ-ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ</u> ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Υλικά κατασκευής δοκιμίων

Εμείς σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με δοκίμια τα οποία έχουν κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ. Τα δοκίμια αυτά είναι κατασκευασμένα από σύνθετο υλικό του οποίου η μήτρα αποτελείται από ένα σύστημα εποξειδικής ρητίνης – σκληρυντή της εταιρείας Shell. Χρησιμοποιήθηκε ρητίνη ΕΡΙΚΟΤΕ 828 LV (low viscocity) η οποία παρασκευάζεται από bishenol A και epichlorohydrin απουσία διαλυτών. Η περιεκτικότητά της σε επόξυ ομάδα είναι 5340-5500 m mol/kg. Το ιξώδες της κυμαίνεται ανάμεσα στα 10-12 Pa.s για 25°C. Η πυκνότητά της είναι 1,16 kg/l στους 25°C. Όσο αναφορά το σκληρυντή, ο σκληρυντής είναι ΕΡΙLINK 177 με ισοδύναμο -95 και το ιξώδες του να κυμαίνεται από 0.25-0.7 Pa.s στους 25°C. Η αναλογία του σκληρυντή και της ρητίνης για το σύνθετο υλικό είναι 50 p.h.r. Τέλος χρησιμοποιήθηκε πλαστικοποιητής D.O.P σε αναλογία 0,10,20,30 και 40 p.h.r. Η προσθήκη του πλαστικοποιητή έχει σκοπό να μειωθεί η ψαθυρότητα του συστήματος ρητίνης και σκληρυντή.

Ως εγκλείσματα χρησιμοποιήσαμε κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (SiC) με μέση τιμή κόκκων 0.046mm και σε τέσσερις διαφορετικές κατ' όγκο περιεκτικότητες (0%, 5%, 10%, 20% και 30%) και παρουσία 20% πλαστικοποιητή.

 Μέτρο ελαστικότητας Ε: 	$400 \text{X} 10^9 \text{ N} / m^2$
 Τάση θραύσης εφελκυσμού $\sigma_{c-εφ}$: 	$250X10^6 N / m^2$
- Τάση θραύσης θλίψης $\sigma_{c-\theta\lambda\iota\psi}$:	$650 \times 10^6 \mathrm{N}/m^2$
 Λόγος Poisson ν: 	0.2
– Πυκνότητα ρ:	$3.17 gr/cm^3$

Το SiC έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

Λόγω του ότι παρατηρήθηκαν κάποιες μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών για τα μέτρα ελαστικότητας του SiC, θεωρήσαμε αναγκαίο να μελετήσουμε και άλλα πειραματικά δεδομένα που είχαν γίνει παλιότερα στο κτήριο αντοχή υλικών (K.A.Y) με εγκλείσματα σιδήρου (Fe) και αλουμινίου (Al). Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι για τα δοκίμια με εγκλείσματα (SiC) δεν είμαστε σίγουροι για τον τρόπο με τον οποίο έγινε η παρασκευή και η κατασκευή των δοκιμίων επειδή είχαν κατασκευαστεί στο πλαίσιο εκπόνησης διπλωματικών εργασιών.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
17	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Ο σίδηρος (Fe) έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

 Μέτρο ελαστικότητας Ε: 	$210X10^{9}N/m^{2}$
 Λόγος Poisson ν: 	0.29
 Πυκνότητα ρ: 	$7.874 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Το αλουμίνιο (Al) αντίστοιχα έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

 Μέτρο ελαστικότητας Ε: 	$70X10^9$ N/m ²
– Λόγος Poisson ν:	0.33
 Πυκνότητα ρ: 	2.7 gcm^{-3}

Για το σύστημα ρητίνη-σκληρυντής-πλαστικοποιητής υπολογίσαμε μετά από μετρήσεις το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο του Poisson σε συνθήκες υγρασίας και μη.

<u>Κατασκευή και προετοιμασία των δοκιμίων:</u>

Κατ' αρχάς πρέπει να θερμάνουμε τη ρητίνη στου 35-40°C διότι με αυτό τον τρόπο μειώνεται το ιξώδες της, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη στη χρήση. Επίσης η θέρμανση της ρητίνης μειώνει τη πιθανότητα κρυστάλλωσής της λόγω της αποθήκευσής της σε χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά κατά τη περίοδο του χειμώνα. Σε κάθε καλούπι πρέπει να υπάρχει μια αναλογία μαζών μεταξύ πλαστικοποιητή και σκληρυντή. Πιο συγκεκριμένα έχουμε $m_{\sigma\kappa\lambda} = 0.5m_{\rho\eta\tau}$ και $m_{\pi\lambda} =$ ποσοστ.πλαστικοποιητή× $m_{\rho\eta\tau}$. Στη συνέχεια η μάζα των κόκκων που πρέπει να προσθέσουμε σε κάθε καλούπι προκύπτει σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση,

$$\alpha = \frac{V_{sic}}{V_{o\lambda}} = \frac{\frac{m_{sic}}{d_{sic}}}{\frac{m_{\rho\eta\tau}}{d_{\rho\eta\tau}} + \frac{m_{\sigma\kappa\lambda}}{d_{\sigma\kappa}} + \frac{m_{\pi\lambda}}{d_{\pi\lambda}} + \frac{m_{sic}}{d_{sic}}}$$
(3.1)

όπου με α συμβολίζουμε τη περιεκτικότητα σε κόκκους που είναι 0%,5%,10%,20% και 30%. Οι πυκνότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι γνωστές, άρα έχουμε ότι:

$$d_{\rho\eta\tau} = 1.16 gr / cm^3$$
$$d_{\sigma\kappa\lambda} = 0.97 gr / cm^3$$

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$d_{\pi\lambda} = 0.984 gr / cm^3$$
$$d_{sic} = 3.17 gr / cm^3$$

Επομένως αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση (3.1) αυτή θα πάρει την εξής μορφή:

$$m_{_{sic}} = \frac{a}{1-a} 4.964 m_{\rho\eta\tau}$$
 (3.2)

Γενικά για τη μάζα του εγκλείσματος ισχύει ότι:

$$m_{sic} = \beta m_{\rho\eta\tau} \qquad (3.3)$$

Την παραπάνω σχέση μπορούμε να τη χρησιμοποιούμε στην υγροαπορρόφηση για να μπορέσουμε να κάνουμε αναγωγή στη μήτρα.

Για να υπολογίσουμε τις μάζες των επιμέρους υλικών πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τις παρακάτω σχέσεις που ισχύουν:

$$m_{\rho\eta\tau} + m_{\sigma\kappa\lambda} + m_{\pi\lambda} + m_{sic} = M \tag{3.4}$$

και με βάση ακόμη τη σχέση που συσχετίζει τη μάζα της ρητίνης με τη μάζα του συνολικού βάρους του δοκιμίου:

$$m_{on\tau} = M / (1.7 + \beta)$$
 (3.5)

Επομένως ζυγίζοντας το κάθε δοκίμιο π.χ M gr, από το συνολικό βάρος αφαιρούμε το βάρος των κόκκων μιας και οι κόκκοι θεωρούμε ότι δεν απορροφούν καθόλου υγρασία. Έτσι μας απομένει το καθαρό βάρος της μήτρας η οποία αποτελείται από το σύστημα ρητίνη-πλαστικοποιητήςσκληρυντής.

Αρχικά τοποθετούμε σε ένα πυρίμαχο δοχείο (pyrex) τη ρητίνη που έχουμε θερμάνει μαζί με το πλαστικοποιητή και ανακατεύουμε το μίγμα για αρκετή ώρα. Ύστερα, προσθέτουμε το σκληρυντή και ανακατεύουμε πάλι για λίγα λεπτά. Τέλος, προσθέτουμε τους κόκκους του εγκλείσματος. Οι ποσότητες των υλικών που προσθέσαμε είχαν υπολογιστεί βάσει των παραπάνω τύπων. Λόγω της ανάδευσης των υλικών για τη μέγιστη δυνατή ομοιογένεια του μίγματος έχουν δημιουργηθεί φυσαλίδες αέρα οι οποίες έχουν εγκλωβιστεί μέσα στο μίγμα, οπότε είναι απαραίτητο να τοποθετήσουμε το μίγμα σ' ένα θάλαμο κενού για απελευθερωθούν οι φυσαλίδες αέρα. Η διαδικασία αυτή πρέπει να μην ξεπεράσει τα 30 λεπτά προκειμένου το σύνθετο να μην αρχίσει να σκληραίνει πριν ολοκληρωθεί η απόχυση.

Στη συνέχεια γίνεται η απόχυση του μίγματος σε καλούπια από υλικό plexiglass, τα οποία τα έχουμε επαλείψει με ειδικό αποκολλητικό κερί. Το αποκολλητικό κερί χρησιμοποιείται για να είναι

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 19 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης πιο εύκολη η αφαίρεση των καλουπιών και να μη δημιουργηθούν στην επιφάνεια του δοκιμίου μικρορωγμές και η επιφάνεια του να είναι ομοιόμορφη και απαλλαγμένη από πόρους και μικροκενά. Το μίγμα μένει μέσα στο καλούπι για 24 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με τη συμπλήρωση του 24ώρου το υλικό αρχίζει να στερεοποιείται και το αφαιρείται από τα καλούπια.

Τέλος τοποθετούμε τα δοκίμια σε φούρνο με σταθερή θερμοκρασία 80°C για 48 ώρες ώστε να τερματισθούν οι αντιδράσεις της σκλήρυνσης. Αύτη η μετασκλήρυνση που ακολουθούμε είναι απαραίτητη έτσι ώστε οι ιδιότητες των δοκιμίων να είναι ανεξάρτητες από τις συνθήκες αποθήκευσης των δοκιμίων.

3.2 Μετρήσεις υδροαπορροφητικότητας

Πριν από τη παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων για το προσδιορισμό της υδροαπορροφητικότητας θα παραθέσουμε την προδιαγραφή ASTM D 570 που αναφέρεται στην υδροαπορροφητικότητα των πλαστικών.

3.2.1 Προδιαγραφή ASTM D 570

<u>3.2.1.1 Σκοπός</u>

Η μέθοδος αυτή καλύπτει το προσδιορισμό του ποσοστού απορρόφησης ύδατος των πλαστικών, όταν εμβαπτίζονται σε αυτό και εφαρμόζεται στις δοκιμές όλων των τύπων των πλαστικών συμπεριλαμβανομένων των εποξειδικών ρητινών θερμής και ψυχρής απόχυσης, ομογενών πλαστικών υπό μορφή πολυστρωμάτων (laminates) τα οποία μπορούν να είναι ράβδοι (rod) ή ράβδοι με κοιλότητα (tube) καθώς επίσης και φύλλα (sheet) πάχους 0.13mm και άνω.

<u>3.2.1.2 Σημασία</u>

Η δοκιμή υδροαπορροφητικότητας έχει δύο βασικές χρήσεις. Πρώτον, σαν οδηγός του ποσοστού απορροφούμενου ύδατος από ένα υλικό και συνεπώς, στις περιπτώσεις όπου οι σχέσεις μεταξύ υγρασίας και μηχανικών ή ηλεκτρικών ιδιοτήτων, διαστάσεων ή εμφάνισης έχουν προσδιορισθεί, σαν οδηγός για την επίδραση της έκθεσης σε ύδωρ ή σε συνθήκες υγρασίας επί αυτών των ιδιοτήτων και δεύτερον σαν μια δοκιμή ελέγχου της ομοιομορφίας ενός υλικού. Η τελευταία είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη σε φύλλα και ράβδους γεμάτες ή με κοιλότητα, όταν η δοκιμή γίνεται επί του τελικού προϊόντος.

Το ποσοστό υδροαπορροφητικότητας ενός πλαστικού είναι στενά συνδεδεμένο με ιδιότητες όπως η αντίσταση ηλεκτρικής μόνωσης (electrical insulation resistance), διηλεκτρικές απώλειες (dielectric losses), μηχανική αντοχή, εμφάνιση και διαστάσεις. Η επίδραση της μεταβολής της περιεκτικότητας υγρασίας λόγω απορρόφησης ύδατος, επί αυτών των ιδιοτήτων, εξαρτάται

σημαντικά από τον τύπο έκθεσης (εμβάπτιση σε ύδωρ ή έκθεση σε υψηλή εργασία), από το σχήμα του σώματος και από τις ιδιότητες του πλαστικού. Σε μη ομογενή υλικά όπως τα πολυστρώματα, το ποσοστό απορρόφησης ύδατος μπορεί να είναι διαφορετικό σε κάθε κομμένο άκρο και επιφάνεια πλάκας. Ακόμα και σε ομοιογενή υλικά μπορεί να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο σε επιφάνειες οι οποίες προέκυψαν από αποκοπή παρά σε εκείνες που προέκυψαν από απόχυση σε τύπους (καλούπια). Συνεπώς προσπάθειες συσχετισμού της υδροαπορροφητικότητας με το εμβαδόν επιφανειών πρέπει να είναι γενικά περιορισμένες σε υλικά τα οποία συγγενεύουν και σε υλικά τα οποία διαμορφώθηκαν με τον ίδιο τρόπο. Για υλικά μεταβαλλόμενης πυκνότητας, η σχέση των τιμών υδροαπορροφητικότητας ανά όγκο ή ανά βάρος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

3.2.1.3 Συσκευές (Εξαρτήματα)

- Ζυγός: Ένας ζυγός με ακρίβεια 0.0001g
- Κλίβανος: Με δυνατότητα διατήρησης ομοιόμορφων θερμοκρασιών 500°C, με απόκλιση 3°C και 105°C έως 110°C.

<u>3.2.1.4 Δοκίμια</u>

Η προδιαγραφή δίνει διαστάσεις ανάλογα με τη μορφή του υλικού. Για πλαστικά απόχυσης σε τύπους τα δοκίμια έχουν σχήμα δίσκου. Για ελάσματα ή φύλλα τα δοκίμια έχουν σχήμα δοκού με διατομή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Για ράβδους, τα δοκίμια ελέγχου αποτελούν τμήμα αυτών, ενώ για σωλήνες ή ράβδους με κοιλότητα τα δοκίμια αποκόπτονται από το συμπαγές τμήμα κατά την αξονική ή περιφερειακή διεύθυνση ανάλογα με την εσωτερική διάμετρο. Στη περίπτωσή μας, επειδή τα δοκίμια για τον έλεγχο της υδροαπορροφητικότητας χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εύρεση της αντοχής σε θλίψη, οι διαστάσεις είναι αυτές που συνιστώνται από την αντίστοιχη προδιαγραφή ASTM S 695.

Τα δοκίμια ελέγχου για φύλλα, ράβδους και σωλήνες θα αποκόπτονται και θα κατεργάζονται από το υλικό ώστε να έχουν λείες ακραίες επιφάνειες χωρίς ρωγμές. Οι επιφάνειες αποκοπής θα λειαίνονται με σμυριδόχαρτο. Η κοπή, η κατεργασία και η λείανση θα έχει αργό ρυθμό, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική θέρμανση του υλικού.

Σημείωση: Εάν υπάρχει λάδι στην επιφάνεια του δοκιμίου μετά την κατεργασία, τότε αυτό πρέπει να πλένεται με ένα ύφασμα εμβαπτιζόμενο σε πετρέλαιο και μετά να στεγνώνεται με άλλο. Έπειτα να αφήνεται στον αέρα, ώστε να εξατμίζεται το πετρέλαιο. Εάν το πετρέλαιο επιδρά στο πλαστικό τότε πρέπει να χρησιμοποιείται κατάλληλο διαλυτικό ή απορρυπαντικό το οποίο θα εξατμίζεται εντός δύο ωρών.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικώ 21 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.2.1.5 Προετοιμασία δοκιμίων

Επειδή τα δοκίμια αποτελούνται από υλικά που σε θερμοκρασία γύρω στους 110°C η τιμή της υγροαπορροφητικότητας μπορεί να επηρεασθεί σημαντικά για αυτό το λόγο αποξηραίνονται μέσα σε κλίβανο για 24 ώρες και σε θερμοκρασία περίπου 50°C με απόκλιση 3°C. Ύστερα θα ψυχθούν σε αποστεγνωτήρα και αμέσως μετά θα ζυγιστούν με ακρίβεια 0.0001g. Για δοκίμια τα υλικά των οποίων η τιμή της υδροαπορροφητικότητας δεν επηρεάζεται σημαντικά για θερμοκρασία 110°C, θα αποξηρανθούν μέσα σε κλίβανο για τιμών της υδροαπορροφητικότητας με άλλα πλαστικά τότε τα δοκίμια θα προετοιμασθούν σύμφωνα με τη πρώτη παράγραφο.

3.2.1.6 Διαδικασία εμβάπτισης

<u>Εμβάπτιση 24 ωρών</u>

Τα δοκίμια τα οποία προετοιμάσθηκαν σύμφωνα με τη προηγούμενη παράγραφο τοποθετούνται εντός της θερμομπανιέρας με αποσταγμένο ύδωρ θερμοκρασίας 22°C έως 24°C. Πρέπει τα δοκίμια να καλύπτονται πλήρως. Ύστερα από 24 ώρες τα δοκίμια αφαιρούνται ένα κάθε φορά και αφού σκουπιστούν, ζυγίζονται αμέσως με ακρίβεια 0.001g.

Εμβάπτιση 2 ωρών

Για δοκίμια από υλικά τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό απορροφητικότητας όπως επίσης και για λεπτά δοκίμια τα οποία είναι από υλικά τα οποία μπορούν να έχουν σημαντική αύξηση βάρους. Τα δοκίμια ύστερα από 120 min με απόκλιση 4 min τα αφαιρούμε από τη μπανιέρα. Όλη η υπόλοιπη διαδικασία είναι ίδια με αυτή της εμβάπτισης 24 ωρών.

Επαναλαμβανόμενη εμβάπτιση

Το δοκίμιο ζυγίζεται με ακρίβεια 0.0001g ύστερα από την εμβάπτισή του για 2 ώρες εντός του ύδατος, ύστερα τοποθετείται εκ νέου στο ύδωρ και ζυγίζεται πάλι μετά από 24 ώρες.

Εμβάπτιση μακράς διάρκειας

Τα δοκίμια εμβαπτίζονται για 24 ώρες μέσα σε αποσταγμένο ύδωρ και ύστερα από τη συμπλήρωση του παραπάνω χρονικού διαστήματος θα αφαιρεθούν και θα ακολουθηθεί η διαδικασία που ακολουθείται και για αυτή των 24 ωρών. Στη συνέχεια τοποθετούνται εκ νέου μέσα στο νερό, οι ζυγίσεις επαναλαμβάνονται στο τέλος της 1^{ης} και μετά κάθε δύο εβδομάδες έως ότου η αύξηση του βάρους εντός δύο εβδομάδων να είναι λιγότερη απο1% της συνολικής αύξησης του βάρους ή ίση με 5mg. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να κορεσθεί το δοκίμιο. Τέλος υπολογίζοντας τη διαφορά του βάρους του δοκιμίου μετά το κορεσμό και του βάρους του δοκιμίου μετά την αρχική αποξήρανση, κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας, υπολογίζουμε το απορροφηθέν ύδωρ μετά το κορεσμό.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
22	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Εμβάπτιση 2 ωρών εντός ύδατος σε βράση

Τοποθετούνται τα δοκίμια ολικά εντός του δοχείου με απεσταγμένο ύδωρ το οποίο βρίσκεται σε βράση. Μετά από 120 min με απόκλιση 4 min αποσύρονται τα δοκίμια από το δοχείο και ψύχονται με την εμβάπτισή τους σε αποσταγμένο ύδωρ θερμοκρασίας δωματίου. Ύστερα από τη πάροδο 15 min με απόκλιση 1 min τα δοκίμια αφαιρούνται από το ύδωρ ανά ένα κάθε φορά και αφού σκουπίζονται με ύφασμα ζυγίζονται αμέσως σε ζύγο με ακρίβεια 0.0001g.

Εμβάπτιση 30 min εντός ύδατος σε βράση

Για δοκίμια από υλικά τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό απορροφητικότητας όπως επίσης και για λεπτά δοκίμια τα οποία είναι από υλικά τα οποία μπορούν να έχουν σημαντική αύξηση βάρους εντός 30 min, τα δοκίμια θα ελέγχονται όπως περιγράφεται στη προηγούμενη παράγραφο εκτός του ότι ο χρόνος εμβάπτισης στο ύδωρ έχει περιοριστεί στα 30 min με απόκλιση 1 min.

<u>Εμβάπτιση σε 50°C</u>

Τα δοκίμια που έχουν προετοιμαστεί δοκιμάζονται όπως έχει περιγράφεί στην παράγραφο που αναφέρεται στην εμβάπτιση 2 ωρών εντός ύδατος σε βράση με τη διαφορά ότι το ύδωρ θα είναι σε θερμοκρασία 50°C με απόκλιση 1°C και ο χρόνος εμβάπτισης θα είναι 48 ώρες με απόκλιση 2 ώρες. Παραλείπεται, επίσης, η ψύξη του δοκιμίου εντός απεσταγμένου ύδατος σε θερμοκρασία δωματίου πριν τη ζύγιση.

Όταν επιθυμείται να γίνει σύγκριση τιμών υδροαπορροφητικότητας με άλλα πλαστικά, τότε θα χρησιμοποιηθεί η διαδικασία εμβάπτισης 24 ωρών και η τιμή ισορροπίας η οποία προσδιορίζεται στη παράγραφο που αναφέρεται στην εμβάπτιση μακράς διαρκείας.

3.2.1.7 Συνοπτική διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων υγροαπορρόφησης

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υγροαπορρόφηση των δοκιμίων της θλίψης είναι η ακόλουθη. Μετά την παραμονή των πλακών στον κλίβανο για 2 ημέρες, με την χρήση κατάλληλου κοπτικού μηχανήματος αργής κοπής σχηματίσαμε τα απαιτούμενα δοκίμια θλίψης τα οποία στην συνέχεια με την βοήθεια ενός λειαντικού τροχού πήραν τις ακριβείς διαστάσεις που επιθυμούσαμε. Κατόπιν έγινε και η πρώτη μέτρηση στον ηλεκτρονικό ζυγό για να βρούμε το αρχικό βάρος του κάθε δοκιμίου. Εν συνεχεία τοποθετήθηκαν εντός της θερμομπανιέρας η οποία περιείχε απεσταγμένο νερό σε θερμοκρασία 50°C. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για περίπου για 35 ημέρες. Με τα ποσοστά υγρασίας που είχαν τότε τα δοκίμια έγιναν τα πειράματα θλίψης. Πρέπει στο σημείο αυτό να επισημανθεί ότι με την βοήθεια κάποιων δοκιμίων που περίσσεψαν συνεχίστηκαν οι μετρήσεις υγροαπορρόφησης. Για κάθε περιεκτικότητα οι τιμές προέκυψαν από τον μέσο όρο 4 δοκιμίων.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
23	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.2.1.8 Επαναληπτική προετοιμασία των δοκιμίων.

Όταν είναι γνωστό ή όταν υπάρχει υποψία ότι τα υλικά περιέχουν σημαντική ποσότητα ουσιών οι οποίες διαλύονται στο ύδωρ, τότε τα δοκίμια μετά την εμβάπτιση θα προετοιμάζονται και πάλι για τον ίδιο χρόνο και την ίδια θερμοκρασία όπως χρησιμοποιήθηκε κατά την αρχική περίοδο ξήρανσης. Ύστερα, θα ψυχθούν μέσα σε ένα αποστεγνωτήρα και αμέσως θα ζυγισθούν ξανά. Εάν το βάρος σε αυτή τη περίπτωση είναι λιγότερο από το βάρος κατά την προετοιμασία, η διαφορά θα θεωρηθεί σαν ύλη η οποία διαλύεται μέσα στο ύδωρ κατά τη διάρκεια εμβάπτισης. Για τέτοια υλικά η τιμή της απορρόφησης ύδατος θα ληφθεί ως το άθροισμα της αύξησης του βάρους κατά την εμβάπτιση και του βάρους της ύλης η οποία διαλύθηκε στο ύδωρ.

<u>3.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΘΛΙΨΗΣ ASTM D- 695 – ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ</u> <u>ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ</u>

<u>3.3.1. Σκοπός</u>

Αυτή η μέθοδος καλύπτει τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πλαστικών όταν καταπονούνται σε θλίψη σε σχετικών ομοιόμορφους ρυθμούς φόρτισης. Χρησιμοποιούνται δοκίμια προδιαγεγραμμένου σχήματος.

3.3.2 Εφαρμόσιμοι κανονισμοί

- 2.1: Προδιαγραφές ASTM
- D618: Προετοιμασία πλαστικών και ηλεκτρικών μονώσεων
- Ε4: Επιβεβαίωση των μηχανών δοκιμής
- Ε83: Επιβεβαίωση και ταξινόμηση μηκυνσιόμετρων

<u>3.3.3 Σημασία</u>

3.3.3.1 Η δοκιμή θλίψεως παρέχει πληροφορίες περί των θλιπτικών ιδιοτήτων των πλαστικών όταν χρησιμοποιούνται υπό συνθήκες που προσεγγίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες γίνονται οι δοκιμές.

3.3.3.2 Οι θλιπτικές ιδιότητες περιλαμβάνουν το μέτρο ελαστικότητας, τη τάση διαρροής, την παραμόρφωση πέρα του ορίου διαρροής και την αντοχή σε θλίψη, εκτός αν το υλικό γίνεται δίσκος αλλά δεν θρίπτεται. Υλικά τα οποία έχουν χαμηλή ολκιμότητα μπορεί να μην παρουσιάσουν όριο διαρροής. Πολλά πλαστικά υλικά συνεχίζουν να παραμορφώνονται σε θλίψη έως όταν γίνουν επίπεδος δίσκος, χωρίς να συμβαίνει μια ευκρινώς προσδιορισμένη θραύση.

3.3.3.3 Οι δοκιμές κοπώσεως παρέχουν μια πρότυπη μέθοδο λήψης δεδομένων για έρευνα και ανάπτυξη, ποιοτικό έλεγχο, αποδοχή ή απόρριψη και ειδικούς σκοπούς. Οι δοκιμές δεν μπορούν

να θεωρηθούν σημαντικές για σχεδιασμό των μηχανών σε εφαρμογές που διαφέρουν αρκετά από τη κλίμακα φορτίο- χρόνος της προτύπου μηχανής.

<u>3.3.4 Ορισμοί</u>

3.3.4.1 Θλιπτική τάση

3.3.4.2 Αντοχή σε θλίψη (θλιπτική αντοχή)

3.3.4.3 Θλιπτική αντοχή αστοχίας

- 3.3.4.4 Θλιπτική βράχυνση
- 3.3.4.5 Θλιπτική παραμόρφωση
- 3.3.4.6 Εκατοστιαία θλιπτική παραμόρφωση
- 3.3.4.7 Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων παραμορφώσεων
- 3.3.4.8 Όριο διαρροής σε θλίψη
- 3.3.4.9 Τάση διαρροής σε θλίψη
- 3.3.4.10-3.3.4.11 Όριο αναλογίας. Τάση πέρα του ορίου αναλογίας
- 3.3.4.12 Μέτρο ελαστικότητας
- 3.3.4.13 Λόγος λυγηρότητας

3.3.4.14 Φορτίο συνθλίψεως

3.3.5 Μηχανές και εξαρτήματα

3.3.5.1 Μηχανή δοκιμής: Οποιαδήποτε μηχανή δοκιμής ικανή να ελέγχει κίνηση με σταθερό ρυθμό φορτίσεων και η οποία περιλαμβάνει τα εξής:

3.3.5.1.1 Οδηγός μηχανισμός: Ένας μηχανισμός για τη παροχή στην κινητή αρπαγή μιας ομοιόμορφου και ελεγχόμενης ταχύτητας ως προς τη βάση (σταθερή αρπαγή).

3.3.5.1.2 Δείκτης φορτίου: Ένας μηχανισμός που δείχνει φορτίο, ικανός για την ένδειξη του συνολικού θλιπτικού φορτίου που φέρει το δοκίμιο. Ο μηχανισμός πρέπει να δείχνει το φορτίο με μια ακρίβεια ±1% της μέγιστης τιμής του φορτίου δοκιμής.

3.3.5.2 Μηκυνσιόμετρο: Ένα κατάλληλο όργανο για τον προσδιορισμό της αποστάσεως μεταξύ δύο σταθερών σημείων του δοκιμίου σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο της δοκιμής. Είναι

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
25	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

επιθυμητό αυτό το όργανο να καταγράφει αυτομάτως αυτή την απόσταση (ή οποιαδήποτε μεταβολή σε αυτή) ως συνάρτηση του φορτίου στο δοκίμιο.

3.3.5.3 Εξαρτήματα θλίψεως: Ένα εξάρτημα για την άσκηση του φορτίου επί του δοκιμίου. Το εξάρτημα αυτό πρέπει να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε η φόρτιση να είναι αξονική (1/1000) και να εφαρμόζεται μέσω επιφανειών που να είναι επίπεδες (0.025mm) και παράλληλες μεταξύ αυτών.

3.3.5.4 Στέλεχος στηρίξεων: Ένα στέλεχος για την στήριξη λεπτών δοκιμίων.

3.3.5.5 Μικρόμετρα: Κατάλληλα μικρόμετρα με δυνατότητα ανάγνωσης μέχρι 0.01mm για τη μέτρηση του πλάτους, πάχους και μήκους δοκιμίων.

<u>3.3.6 Δοκίμια</u>

3.3.6.1 Αυτά τα δοκίμια θα προετοιμαστούν μετά από διαμόρφωση από υλικό σε μορφή ελάσματος, πλάκας, ράβδου, σωλήνα ή τέτοιας μορφής. Όλες οι κατεργασίες θα πρέπει να γίνουν προσεκτικά ώστε να υπάρξουν ομαλές επιφάνειες.

3.3.6.2 Το πρότυπο δοκίμιο, εκτός όσων υποδεικνύονται, θα έχει τη μορφή κυλίνδρου ή πρίσματος, των οποίων το μήκος είναι διπλάσιο του πλάτους ή της διαμέτρου. Προτιμητέα μεγέθη δοκιμίων είναι 12,7x12,7x25,4mm ή 12,7 mm διάμετρος κυλίνδρου και 25,4 mm το ύψος του. Όπου επιθυμείτε ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και η τάση διαρροής, το δοκίμιο θα έχει τέτοιες διαστάσεις ώστε ο λόγος λυγηρότητας να είναι από 11 μέχρι 15:1. Σε αυτή τη περίπτωση οι διαστάσεις είναι 12,7x12,7x50,8 mm για πρίσμα και 12,7x50,8mm για κύλινδρο (διάμετρος-ύψος).

3.3.6.3 Για υλικό σε μορφή ράβδου τα δοκίμια θα έχουν διάμετρο ίση με την διάμετρο της ράβδου και ένα ύψος αρκετό ώστε ο λόγος λυγηρότητας να κυμαίνεται από 11 μέχρι 15:1.

3.3.6.4 Όταν δοκιμάζονται σωλήνες, τα δοκίμια θα έχουν διάμετρο ίση με την διάμετρο του σωλήνα και ύψος 25,4mm για το προσδιορισμό του φορτίου συνθλίψεως (σε ορθή γωνία ως προς το διαμήκη άξονα) το μέγεθος θα είναι το ίδιο με την διάμετρο να γίνεται ύψος.

3.3.6.5-3.3.6.6 Όταν δοκιμάζεται υλικό που περιέχει υποψία για ανισοτροπία, θα κατασκευασθούν δοκίμια των οποίων οι άξονες θα είναι παράλληλοι με την κάθετο προς τη υποτιθέμενη διεύθυνση της ανισοτροπίας.

3.3.6.7 Τα κάτωθι δοκίμια θα χρησιμοποιηθούν για πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, ή για άλλα υλικά όταν είναι απαραίτητο να υπάρχει συμφωνία με τις απαιτήσεις του λόγου λυγηρότητας ή για να επιτραπεί η προσθήκη ενός εξαρτήματος μετρήσεως ης παραμόρφωσης.

3.3.6.7.1 Για υλικά πάχους μεγαλύτερου ή ίσου προς 3,2mm, τα δοκίμια θα έχουν σχήμα πρίσματος διατομής 12,7mm για το πάχος και μήκος τέτοιο ώστε ο λόγος λιγηρότητας να είναι από 11έως 15:1

3.3.6.7.2 Για υλικά πάχους κάτω των 3,2mm ή όπου απαιτείται δοκιμή για το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος λυγηρότητας δεν παρέχει αρκετό μήκος για προσθήκη εξαρτήματος

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
26	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

μέτρησης της θλιπτικής παραμόρφωσης, θα χρησιμοποιηθεί δοκίμιο με διαμόρφωση του ενδιαμέσου τμήματος όπως φαίνεται στο σχήμα.

3.3.6.8 Όταν δοκιμάζεται συνθετικός αφρός (syntactic foam) το πρότυπο δοκίμιο θα έχει τη μορφή κυλίνδρου διαμέτρου 25,4mm και ύψους 50,8mm.

3.3.7 Προετοιμασία δοκιμίων

3.3.7.1 Προετοιμασία: Τα δοκίμια προετοιμάζονται σε 23±2°C και 50±5% σχετική υγρασία σε χρονικό διάστημα όχι μικρότερο από 40 ώρες πριν τη δοκιμή, σύμφωνα με τη διαδικασία Α της προδιαγραφής D618 για τις δοκιμές που απαιτείται προετοιμασία.

3.3.7.2 Συνθήκες δοκιμής: Οι δοκιμές θα εκτελεσθούν σε θερμοκρασία 23±2°C και 50±5% σχετική πυκνότητα εκτός εάν προσδιορίζεται στις μεθόδους δοκιμής.

<u>3.3.8 Δοκίμια</u>

3.3.8.1 Τουλάχιστον 5 **δοκίμια** θα δοκιμασθούν για κάθε δείγμα στη περίπτωση ισότροπων υλικών.

3.3.8.2 Δέκα δοκίμια, εκ των οποίων πέντε παράλληλα και πέντε κάθετα προς τον κύριο άξονα ανισοτροπίας θα δοκιμασθούν για κάθε δείγμα στη περίπτωση ανισότροπων υλικών.

3.3.8.3 Δοκίμια τα οποία θρίπτονται με κάποιο φανερό τυχαίο τρόπο θα απορρίπτονται και θα επαναλαμβάνεται η δοκιμή εκτός εάν τέτοιες ρωγμές αποτελούν μια μεταβλητή της οποίας η επίδραση πρέπει να μελετηθεί.

3.3.9 Ταχύτητα δοκιμής

3.3.9.1 Η ταχύτητα δοκιμής θα είναι ο σχετικός ρυθμός κίνησης των αρπαγών κατά την διάρκεια των **δοκιμών**. Ο ρυθμός κινήσεως της οδηγούμενης κινητής αρπαγής όταν η μηχανή τρέχει αργά μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι να αποδειχθεί ότι η προκύπτουσα ταχύτητα δοκιμής είναι εντός των ορίων επιτρεπόμενης μεταβολής.

3.3.9.2 Η πρότυπος ταχύτητα δοκιμής θα είναι 1,3±0,3 mm/min εκτός από τη περίπτωση της παραγράφου 10.5.4.

<u>3.3.10 Διαδικασία</u>

3.3.10.1 Μετρήστε το πάχος και το πλάτος των δοκιμίων με ακρίβεια 0,01mm σε αρκετά σημεία κατά μήκος αυτών. Υπολογίστε και καταγράψτε την ελάχιστη τιμή της διατομής. Μετρήστε το μήκος των δοκιμίων και καταγράψτε την τιμή.

3.3.10.2-3.3.10.3 Τοποθετείστε το δοκίμιο μεταξύ των επιφανειών του συστήματος θλίψεως, προσέχοντας την ευθυγράμμιση του κεντρικού άξονα αυτού με το κεντρικό άξονα του εξαρτήματος θλίψεως και εξασφαλίζοντας να είναι παράλληλα τα άκρα του δοκιμίου με την επιφάνεια του οργάνου θλίψεως, ρυθμίστε τη κεφαλή της μηχανής έως ότου έρθει με τη κορυφή του οργάνου θλίψεως.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
27	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.3.10.4 Εάν χρειάζεται μόνο η αντοχή σε θλίψη ή το όριο διαρροής σε θλίψη ή ακόμα και τα δύο, τότε ενεργείστε ως εξής:

3.3.10.4.1 Ρυθμίστε την ταχύτητα σε 1,3mm/min και θέστε σε λειτουργία τη μηχανή.

3.3.10.4.2 Καταγράψτε το μέγιστο φορτίο που έφερε το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής (συνήθως αυτό είναι το φορτίο κατά τη στιγμή της θραύσης)

3.3.10.5 Εάν χρειάζονται τα δεδομένα τάσης – παραμόρφωσης τότε ενεργείστε ως εξής:

3.3.10.5.1 Συνδέστε το μηκυνσιόμετρο

3.3.10.5.2 Ρυθμίστε τη ταχύτητα σε 1,3 mm/min και θέστε σε λειτουργία τη μηχανή

3.3.10.5.3 Καταγράψτε τα φορτία και τις αντίστοιχες θλιπτικές παραμορφώσεις σε κατάλληλα διαστήματα ή εάν η μηχανή δοκιμής είναι εξοπλισμένη με αυτόματο εξάρτημα καταγραφής, καταγράψτε τη πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων

3.3.10.5.4 Μετά το όριο διαρροής μπορεί να είναι επιθυμητή η αύξηση της ταχύτητας σε 5 έως 6mm/min και να επιτραπεί στη μηχανή να λειτουργήσει σε αυτήν τη ταχύτητα έως ότου το δοκίμιο υποστεί θραύση. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με σχετικώς όλκιμα υλικά και με μια μηχανή δοκιμής με ένα σύστημα βάρους, ώστε η ανταπόκριση να είναι αρκετά ταχεία για να παρέχει ακριβή αποτελέσματα.

3.3.11 Υπολογισμοί

3.3.11.1 Αντοχή σε θλίψη: Υπολογίστε την αντοχή σε θλίψη διαιρώντας το μέγιστο φορτίο που έφερε το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής δια της αρχικής διατομής αυτού. Εκφράστε το αποτέλεσμα σε MPa.

3.3.11.2 Όριο διαρροής σε θλίψη: Υπολογίστε το όριο διαρροής σε θλίψη διαιρώντας το φορτίο που φέρει το δοκίμιο στο όριο αυτό με την ελάχιστη διατομή του δοκιμίου. Εκφράστε το αποτέλεσμα σε MPa.

3.3.11.3 Συμβατικό όριο διαρροής: Υπολογίστε το συμβατικό όριο διαρροής που αντιστοιχεί σε προκαθορισμένο ποσοστό παραμόρφωσης.

3.3.11.4 Μέτρο ελαστικότητας: Υπολογίστε το μέτρο ελαστικότητας φέροντας μια εφαπτόμενη στο αρχικό ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων και διαιρώντας τη τιμή τάσης με την αντίστοιχη της παραμόρφωσης. Εκφράστε το αποτέλεσμα σε GPa.

3.3.11.5 Για κάθε σειρά δοκιμών, υπολογίστε τον αριθμητικό μέσο όρο αυτών των τιμών που ελήφθησαν και αναφέρεται αυτήν ως «μέση τιμή» της ιδιότητας.

3.3.11.6 Υπολογίστε την απόκλιση ως εξής: $S = [(\Sigma x^2 - \eta X^2) / (\eta - 1)]^{1/2}$

όπου:

S=	Απόκλιση
x=	τιμή της δοκιμής
η=	αριθμός δοκιμών
X=	αριθμητικός μέσος της σειράς δοκιμών

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 28 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.3.12 Έκθεση αποτελεσμάτων

3.3.12.1 Η έκθεση θα περιλαμβάνει τα εξής:

3.3.12.2 Πλήρης προσδιορισμός του δοκιμασθέντος υλικού που περιλαμβάνει το τύπο, τη πηγή, το κωδικό κατασκευαστού, μορφή, κύριες διαστάσεις, προηγούμενη ιστορία κ.λ.π

3.3.12.1.2 Μέθοδος παρασκευής δοκιμίων

3.3.12.1.3 Τύπος και διαστάσεις δοκιμίων

3.3.12.1.4 Χρησιμοποιηθείσα διαδικασία προετοιμασία δοκιμίων

3.3.12.1.5 Ατμοσφαιρικές συνθήκες στην αίθουσα δοκιμής

3.3.12.1.6 Αριθμός δοκιμασθέντων δοκιμίων

3.3.12.1.7 Ταχύτητα δοκιμής

3.3.12.1.8 Αντοχή σε θλίψη, μέση τιμή και απόκλιση

3.3.12.1.9 Όριο διαρροής σε θλίψη και συμβατικό όριο διαρροής σε θλίψη και απόκλιση

3.3.12.1.10 Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (εάν απαιτείται), μέσος όρος και απόκλιση

3.3.12.1.11 Ημερομηνία δοκιμής

3.4 Προδιαγραφή κανονισμού ASTM D 638

<u>3.4.1 Σκοπός και περιγραφή της μεθόδου</u>

Θέλουμε να μελετήσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων του σύνθετου υλικού που κατασκευάσαμε. Για το σκοπό αυτό τα τοποθετούμε στη μηχανή του εφελκυσμού και στη συνέχεια καταπονούνται με αξονικό φορτίο μέχρι τη θραύση.

Συσκευή εφελκυσμού: Τα πειράματα στο εργαστήριο Αντοχής Υλικών έγιναν σε μηχανή τύπου Instron και σε θερμοκρασία δωματίου. Τα δοκίμια καταπονήθηκαν με σταθερό ρυθμό επιμήκυνσης c=1.0x10³ m/min. Επειδή τα ακραία τμήματα του εφελκυσμού, εμφανίζεται μια σύνθετη καταπόνηση στα σημεία αυτά. Λόγω όμως της διαμόρφωσης του δοκιμίου η καταπόνηση μεταφέρεται στη μέση του δοκιμίου σαν απλή εφελκυστική καταπόνηση. Το κύριο χαρακτηριστικό των αρπαγών προσαρμογής των δοκιμίων στη μηχανή ελέγχου είναι ότι εξασφαλίζεται η μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων και η ταχύτητα φόρτισης.

Δοκίμια: Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές όπως αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Προσπαθούμε να μην έχουμε πουθενά ανωμαλίες και ατέλειες στο υλικό. Μετράμε τις διαστάσεις της εγκάρσιας διατομής (μήκος, πλάτος) με παχύμετρο. Χρησιμοποιήσαμε τρία δοκίμια για κάθε περιεκτικότητα σε έγκλεισμα SiC.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
29	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

<u>Μετρήσεις των ελαστικών σταθερών</u>: Η μηχανή που χρησιμοποιήσαμε έδινε έτοιμο το διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης. Χρησιμοποιώντας το εμβαδόν της διατομής Α και το αρχικό μήκος l του κάθε δοκιμίου, μετατρέπουμε το παραπάνω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Από το διάγραμμα αυτό βρίσκουμε το μέτρο ελαστικότητας Ε_c και την τάση θραύσης για κάθε περιεκτικότητα.

Για τον υπολογισμό του λόγου Poisson της μήτρας (σύστημα ρητίνης-σκληρυντήπλαστικοποιητή) ακολουθήσαμε τη παρακάτω διαδικασία. Επικολλούμε στο μέσον του δοκιμίου δύο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (strain gauge) κάθετα μεταξύ τους, τα οποία στη συνέχεια συνδέονται με μια ηλεκτρική γέφυρα που θα δώσει τις παραμορφώσεις κατά την επιβολή του φορτίου στη μηχανή Instron. Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίζουμε τις εγκάρσιες (ε_x) και διαμήκεις (ε_y)

παραμορφώσεις και στη συνέχεια από αυτές το λόγο του Poisson $\nu = \frac{-\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$.

<u>3.5 Θεωρητική μελέτη μοντέλων για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας</u> <u>του κοκκώδους υλικού.</u>

Για τη θεωρητική μελέτη που ακολουθεί βασιστήκαμε στις παρακάτω παραδοχές:

- Οι φάσεις του σύνθετου υλικού (έγκλεισμα και μήτρα) είναι ελαστικά ισότροπα και ομοιογενή υλικά.
- Το έγκλεισμα αποτελείται από κόκκους που έχουν τέλειο σφαιρικό σχήμα.
- Ο αριθμός των εγκλεισμάτων είναι μεγάλος και η κατανομή τους ομοιόμορφη, έτσι ώστε το σύνθετο υλικό μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές και ισότροπο (μακροσκοπικώς ισότροπο υλικό)
- Η κατ' όγκον περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών να μπορεί να αμεληθεί.
- Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά μικρές έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν οι γραμμικές σχέσεις-παραμορφώσεων.

Για το προσδιορισμό των σχέσεων οι οποίες θα δώσουν τη θεωρητική έκφραση για το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού, θα εφαρμόσουμε τη θεωρία της ελαστικότητας στο στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο του συνθέτου, όπου θεωρείται ότι έχει κατά μέσο όρο τις ιδιότητες του κοκκώδους συνθέτου υλικού.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
30	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.5.1 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Μέτρο ελαστικότητας

Σ' αυτή τη παράγραφο θα σχολιάσουμε και θα συγκρίνουμε τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.6), (2.9) και (2.10), με τα μέτρα ελαστικότητας που δίνουν πειράματα.

Σύγκριση διαγραμμάτων για εγκλείσματα SiC:

Όπως βλέπουμε και στα σχεδιαγράμματα των σχημάτων 3.1 και 3.2 οι τιμές που προέκυψαν από τις θεωρητικές σχέσεις διαφόρων ερευνητών όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα είναι άλλοτε μικρότερες και άλλοτε υψηλότερες σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Εξαίρεση αποτελούν τα μοντέλα των Einstein (εξίσωση 2.3) και Kerner (εξίσωση 2.6) όπου οι πειραματικές τιμές αποκλίνουν ολίγο από τις θεωρητικές για περιεκτικότητες μέχρι και $U_f = 0.20$. Οι μεγάλες μερικές φορές αποκλίσεις μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονται στο γεγονός ότι οι παραδοχές που ακολούθησαν οι διάφοροι ερευνητές κατά την κατασκευή των θεωρητικών μοντέλων διέφεραν αρκετά από τις πραγματικές συνθήκες.

Στο σχήμα 3.3 κάνουμε μια μελέτη για το μέτρο ελαστικότητας με το μοντέλο του Hirsh που πρέπει να ικανοποιεί την αντίστοιχη εξίσωση που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2. Ο παράγοντας x μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 1 ανάλογα με το είδος του συνθέτου υλικού, δηλαδή για κοκκώδη εγκλείσματα παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν ενώ για τα ινώδη παίρνει τιμές κοντά στο 1. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή μελετάμε κοκκώδη υλικά πήραμε τιμές του x πολύ κοντά στο 0 για να διαπιστώσουμε για ποια τιμή του παράγοντα x υπάρχει μεγαλύτερη προσέγγιση στις πειραματικές τιμές. Παρατηρούμε ότι για τις τιμές του x=0,02 και x=0,03 υπάρχει πολύ καλή επαλήθευση των πειραματικών τιμών. Πιο συγκεκριμένα για x=0,03 οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για περιεκτικότητες 0.15 και 0.20 είναι πάρα πολύ κοντά με τις πειραματικές.

Γενικά όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα έχουμε αύξηση και του μέτρου ελαστικότητας. Αυτό εξηγείται διότι το έγκλεισμα είναι καθαρά ελαστικό υλικό, ενώ η μήτρα είναι βισκοελαστικό υλικό. Έτσι η προσθήκη εγκλείσματος στη μήτρα αποδυναμώνει τη βισκοελαστική συμπεριφορά.

Τέλος, μπορεί να υπάρχει μια σχετική επαλήθευση των πειραματικών τιμών από τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα όπως αναφέραμε και προηγουμένως, αλλά παρατηρούμε κάποιες σοβαρές διακυμάνσεις στις τιμές σε σχέση με τη τιμή του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιους λανθασμένους υπολογισμούς που έγιναν κατά τη διάρκεια κατασκευής των δοκιμίων σχετικά με τις αναλογίες που πρέπει να υπάρχουν μεταξύ ρητίνης, πλαστικοποιητή και σκληρυντή.

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σύγκριση διαγραμμάτων για εγκλείσματα Fe:

Από τη μελέτη του σχήμα 3.4 βλέπουμε ότι το μοντέλο των Guth-Smallwood πέραν του $U_f = 0.10$ δεν μπορεί να δώσει καμία τιμή η οποία να είναι πολύ κοντά στις πειραματικές τιμές για αυτό το απορρίπτουμε από τη περεταίρω σύγκριση. Πολύ καλή επαλήθευση των πειραματικών τιμών δίνουν το μοντέλο των Sideridis- Theocharis και το μοντέλο του Hirsh για x=0,035.

Για το σχήμα 3.5 παρατηρούμε ότι το μοντέλο του Mooney δίνει τιμές κοντά στις πειραματικές τιμές για περιεκτικότητες εγκλείσματος μέχρι 0.10, κι ύστερα παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση. Αντίστοιχα το μοντέλο των Eilers-Van Dyck παρουσιάζει και αυτό με τη σειρά του σχετικά μεγάλη απόκλιση από τις πειραματικές τιμές. Το μοντέλο του Einstein για τιμές εγκλείσματος μέχρι και 0.15 έχει ικανοποιητική συμπεριφορά. Μόνο τα μοντέλα των Paul και Kerner επαληθεύουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις πειραματικές τιμές.

Στο σχήμα 3.6 σχετικά με το μοντέλο του Hirsh συναρτήσει της σταθεράς x, παρατηρούμε ότι για το πείραμα 1 μπορούμε να δεχτούμε ως τιμές του παράγοντα x τις x=0,035 και x=0,003 μιας και προσεγγίζουν τις πειραματικές τιμές ικανοποιητικά.

Σύγκριση διαγραμμάτων για εγκλείσματα Al:

Από το σχήμα 3.7 παρατηρούμε ότι το μοντέλο των Guth-Smallwood αποκλίνει σημαντικά για περιεκτικότητες εγκλείσματος μεγαλύτερες του 10%. Ενώ αντίστοιχα τα μοντέλα των Counto, Sideridis-Theocharis και Hirsh για x=0,02 δίνουν τιμές στις αντίστοιχες περιεκτικότητες πολύ κοντά στις πειραματικές τιμές.

Αντίστοιχα για το σχήμα (3.8) παρατηρούμε ότι κανένα από τα διάφορα μοντέλα που μελετήσαμε δεν δίνει τιμές κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές.

Στο σχήμα 3.9 μελετάμε τη συμπεριφορά του μοντέλου του Hirsh για διάφορες τιμές της σταθεράς του x για τιμές όμως πολύ κοντά στο 0 μιας και μιλάμε για σύνθετο κοκκώδες υλικό. Παρατηρούμε ότι για τη σταθερά x=0,02 το μοντέλο του Hirsh μας δίνει τιμές για το μέτρο ελαστικότητας οι οποίες είναι σχετικά κοντά με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές με μέγιστη απόκλιση όχι μεγαλύτερη του 10% που παρατηρείτε για περιεκτικότητα εγκλείσματος 20%.

Τέλος από το σχήμα 3.10 παρατηρούμε ότι μόνο οι τύποι των Sideridis-Theocharis και Hirsh για x=0.02 μπορούν και δίνουν τιμές πολύ κοντά στις πειραματικές.

Αντοχή

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης θραύσης συναρτήσει της κατ' όγκον περιεκτικότητας U_f για εκλείσματα SiC. Φαίνονται οι θεωρητικές καμπύλες που δίνονται από τους Nicolais-Narkis, Schranger και από τη σχέση Power-low. Παρατηρούμε ότι η τάση θραύσης μειώνεται αυξανόμενης της κατ' όγκον περιεκτικότητας. Ο Nicolais προτείνει ότι το άνω όριο της

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
Θa υπ

συμπεριφοράς της τάσης θραύσης του συνθέτου πρέπει να είναι η αντοχή της μη ενισχυμένης

μήτρας
$$(\frac{\sigma_f}{\sigma_m}=1).$$

Στο ίδιο σχήμα, απεικονίζονται και οι πειραματικές τιμές της τάσης θραύσης του συνθέτου συναρτήσει της U_f . Η μεταβολή των πειραματικών τιμών διαφέρει από τις θεωρητικές καμπύλες αφού ενώ αρχικά υπάρχει μείωση της τάσεως, εν συνεχεία παρουσιάζεται αύξηση της τιμής αυτής, αυξανόμενης της περιεκτικότητας. Παρατηρούμε λοιπόν ότι υπάρχει μια κατ' όγκον περιεκτικότητα $U_f = 0.1$ η οποία έχει την ελάχιστη συνεισφορά στην αντοχή του σύνθετου υλικού. Υψηλότερες περιεκτικότητες $U_f > 0.1$, αλλά και χαμηλότερες $U_f < 0.1$ φαίνεται ότι έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά από ότι αυτή η περιεκτικότητα.

Αυτό δύναται να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όταν αυξάνει η κατ' όγκον περιεκτικότητα του εγκλείσματος μειώνεται η ποσότητα της μήτρας η οποία είναι απαραίτητη για τον σχηματισμό μιας περιοχής με πυκνή διασταύρωση (πυκνού πλέγματος) γύρω από κάθε έγκλεισμα. Αυτό το γεγονός αντιστρέφει την επίδραση των εγκλεισμάτων στις βισκοελαστικές ιδιότητες.

Ανάλογη συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί και στην εργασία των J. Spanoudakis- R.J. Young [48], όπου εμελετήθη η συμπεριφορά του συνθέτου υλικού αποτελούμενου από εποξειδική ρητίνη και κόκκους υάλου, με διάφορα μεγέθη κόκκων.

Στο σχήμα 3.12 μελετούμε τη συμπεριφορά της τάσης θραύσης σε συνάρτηση της περιεκτικότητας για εγκλείσματα Fe. Γενικά για όλα τα μοντέλα που μελετήσαμε για τη τάση θραύσης σε συναρτήσει της περιεκτικότητας για εγκλείσματα Fe παρατηρούμε ότι έχει μια πτωτική συμπεριφορά η τάση θραύσης αυξανόμενου της περιεκτικότητας εγκλείσματος.

Πιο συγκεκριμένα ο νόμος Power-low παρατηρούμε ότι έχει τη μεγαλύτερη απόκλιση από τις πειραματικές τιμές και μάλιστα όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του εγκλείσματος αυτή η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών αυξάνεται. Στη συνέχεια τα μοντέλα των Nicolais- Narkis και Schrager παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά και προσέγγιση στις πειραματικές τιμές. Το μοντέλο του Nielsen δίνει τιμές πολύ κοντά στις πειραματικές και μάλιστα για U_f =0.20 υπάρχει ταύτιση της πειραματικής τιμής με τη αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για αυτό το μοντέλο. Τέλος η μέση απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που μας δίνει το μοντέλο του Nielsen δεν υπερβαίνει το 5%.

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάσαμε τη συμπεριφορά της τάσης θραύσης συναρτήσει της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων Al. Όλα τα μοντέλα και πάλι παρουσίασαν την ιδία αναμενόμενη πτωτική συμπεριφορά της τάσης θραύσης συναρτήσει της αύξησης της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων Al.

Σελίδα 33	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
Σελίδα 33	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

3.6 Πειραματική μελέτη της μικροθραυστικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών με τη μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM).

3.6.1 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σαρώσεως

Η ονομασία «ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσεως» έχει ως σκοπό να εντάξει το όργανο αυτό στην ίδια κατηγορία με άλλα οικεία όργανα, τα οποία καταφέρνουν και σχηματίζουν την εικόνα μέσω εστίασης στο χώρο (οπτικά μικροσκόπια, συμβατικά ηλεκτρονικά μικροσκόπια, τηλεσκόπια, προβολείς-slide, ανθρώπινο μάτι κ.α.) παρά να υποδεικνύει καθαρά ότι πρόκειται για ένα όργανο που ανήκει σε εκείνη την κατηγορία, στην οποία η εικόνα σχηματίζεται μέσω σημείων χρονικής διαδοχής.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σαρώσεως (Η.Μ.Σ) δημιουργεί την εικόνα του δείγματος με τη χρήση μιας ρυθμιζόμενης ηλεκτρονικής δέσμης ακτινών, η οποία έχει ως σκοπό λειτουργίας να σαρώνει εγκάρσια την επιφάνεια του δείγματος όμοια με μια ηλεκτρονική δέσμη ακτινών, που κινείται εγκάρσια στην επιφάνεια μιας τηλεοπτικής οθόνης.

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το κάθε σημείο του δοκιμίου συλλέγεται, ενισχύεται και η διαφορά στην ένταση χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της φωτεινότητας στη καθοδική λυχνία της οθόνης.

Μέσω του Η.Μ.Σ μπορούν να προσδιορισθούν ορισμένες γραφικές ιδιότητες του δοκιμίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του. Επομένως μπορεί να απεικονίζει επιφάνειες που βρίσκονται σε πολλά επίπεδα εστίασης του δοκιμίου με τη βοήθεια του μεγάλου βάθους εστίασης. Η εικόνα αυτή που απεικονίζεται για να μπορέσουμε να τη καταλάβουμε πλήρως και να συλλέξουμε όλες τις πληροφορίες που μας παρέχει θα πρέπει να κάνουμε μια μικρή αναφορά στις αρχές της φυσικής στερεών σωμάτων που έχουν σχέση με την αλληλεπίδραση μεταξύ δέσμης ηλεκτρονίων και δοκιμίου.

Μια σειρά πολλών αλληλεπιδράσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί, όταν μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων πέφτει με μεγάλη ενέργεια πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Κατάλληλοι ανιχνευτές με τη βοήθεια ενίσχυσης λαμβάνουν τα αποτελέσματα αυτών των αλληλεπιδράσεων, εκθέτονται σε καθοδική λυχνία σημείο προς σημείο, έτσι ώστε να συμπίπτουν χρονικά με τη θέση που βρίσκεται η ηλεκτρονική θέση πάνω στο δείγμα.

Καθώς η ηλεκτρονική δέσμη «πρωτογενών» ηλεκτρονίων (primary electrons) πίπτει πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου αλληλεπιδρά ταυτόχρονα ελαστικά και μη ελαστικά με αυτό. Στις ελαστικές κρούσεις τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια της προσπίπτουσας δέσμης αλλάζουν τη διεύθυνσή τους χωρίς μεγάλη απώλεια ενέργειας. Αρκετά από αυτά τα ανακλώμενα ηλεκτρόνια υπακούουν στο νόμο των συνημίτονων και λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους, είναι ευδιάκριτα σε μικρή απόσταση πάνω από την επιφάνεια του δείγματος. Ο αριθμός των «ανακλώμενων» ηλεκτρονίων ελαττώνεται και πλησιάζει στο μηδέν όταν η διεύθυνση της δέσμης των ηλεκτρονίων γίνεται παράλληλη προς την επιφάνεια του δείγματος. Τα «ανακλώμενα» είναι υψηλής ενέργειας

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 34 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

ηλεκτρόνια 10000-20000 KeV και η ικανότητα ανίχνευσης τους εξαρτάται από την τοποθεσία τους και τη γωνία εισόδου τους.

Ως αποτέλεσμα έχουμε τη δημιουργία ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων Χ εξαιτίας της ελαστικής επίδρασης των «πρωτογενών ηλεκτρονίων». Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας, τα Augar, τα οποία συνήθως δεν μπορούν να ανιχνευτούν με το Η.Μ.Σ και τα «δευτερογενη» όπου κινούνται με ενέργεια 3-10 Εν. Έχουν τα τελευταία τόσο χαμηλή ενέργεια με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η ανίχνευσή τους. Ακόμη πρέπει ο ανιχνευτής για τη καλή λειτουργία του να είναι πλαισιωμένος με ένα θετικά πολωμένο ηλεκτρικό πλέγμα, που θα προσελκύει τα ηλεκτρόνια.

Υπάρχουν όμως διάφοροι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο στις παρεχόμενες πληροφορίες από το Η.Μ.Σ όπως είναι, η τάση με την οποία επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια καθώς και η διάμετρος της ηλεκτρονικής δέσμης (spot size). Γενικά θεωρείται πως όσο υψηλότερη είναι η τάση και όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ηλεκτρονικής δέσμης της ηλεκτρονικής δέσμης της ηλεκτρονικής δέσμης τος της ηλεκτρονικής δέσμης τος της ηλεκτρονικής δέσμος της ηλεκτρονικής δέσμης τος μεγαλύτερη είναι η αναλογία με την οποία η «διάδοση» μετατρέπεται σε σήμα και τόσο πιο καθαρή γίνεται η εικόνα.

Με την αύξηση της μεγέθυνσης, το ίχνος της δέσμης πρέπει να μικραίνει για να μπορέσει να επιτύχει καλή ανάλυση του δείγματος. Για τα «δευτερογενή» ηλεκτρόνια παρέχουν πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Τα «ανακλώμενα» ηλεκτρόνια, λόγω της υψηλότερης ενέργειας που διαθέτουν, παρέχουν πληροφορίες για μεγαλύτερη βάθη με λιγότερο απαιτούμενη ενέργεια. Τα σήματα που παρέχουν οι ακτίνες X και το «κενό» έρχονται από ακόμα μεγαλύτερα βάθη και για τη δημιουργία τους απαιτείται η ελάχιστη ανάλυση του ίχνους της δέσμης και της αλληλεπίδρασης.

Η εικόνα δημιουργείται με τη βοήθεια του ανιχνευτή των «δευτερογενών» ηλεκτρονίων και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που παρατηρείται. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία της εικόνας είναι η ύπαρξη ενός στρώματος υλικού καλής αγωγιμότητας, όπως είναι ο χρυσός ή χρυσός-παλλάδιο, με το οποίο εξαχνώνεται η επιφάνεια του δείγματος, όταν αυτό δεν είναι καλός αγωγός.

Το βάθος διείσδυσης των «πρωτογενών» ηλεκτρονίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του υλικού. Τα πιο συμπαγή υλικά, επιτρέπουν μικρότερη διείσδυση και δημιουργούν μεγάλο αριθμό ευδιάκριτων «ανακλώμενων» ηλεκτρονίων. Έτσι η αύξηση της πυκνότητας αυξάνει τη λαμπρότητα της εικόνας. Αυτή η διαφορά της έντασης των «ανακλώμενων» ηλεκτρονίων συνδέεται με ένα μεγάλο αριθμό ατομικών συγκρίσεων (contrast), οι οποίες είναι χρήσιμες όταν εξετάζουμε σύνθετα υλικά, όπως είναι το τσιμεντοκονίαμα, το οποίο είναι φτιαγμένο από υλικά διαφορετικών πυκνοτήτων.

Η ικανότητα των «ανακλώμενων» ηλεκτρονίων να παρέχουν συγκρίσεις σε επίπεδο ατόμων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εντοπισμό των ρωγμών καθώς αυτές είναι περιοχές χαμηλής πυκνότητας και εμφανίζονται στην οθόνη πιο σκούρες από την υπόλοιπη επιφάνεια. Αν η ρωγμή έχει γίνει υπό σχετικά μεγάλη γωνία, το οποίο συμβαίνει όταν το δείγμα στη περιοχή που τελειώνει η ρωγμή, περιέχει σημαντική ποσότητα υλικού που αλληλεπιδρά, τότε η αποτελεσματικότητα των «ανακλώμενων» ηλεκτρονίων είναι μικρή. Στην τελευταία περίπτωση εάν ελαττώσουμε την ενέργεια των «πρωτογενών» ηλεκτρονίων, τότε ελαττώνεται ταυτόχρονα και η ένταση της αλληλεπίδρασης, όποτε τα «ανακλώμενα» ηλεκτρόνια γίνονται πιο αποτελεσματικά. Τέλος μπορούμε να ξεπεράσουμε το παραπάνω εμπόδιο δημιουργώντας την εικόνα με την ταυτόχρονη χρήση των σημάτων που δίνουν τα «δευτερογενή» και τα «ανακλώμενα» ηλεκτρόνια (signal mixing).

3.7 Ηλεκτρονική μικροθραυσιογραφική ανάλυση εποξειδικών ρητινών ενισχυμένων με κόκκους SiC και αλουμινίου (Al).

Οι πιο σημαντικοί μηχανισμοί θραύσης πολλών θερμοσκληρυνώμενων πολυμερών, όπως είναι οι εποξιδικές ρητίνες ενισχυσμένες με εγκλείσματα είναι τρείς:

- 1. Ο μηχανισμός καθήλωσης της ρωγμής (crack-pinning)
- 2. Ο μηχανισμός διατμητικής διαρροής (shear yielding)
- 3. Ο μηχανισμός αποίνωσης (crazing)

Παρακάτω γίνεται μια εκτενής αναφορά και επεξήγηση για το κάθε μηχανισμό ξεχωριστά και την επίδραση αυτού στη δομή του υλικού.

1) Ο μικρομηχανισμός της καθήλωσης της ρωγμής (crack-pinning)

Οι Lange και Radford το 1971 ύστερα από μια έρευνα που έκαναν παρατήρησαν το φαινόμενο ότι η ενέργεια θραύσης αυξάνει σε μεγάλο βαθμό όταν οι εποξιδικές ρητίνες ενισχύονται με ψαθυρά εγκλείσματα (υλικά) και κυρίως κοκκόδους μορφής γιατι σε άλλες μορφές εγκλεισμάτων δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα διαπίστωσαν ότι υπάρχει μια εξάρτηση του βαθμού αύξησης της στερότητας με τη περιεκτικότητα και το μέγεθος των εγκλεισμάτων. Η κύρια αιτία της αύξησης της στερότητας σύμφωνα με τους Lange και Radford είναι το φαινόμενο της καθήλωσης της ρωγμής.

Η δημιουργία μιας δευτερεύουσας ψαθυρής φάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας θραύσης στα ψαθυρά υλικά, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του μετώπου της διαδεδομένης ρωγμής με τους κόκκους του εγκλείσματος που είναι διασπαρμένοι μέσα στη μήτρα. Στηριζόμενοι στη θραυσιογραφική ανάλυση, διαπίστωσαν πως τα ίχνη που αφήνει η παραπάνω αλληλεπίδραση πάνω στη ψαθυρή μήτρα είναι «κομμήτες» (tails) που σχηματίζονται στη περιοχή πίσω από το έγκλεισμα και οφείλονται στην ένωση δύο τμημάτων (arms) του μετώπου της ρωγμής, που βρίσκονται σε δύο διαφορετικά επίπεδα θραύσης.

Η ρωγμή που δημιουγείται αρχίζει να διαδίδεται μέσα στη ψαθυρή μήτρα, το μέτρο της ρωγμής «ελίσσεται» μεταξύ των διεσπαρμένων εγκλεισμάτων, ενώ η ίδια παραμένει καθηλωμένη σε όλα τα σημεία του μετώπου, όπου αυτή προσκούει στα εγκλείσματα. Στη διάρκεια αυτής της εξέλιξης δημιουργούνται νέες επιφάνειες θραύσης και το μήκος του μετώπου της ρωγμής αυξάνει,

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 36 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

γεγονός που οφείλεται στην αλλαγή της μορφής του μετώπου, που πραγματοποιείται μεταξύ δύο σημέιων καθήλωσης ρωγμής.

Απαιτείται η αύξηση δαπάνης ενέργειας όχι μόνο για τις πρόσθετες νέες επιφάνειες που δημιουργούνται, αλλά και για την αύξηση του μήκους του μετώπου της ρωγμής. Αυτό συμβαίνει διότι η ποσοστιαία αύξηση του μήκους του μετώπου της ρωγμής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των εγκλεισμάτων.

Ο Lange έδειξε ότι η απόσταση μεταξύ των εγκλεισμάτων πρέπει να είναι πολλές φορές μικρότερη από το μήκος του μετώπου της αρχικής ρωγμής για να είναι ο μηχανισμός της καθήλωσης ρωγμής δραστήριος στην αύξηση της ενέργειας θραύσης. Επίσης, διατύπωσε την υπόθεση ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των εγκλεισμάτων τόσο πιο έντονη είναι η καθήλωση της ρωγμής.

2) Ο μηχανισμός διατμητικής διαρροής (shear yielding)

Η εξέλιξη της θραύσης συνοδεύεται από εκτεταμένες διατμητικές διαρροές. Για πολλά σκληρά μονοφασικά πολυμερή αποτελεί και τον κύριο μηχανισμό της θραύσης και η παρουσία αυτών των διατμητικών διαρροών είναι έντονη στα ψαθυρά πολυμερή όταν περιέχουν μάλιστα εγκλείσματα κυρίως ελαστικού χαρακτήρα.

Το κύριο χαρακτηριστικό του μηχανισμού της διατμητικής διαρροής είναι ότι στη μήτρα αναπτύσονται τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις κυρίως στη περιοχή γύρω από τα εγκλείσματα.

Για πολλούς ερευνητές είναι κυρίαρχη η άποψη πως η κύρια λειτουργία του εγκλείσματος είναι αυτή που παράγει την τριαξονική καταπόνηση στη μήτρα. Πρέπει όμως να υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ τους ώστε να είναι εφικτό. Σε αυτή τη περίπτωση η μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων εμφανίζεται στον ισημερινό του εγκλείσματος, με αποτέλεσμα να αυξάνει η τοπική απελευθέρωση της έντασης και το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την έναρξη των διατμητικών διαρροών στη μήτρα. Ακόμη ανέφεραν ότι τα σφαιρικά κενά, όταν στη περιοχή τους αναπτύσεται διαζονική καταπόνηση, μπορούν να προκαλέσουν διατμητικές διαρροές. Όμως αυτού του είδους τα κενά δεν μπορούν να εμποδίσουν την εξέλιξη της ρωγμής, έτσι θεωρούνται λιγότερο ενεργά από τα εγκλείσματα.

Ο Haaf με τη χρήση του οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου προσπάθησε να εξηγήσει το φαινόμενο των διατμητικών διαρροών. Στη διαδικασία της έρευνάς του παρατήρησε ότι από τα διασπαρμένα εγκλείσματα ξεκινούν μικροδιατμητικές ζώνες (microshear bands) υπο γωνία 55° -60° ως προς τη διαύθυνση που εφαρμόζεται η καταπόνηση και το μέγεθος αυτών εξαρτάται από το μέγεθος του εγκλείσματος. Δεν κατάφερε να δώσει ερμηνεία για την απόκλιση της γωνίας των διατμητικών ζωνών από τη γωνία των 45° όπου αναπτύσεται η μέγιστη διατμητική τάση. Παρατήρησε επίσης τη δημιουργία κοιλοτήτων που αναπτύσονται ευθύγραμμα κατά μήκος των διατμητικών ζωνών.

Σελίδα	Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
37	υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης
Επίσης οι Donald και Kramer μετά από μελέτες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μικρού μεγέθους ελαστικά εγκλείσματα (με διάμετρο 0.1μm) ευνοούν την εξέλιξη των διατμητικών διαρροών ενώ αντίθετως εγκλείσματα με διάμετρο της τάξης των 1.5μm ευνοούν την ανάπτυξη του φαινομένου της αποίνωσης (crazes).

Ακόμη η παρουσία ψαθυρών εγκλεισμάτων έχει ως αποτέλεσμα να οδηγεί στην ανάπτυξη διατμητικών διαρροών. Η διαφορά τους σε σχέση με τα ελαστικά είναι ότι η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων παρατηρείται στον «πόλο» των σφαιρικών εγκλεισμάτων, στη περίπτωση που υπάρχει καλή πρόσφυση με τη μήτρα ενώ στον «ισημερινό» στην αντίθετη περίπτωση.

Τα ψαθυρά εγκλείσματα θεωρούνται λιγότερο ενεργά από ότι τα ελαστικά για την αύξηση της ενέργειας θραύσης.

3) Ο μικρομηχανισμός της αποίνωσης (crazes)

Το φαινόμενο της αποίνωσης εμφανίζεται κυρίως στη ψαθυρή θραύση. Αναπτύσσεται, όταν προκαλείται σε μία περιοχή του πολυμερούς τοπική διαρροή υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και εμφανίζεται κυρίως σε ένα μικρό ρήγμα το οποίο συγκρατείται με προσανατολισμένες ίνες (oriented fibrils).

Οι μικρομηχανισμοί «crazes» και «shear yielding» είναι πολλές φορές που συνυπάρχουν στην ψαθυρή θραύση και αναπτύσσονται κυρίως όταν μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος υπάρχει καλή πρόσφυση.

Η πρόσφυση μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφολογία της επιφάνειας θραύσης. Όταν η εποξειδική ρητίνη έχει ενυσχυθεί με απαραμόρφωτα σφαιρικά εγκλείσματα (rigid particles) τα οποία έχουν υποστεί ειδική κατεργασία ώστε να υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος, το μέτωπο της ρωγμής σταματά μπροστά σε αυτά. Στη περιοχή γύρω από το έγκλεισμα παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση τάσεων, η οποία οδηγεί στη θραύση του εγκλείσματος (breakaway) και στην επανέναρξη της διάδοσης του μετώπου. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί μικρή απορρόφηση ενέργειας. Όταν τα εγκλείσματα είναι απαραμόρφωτα και δεν έχει γίνει η απαραίτητη κατεργασία για την καλή πρόσφυση τους με τη μήτρα, τότε με την αναχαίτηση της ρωγμής μπροστά από αυτά, αναπτύσσεται συγκέτρωση τάσεων μικρότερη από τη προαναφερθείσα. Το μέτωπο της ρωγμής περνά πάνω από το έγκλεισμα (bowing) και προκαλεί την αποκόλλησή του από τη μήτρα (deponding). Για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας απαιτείται μεγάλη απορρόφηση ενέργειας.

Όταν υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ μήτρας και εγκλείσματος τότε το μέγιστο ποσοστό ενέργειας απορροφάται και τα εγκλείσματα δέχονται παραμορφώσεις (rubber particles). Στη περιοχή του εγκλείσματος η συγκέντρωση τάσεων είναι μικρότερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Το κύριο χαρακτηριστικό της θραύσης εδώ είναι η ανάπτυξη έντονης μικρομορφολογίας στη περιοχή γύρω από το έγκλεισμα, που οφείλεται στις παραμορφώσεις που έχουν το χρόνο (παραμορφώσιμο υλικό, μεγάλη απορροφούμενη ενέργεια) να αναπτυχθούν. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι στα σύνθετα υλικά η προσπάθεια βελτίωσης μιας

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 38 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

παραμέτρου μπορεί να οδηγεί στη μείωση της τιμής της άλλης, όπως είναι φανερό ότι συμβαίνει με την τάση θραύσης όπου η αύξηση της οδηγεί στη μείωση της ενέργειας θραύσης (toughness).

Επομένως πρέπει κάθε φορά να γνωρίζουμε την εφαρμογή που θα έχει στο σύνθετο υλικό που παρασκευάζουμε και να επιλέγουμε τις κατάλληλες συνθήκες και υλικά που θα δίνουν τις προβλεπόμενες ιδιότητες.

<u>3.8 Ποιοτική μικροθραυστική ανάλυση και ερμηνεία των πειραματικών</u> <u>δεδομένων</u>

<u>3.8.1 Γενικά</u>

Σε αυτό την ενότητα θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την ποιοτική ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων που έχουμε, κάνοντας μικροθραυσιογραφική ανάλυση των φωτογραφιών. Πιο συγκεκριμένα θα μελετήσουμε την επίδραση ορισμένων παραγόντων στην μικροθραυστική συμπεριφορά και θα γίνει συσχέτιση με τα μακροσκοπικά δεδομένα.

Οι παράγοντες που θα ελέγξουμε την επιρροής τους στα υλικά στις ιδιότητες και στη δομή (μορφολογία) τους είναι οι εξής:

- Υλικό και κατανομή των εγκλεισμάτων
- Η ταχύτητα διάδοσης του μετώπου της ρωγμής

Ουσιαστικά μέσα από την ανάλυση που θα κάνουμε, θα παρατηρήσουμε και θα ερμηνεύσουμε τα μικροφαινόμενα που έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες πραγράφους όπως τα φαινόμενα crack-pinning, microcrazing, crack arrest line, deponding κ.α.

3.8.2 Ανάλυση και καταγραφή των μικροφαινομένων θραύσης

Στις φωτογραφίες F.2.2, F.2.2, F.2.3, F.2.4 και F.2.5 παρουσιάζεται η μικρο- τοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με περιεκτικότητα κόκκων 0% και πλαστικοποιητή 35%. Παρατηρούμε επομένως ότι στο συγκεκριμένο δοκίμιο δεν παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο των γραμμών αναχαίτισης. Πιο συγκεκριμένα στη φωτογραφία F.2.1 που βλέπουμε ότι είναι μια πανοραμική φωτογραφία, παρατηρούμε πολύ έντονη αλλαγή του επιπέδου θραύσης. Και σε αυτό το δοκίμιο η ύπαρξη ατέλειας (F.2.4, F.2.5) δημιουργεί παραβολή. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία δευτερευόντων ρωγμών σε περιοχές όπου έχουμε ταχεία διάδοση της κύριας ρωγμής με ταυτόχρονες μικροαναχαιτίσεις λόγω πολύ μικρών ατελειών. Ο προσανατολισμός της παραβολικής επιφάνειας είναι συγκεκριμένος που παρατηρείται και ταυτίζεται με τη φορά διάδοσης του μετώπου της ρωγμής.

Στις φωτογραφίες F.3.1,F.3.2,F.3.3,F.3.4,F.3.5 και F.3.6 παρουσιάζεται η μικροκραγραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με περιεκτικότητα κόκκων SiC 15%. Στην F.3.1 δίνεται μια «πανοραμική» εικόνα της επιφάνειας θραύσης, όπου φαίνεται η καθαρή τοπογραφία. Από τις

φωτογραφίες F.3.2 και F.3.2 που έχουν μεγαλύτερη μεγέθυνση μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα εγκλείσματα παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιομορφία ως προς το μέγεθος, το σχήμα και την απόσταση μεταξύ τους. Τέλος από τις φωτογραφίες F.3.5 και F.3.6 παρατηρούμε ότι η επιφάνεια του δοκιμίου είναι πιο τραχεία στην άκρη του F.3.6 από ότι προχωρώντας προς τη μέση (F.3.5)

Στις φωτογραφίες F.4.1,F.4.2,F.4.3,F.4.4,F.4.5 και F.4.6 παρουσιάζεται η μικροτοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με περιεκτικότητα κόκκων SiC 30%. Και σε αυτές τις φωτογραφίες παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή των κόκκων SiC ενώ ως προς το μέγεθος και το σχήμα παρουσιάζεται ανομοιομορφία. Πιο αναλυτικά για τις φωτογραφίες F.4.5 και F.4.6 παρατηρούμε επίσης τη δημιουργία «κομητών» λόγω της αλληλεπίδρασης του μετώπου διάδοσης της ρωγμής με τους κόκκους του εγκλείσματος που είναι διάσπαρτοι στη μήτρα.

Στις φωτογραφίες F.5.1,F.5.2,F.5.3,F.5.3,F.5.4 και F.5.5 παρουσιάζεται η μικροτοπογραφία της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με περιεκτικότητα κόκκων αλουμινίου 20%. Τέλος σε αυτές τις φωτογραφίες φαίνεται ότι οι κόκκοι είναι ομοιόμορφα διασπαρμένοι μέσα στη μήτρα.

Στις φωτογραφίες F.6.1,F.6.2(επιφάνεια θραύσης δοκιμίου με περιεκτικότητα SiC 30%) και F.6.3.(επιφάνεια θραύσης δοκιμίου με περιεκτικότητα κόκκων αλουμινίου 30%), γίνεται σύγκριση μεταξύ του δοκιμίου με εγκλείσματα διαφορετικών υλικών αλλά ίδιας περιεκτικότητας. Είναι φανερή η διαφορά προς το μέγεθος των κόκκων καθώς επίσης και ως προς το σχήμα τους. Οι κόκκοι του αλουμινίου δε διαφέρουν πολύ ως προς το σχήμα μεταξύ τους και είναι περισσότερο στρογγυλοποιημένοι. Αντίνθετα οι κόκκοι SiC παρουσιάζουν πολύ έντονη ομοιόμορφία.Επισης σε όλες τις παραπάνω φωτογραφίες γίνεται φανερή η ύπαρξη «κομητών». Ιδιαίτερα στη φωτογραφία F.6.3 διακρίνεται το φαινόμενο αποκόλλησης της μήτρας γύρω από το έγκλεισμα οφείλεται κυρίως στο τριαξονικό εντατικό πεδίο γύρω από αυτό.

Ανάλογη σύγκριση πραγματοποιείται στις φωτογραφίες F.7.1,F.8.2(δοκίμιο με περιεκτικότητα κόκκων αλουμινίου 30%) και F.7.2 και F.8.1(δοκίμιο με περιεκτικότητα κόκκων SiC 30%), που και σε αυτές παρατηρείται η διαφορά μεγέθους των κόκκων και η διαφορά του σχήματός τους.

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Σχήμα 3.1

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 61 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.2

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 62 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.3

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 63 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.4

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 64 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.5

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 65 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.6

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 66 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.7

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 67 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.8

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 68 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.9

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 69 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.10

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 το υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.11

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 71 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.12

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών

72 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 3.13

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 73 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



300 µm -



300 µm _____t



*_____ 300µm _____+

Σελίδα 73

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

F. 4



60µm

6

------ 60µm ------

F. 4

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 74 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 75 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



-----120 µm



120µm -----



30 µ m

F. 6

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 76 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



κ_____ 600 μm _____ *



*_____ 60µm _____

F.7

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 77 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



_____ 300 µm _____*



300 µm

F.8

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 78 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 40

Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας με τη χρήση του τριφασικού μοντέλου

4.1 Τριφασικό μοντέλο

Γνωρίζουμε ότι τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τρείς φάσεις Σχήμα 4.14 οι οποίες είναι το έγκλεισμα, η ενδιάμεσος φάση (ενδιάμεση φάση) και η μήτρα. Το έγκλεισμα περιβάλλεται από την ενδιάμεσο φάση και αυτή με την σειρά της από την μήτρα. Επομένως από τα παραπάνω μπορούμε να θεωρήσουμε το τριφασικό μοντέλο που θα αποτελείται από αυτές τις τρείς φάσεις.

Για την ανάλυση αυτού του μοντέλου πρέπει να βασιστούμε στις παρακάτω υποθέσεις:

- 1. Το έγκλεισμα, η ενδιάμεσος φάση και η μήτρα είναι ελαστικά, ισότροπα και ομοιογενή υλικά ενώ η ενδιάμεση φάση είναι ανομοιογενές υλικό.
- 2. Τα εγκλείσματα έχουν σφαιρικό σχήμα
- 3. Για να μπορέσει το υλικό να θεωρηθεί ως μακροσκοπικά ομοιογενές και ισότροπο θεωρούμε ότι ο αριθμός των εγκλεισμάτων είναι μεγάλος και η κατανομή τους ομοιόμορφη.
- 4. Η περιεκτικότητα κατ' όγκον των εγκλεισμάτων είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών να θεωρηθεί αμελητέα.
- 5. Για να διατηρείται η γραμμικότητα στις σχέσεις τάσεων και παραμορφώσεων θεωρούμε ότι οι καταπονήσεις στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά μικρές.

Με την εφαρμογή του μέτρου ελαστικότητας στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (representative volume element) των τριών ομόκεντρων σφαιρών, το οποίο θεωρείται ότι έχει κατά μέσο όρο τις ιδιότητες του κοκκώδους σύνθετου υλικού, μπορούμε να βρούμε τις σχέσεις οι οποίες δίνουν τη θεωρητική έκφραση για το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού.

Εφαρμόζουμε στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο μια εξωτερική πίεση Ρο. Λόγω της σφαιρικής συμμετρίας του εφαρμοζόμενου εξωτερικού φορτίου, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι συναρτήσεις μόνο της ακτίνας r, ενώ είναι ανεξάρτητες από τις γωνίες θ και φ.

Συνεπώς για τη λύση του προβλήματος θεωρούμε μια συνάρτηση η οποία εκφράζεται από

το τύπο:

$$\Phi = \frac{L}{r} + Mr^2 \tag{4.1}$$

Για τις τρείς φάσεις του σύνθετου υλικού θα θεωρήσουμε ότι η κάθε μία απο αυτές τις φάσεις θα χαρακτηρίζεται από μια αντίστοιχη συνάρτηση. Έτσι για το έγκλεισμα, την ενδιάμεση φάση και τη μήτρα θα έχουμε ότι:

$$\Phi_f = \frac{A}{r} + Br^2, \ \Phi_m = \frac{C}{r} + Dr^2, \ \Phi_i = \frac{C}{r} + Dr^2$$
 (4.2a,b,c)

Οι μετατοπίσεις δίνονται από τη σχέση $Gu_r = \nabla \Phi$, άρα για κάθε μία μετατόπιση θα έχουμε

$$u_{r,f} = \left(-\frac{A}{r^2} + 2Br\right)\frac{(1+v_f)}{E_f}, \ u_{r,m} = \left(-\frac{C}{r^2} + 2Dr\right)\frac{(1+v_m)}{E_m}, \ u_{r,i} = \left(-\frac{F}{r^2} + 2Hr\right)\frac{(1+v_i)}{E_i}$$
(4.3a,b,c)

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών Σελίδα 79 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

ότι:

όπου v_f, v_m και v_i είναι οι λόγοι Poisson του εγκλείσματος, της μήτρας και της ενδιαμέσου φάσεως αντιστοίχως.

Οι παραμορφώσεις για τις τρείς φάσεις υπολογίζονται από τις σχέσεις $\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$ και $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\varphi} = \frac{u_r}{r}$, άρα οι επιμέρους παραμορφώσεις θα έχουν ως εξής:

Για το έγκλεισμα έχουμε ότι:

$$\varepsilon_{r,f} = \left(\frac{A}{r^3} + 2B\right) \frac{(1+v_f)}{E_f} \quad \text{kor} \quad \varepsilon_{\theta,f} = \left(-\frac{A}{r^3} + 2B\right) \frac{(1+v_f)}{E_f} = \varepsilon_{\varphi,f} \quad (4.4\text{a,b,c})$$

Για τη μήτρα έχουμε ότι:

$$\varepsilon_{r,m} = \left(\frac{2C}{r^3} + 2D\right) \frac{(1+v_m)}{E_m} \quad \text{kat} \quad \varepsilon_{\theta,f} = \left(-\frac{C}{r^3} + 2D\right) \frac{(1+v_m)}{E_m} = \varepsilon_{\varphi,m} \quad (4.5a,b,c)$$

Για την ενδιάμεση φάση έχουμε ότι:

$$\varepsilon_{r,i} = (\frac{2F}{r^3} + 2H)\frac{(1+v_i)}{E_i} \text{ kon } \varepsilon_{\theta,i} = (-\frac{F}{r^3} + 2D)\frac{(1+v_i)}{E_i} = \varepsilon_{\varphi,i}$$
(4.6a,b,c)

Οι τάσεις υπολογίζονται για τρεις φάσεις από τις σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων ως εξής:

Για το έγκλεισμα έχουμε ότι:

$$\sigma_{r,f} = \frac{2A}{r^3} + \frac{2(1+\nu_f)}{1-2\nu_f} B \, \text{kon} \, \sigma_{\theta,f} = -\frac{A}{r^3} + \frac{2(1+\nu_f)}{1-2\nu_f} B = \sigma_{\varphi,f}$$
(4.7a,b,c)

Για τη μήτρα έχουμε ότι:

$$\sigma_{r,m} = \frac{2C}{r^3} + \frac{2(1+\nu_m)}{1-2\nu_m} D \, \text{kal} \, \sigma_{\theta,m} = -\frac{C}{r^3} + \frac{2(1+\nu_m)}{1-2\nu_m} D = \sigma_{\phi,m}$$
(4.8a,b,c)

Για την ενδιάμεση φάση έχουμε ότι:

$$\sigma_{r,i} = \frac{2F}{r^3} + \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} H \text{ kat } \sigma_{\theta,i} = -\frac{F}{r^3} + \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} H = \sigma_{\varphi,i}$$
(4.9a,b,c)

Για να μην υπάρχει απειρισμός των τάσεων του εγκλείσματος στο r=0 η σταθερά Α πρέπει να μηδενίζεται. Άρα

A=0

Ακόμη από τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες έχουμε ότι:

$$\Sigma \tau \circ r = r_{f} \, \dot{\eta} r = \alpha \ \sigma_{r,f} = \sigma_{r,i} \, \dot{\alpha} \rho \alpha; \qquad \qquad \frac{2(1+v_{f})}{1-2v_{f}} B = \frac{2F}{r_{f}^{3}} + \frac{2(1+v_{i})}{1-2v_{i}} H \qquad (4.10)$$

$$\Sigma \tau \circ r = r_{i} \, \dot{\eta} r = b \ \sigma_{r,i} = \sigma_{r,m} \, \dot{\alpha} \rho \alpha; \qquad \qquad \frac{2F}{r_{i}^{3}} + \frac{2(1+v_{i})}{1-2v_{i}} H = \frac{2C}{r_{i}^{3}} + \frac{2(1+v_{m})}{1-2v_{m}} D \qquad (4.11)$$

$$\Sigma \tau \circ r = r_{f} \, \dot{\eta} r = \alpha \ u_{r,f} = u_{r,i} \, \dot{\alpha} \rho \alpha; \qquad \qquad \frac{2B(1+v_{f})r_{f}}{E_{f}} = (-\frac{F}{r_{f}^{2}} + 2Hr_{f})\frac{(1+v_{i})}{E_{i}} \qquad (4.12)$$

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 80 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$\Sigma \tau \circ r = r_i \dot{\eta} r = b \quad u_{r,i} = u_{r,m} \dot{\alpha} \rho \alpha; \qquad (-\frac{F}{r_i^2} + 2Hr_i) \frac{(1+v_i)}{E_i} = (-\frac{C}{r_i^2} + 2Dr_i) \frac{(1+v_m)}{E_m} \quad (4.13)$$

$$\Sigma \tau \circ r = r_m \dot{\eta} r = c \quad \sigma_{r,m} = -p_0 \dot{\alpha} \rho \alpha; \qquad \frac{2C}{r_m^3} + \frac{2(1+v_m)}{1-2v_m} D = -p_i \quad (4.14)$$

Αντικαθιστώντας στο $r = r_f$ $v_i = kv_f$ και στο $r = r_i$ $v_i = v_m$, όπως προκύπτει από τους νόμους της ενδιάμεσης φάσης.

Άρα το παραπάνω σύστημα εξισώσεων είναι ως εξής:

$$\frac{2(1+v_f)}{1-2v_f}B = \frac{2F}{r_f^3} + \frac{2(1+kv_f)}{1-2kv_f}H$$

$$\frac{2F}{r_i^3} + \frac{2(1+v_m)}{1-2v_m}H = \frac{2C}{r_i^3} + \frac{2(1+v_m)}{1-2v_m}D$$

$$2B(1+v_f)r_f = \left(-\frac{F}{r_f^2} + 2Hr_f\right)\frac{(1+kv_f)}{k} \qquad (4.15a,b,c,d,f)$$

$$\left(-\frac{F}{r_i^2} + 2Hr_i\right)\frac{1+v_m}{E_m} = \left(-\frac{C}{r_i^2} + 2Dr_i\right)\frac{1+v_m}{E_m}$$

$$\frac{2C}{r_m^3} + \frac{2(1+v_m)}{1-2v_m}D = -P_0$$

Ύστερα από πράξεις καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα:

$$\frac{2(1+v_f)}{1-2v_f}B = \frac{2F}{r_f^3} + \frac{2(1+kv_f)}{1-2kv_f}H$$

$$H = D$$

$$2B(1+v_f)r_f = \left(-\frac{F}{r_f^2} + 2Hr_f\right)\frac{(1+kv_f)}{k}$$

$$F = C$$

$$\frac{2C}{r_m^3} + \frac{2(1+v_m)}{1-2v_m}D = -P_0$$

(4.16a,b,c,d,f)

Επιλύοντας την εξίσωση (4.16f) ως προς C το παραπάνω σύστημα εξισώσεων θα έχει ως εξής:

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 81 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$\frac{2(1+v_f)}{1-2v_f}B = \frac{2F}{r_f^3} + \frac{2(1+kv_f)}{1-2kv_f}H$$

$$H = D$$

$$2B(1+v_f)r_f = \left(-\frac{F}{r_f^2} + 2Hr_f\right)\frac{(1+kv_f)}{k}$$

$$F = C$$

$$C = \left(-\frac{P_0}{2} - \frac{1+v_m}{1-2v_m}D\right)r_m^3$$

(4.17a,b,c,d,f)

Στη συνέχεια αντικαθιστούμε στην εξίσωση (4.17a) την εξίσωση (4.17f) και έχουμε:

$$B = \left[\left(-\frac{P_0}{2} - \frac{1 + v_m}{1 - 2v_m}D\right)\frac{2r_m^3}{r_f^3} + \frac{2(1 + kv_f)}{1 - 2kv_f}D\right]\frac{1 - 2v_f}{2(1 + v_f)}$$

$$H = D$$

$$2B(1 + v_f)r_f = \left(-\frac{F}{r_f^2} + 2Hr_f\right)\frac{(1 + kv_f)}{k} \qquad (4.18a,b,c,d,f)$$

$$F = C$$

$$C = \left(-\frac{P_0}{2} - \frac{1 + v_m}{1 - 2v_m}D\right)r_m^3$$

Αντικαθιστώντας στην (4.18c) την εξίσωση (4.18f) και στη συνέχεια στην εξίσωση που προκύπτει την (4.18a) προκύπτει το τελικό σύστημα:

$$\begin{split} & \mathsf{B} = [(-\frac{P_0}{2} - \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} D) \frac{2r_m^3}{r_f^3} + \frac{2(1 + k\nu_f)}{1 - 2k\nu_f} D] \frac{1 - 2\nu_f}{2(1 + \nu_f)} \\ & H = D \\ & D = \frac{\frac{P_0 r_m^3}{r_f^2} (\frac{1 + k\nu_f}{2k} + (1 - 2\nu_f))}{2(1 - 2\nu_f) (\frac{1 + k\nu_f}{1 - 2k\nu_f} r_f - \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \frac{r_m^3}{r_f^2}) - \frac{1 + k\nu_f}{k} (\frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \frac{r_m^3}{r_f^2} + 2r_f)} = H \quad (4.19a, b, c, d, f) \\ & F = C \\ & C = (-\frac{P_0}{2} - \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} D) r_m^3 \end{split}$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος μας δίνει τις τιμές των σταθερών B,C,D,F και H . Στη συνέχεια αντικαθιστούμε αυτές τις σταθερές στην κάτωθι συνθήκη ενεργείας για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη σταθερά του μέτρου ελαστικότητας E_c

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 82 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

4.2 Συνθήκη ισορροπίας ενέργειας παραμορφώσεως στο σύνθετο υλικό

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (E_c) του κοκκώδους σύνθετου υλικού θα εφαρμόσουμε τη συνθήκη ισορροπίας της ενέργειας στο σφαιρικό τριφασικό μοντέλο. Με άλλα λόγια, η ενέργεια παραμορφώσεως του σύνθετου υλικού ισούται με το άθροισμα των ενεργειών παραμορφώσεως των τριών φάσεων του σύνθετου υλικού, δηλαδή του εγκλείσματος, της μήτρας και της ενδιάμεσης φάσης. Άρα,

$$\frac{1}{2} \int_{V_c} \frac{p_0^2}{K_c} dV_c = \frac{1}{2} \int_{V_f} (\sigma_{r,f} \varepsilon_{r,f} + \sigma_{\theta,f} \varepsilon_{\theta,f} + \sigma_{\varphi,f} \varepsilon_{\varphi,f}) dV_f + \frac{1}{2} \int_{V_m} (\sigma_{r,m} \varepsilon_{r,m} + \sigma_{\theta,m} \varepsilon_{\theta,m} + \sigma_{\varphi,m} \varepsilon_{\varphi,m}) dV_m + \frac{1}{2} \int_{V_i} (\sigma_{r,i} \varepsilon_{r,i} + \sigma_{\theta,i} \varepsilon_{\theta,i} + \sigma_{\varphi,i} \varepsilon_{\varphi,i}) dV_i$$
(4.20)

όπου K_c είναι το μέτρο διογκώσεως του σύνθετου υλικού. Εισάγοντας τις τάσεις και τις παραμορφώσεις από τις παραπάνω εξισώσεις και με $V = \frac{4}{3} \pi r^2$ και $dV = 4\pi r^2 dr$ έχουμε ότι:

$$\frac{1}{2}\int_{r_{f}}^{r_{h}} \frac{p_{0}^{2}}{K_{c}} 4\pi r^{2} dr = \frac{1}{2}\int_{0}^{r_{f}} \{ [\frac{2(1+v_{f})}{1-2v_{f}}B\frac{2B(1+v_{f})}{E_{f}}] + [\frac{2(1+v_{f})}{1-2v_{f}}B\frac{2B(1+v_{f})}{E_{f}}] + [\frac{2(1+v_{f})}{1-2v_{f}}B\frac{2B(1+v_{f})}{E_{f}}] \} 4\pi r^{2} dr + \frac{1}{2}\int_{r_{f}}^{r_{h}} \{ [\frac{2C}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{m})}{1-2v_{m}}D] [(\frac{2C}{r^{3}} + 2D)\frac{(1+v_{m})}{E_{m}}] + [-\frac{C}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{m})}{1-2v_{m}}D] [(-\frac{C}{r^{3}} + 2D)\frac{(1+v_{m})}{E_{m}}] + [-\frac{C}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{m})}{1-2v_{m}}D] [(-\frac{C}{r^{3}} + 2D)\frac{(1+v_{m})}{E_{m}}] + [-\frac{F}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{i}(r))}{1-2v_{i}(r)}D] [(-\frac{F}{r^{3}} + 2H)\frac{(1+v_{i}(r)}{E_{i}(r)}] + [-\frac{F}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{i}(r))}{1-2v_{i}(r)}H] [(-\frac{F}{r^{3}} + 2H)\frac{(1+v_{i}(r))}{E_{i}(r)}] + [-\frac{F}{r^{3}} + \frac{2(1+v_{i}(r))}{1-2v_{i}(r)}H] [(-\frac{F}{r^{3}} + 2H)\frac{(1+v_{i}(r))}{E_{i}(r)}] \} 4\pi r^{2} dr$$

$$(4.21)$$

Αντικαθιστώντας στην (4.21) τις σχέσεις (4.19a,b,c,d,f) έχουμε ότι:

$$\frac{2}{3} \frac{P_0^2 r_m^3}{K_c} = 8 \frac{(1+v_f)^2 B^2}{E_f (1-2v_f)} r_f^3 - \frac{12}{3} C^2 \frac{1+v_m}{E_m} [\frac{1}{r_m^3} - \frac{1}{r_i^3}] + \frac{24}{3} D^2 \frac{(1+v_m)^2}{E_m (1-2v_m)} (r_m^3 - r_i^3) + \\ + 12 C^2 \int_{r_f}^{r_i} \frac{1+v_i (r)}{E_i (r)} \frac{1}{r^4} dr + 24 D^2 \int_{r_f}^{r_i} \frac{(1+v_i (r))}{E_i (r) (1-2v_i (r))} r^2 dr$$

$$(4.22)$$

Θεωρώντας γραμμική μεταβολή των $E_i(r)$ και $v_i(r)$ που εξηγείται παρακάτω έχουμε ότι η μεταβολή των παραπάνω θα είναι ως εξής:

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 83 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$E_{i}(r) = \frac{E_{f}r_{i} - E_{m}r_{f}}{r_{i} - r_{f}} - \frac{E_{f} - E_{m}}{r_{i} - r_{f}}r = S - Gr$$
(4.23a)

$$v_i(r) = \frac{v_f r_i - v_m r_i}{r_i - r_f} + \frac{v_m - v_f}{r_i r_f} r = L + Mr$$
(4.23b)

Επομένως μετά από τις ολοκληρώσεις, τις απλοποιήσεις, την αντικατάσταση των σταθερών B,C,D,F και Η και αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις (4.23a) και (4.23b) στη (4.22) θέτοντας $K_c = \frac{E_c}{3(1-2v_c)}, U_f = \frac{r_f^3}{r_m^3}, U_m = \frac{r_m^3 - r_i^3}{r_m^3}$ και όπου D βάζουμε το D* που είναι η σταθερά D

άνευ της πιέσεως Ρο. Άρα έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} &\frac{1-2v_c}{E_c} = \frac{4(1-2v_f)}{E_f r_f^6} U_f (\frac{1}{2} - D^* (\frac{2(1+kv_f)}{1-2kv_f} - \frac{1+v_m}{1-2v_m} r_m^3))^2 + \\ &-2\frac{1+v_m}{E_m} (1-\frac{r_m^3}{r_i^3}) (\frac{1}{2} + D^* \frac{1+v_m}{1-2v_m})^2 + 4D^* \frac{(1+v_m)^2}{E_m (1-2v_m)} U_m + \\ &+ \frac{2(\frac{1}{2} + D^* \frac{1+v_m}{1-2v_m})^2 r_m^3}{S^4} (\frac{S(6G^2(L+1)(r_i - r_f) + 3G(r_i - r_f)S(L+2M(r_i - r_f) + 1) + S^2(2L+3M(r_i - r_f) + 2))}{(r_i - r_f)^3} + \\ &- 6G^2 \ln(r_i - r_f)(GL + G + MS) + 6G^2(GL + G + MS) \ln(G(r_i - r_f) - S)) + \\ &+ \frac{1}{2}D^* (\frac{48S^2(GL + G + MS)^2 \ln(G(r_i - r_f) - S)}{G^4(G(2L-1) + 2MS)} + \frac{6(r_i - r_f)(G(2L+5) + 2MS)}{G^2} + \\ &+ \frac{6(r_i - r_f)(9G^2 + 2G(2L+5)MS + 4M^2S^2)}{G^3M} - \frac{27(1-2L)^2 \ln(-2L - 2M(r_i - r_f) + 1)}{M^2(G(2L-1) + 2MS)} + \frac{8M(r_i - r_f)^3}{G}) \end{aligned}$$

Για την απλούστευση της παραπάνω εξίσωσης θεωρούμε ότι k=1 δηλαδή τη μέγιστη επίδραση της ενδιαμέσου φάσεως, άρα η παραπάνω σχέση θα πάρει τη παρακάτω μορφή:

$$\frac{1-2v_c}{E_c} = \frac{(1+v_f)^2(1-2v_m)^2}{(1-2v_f)(1+v_m)^2 E_f} v_f + \frac{(1-2v_m)}{E_m} v_m + \frac{3(1-2v_m)^2}{(1+2v_m)^2 r_f^3} v_f \int_{r_1}^{r_2} \frac{(1-v_t(r))^2}{(1-2v_i(r))E(r)} r^2 dr$$
(4.25)

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σελίδα **84**

$$\Rightarrow \frac{1-2v_c}{E_c} = \frac{(1+v_f)^2(1-2v_m)^2}{(1-2v_f)(1+v_m)^2 E_f} v_f + \frac{(1-2v_m)}{E_m} v_m + + \frac{3(1-2v_m)^2}{(1+2v_m)^2 r_f^3} v_f \frac{1}{48} \left(\frac{6(r_i - r_f)(2(2L+5)MSG + 4M^2S^2 + 9G^2)}{MG^3} + \frac{48S^2(LG + MS + G)^2 \ln(S - G(r_i - r_f))}{G^4((2L-1)G + 2MS)} + \frac{6(r_i - r_f)^2((2L+5)G + 2MS)}{G^2} + \frac{8M(r_i - r_f)^3}{G}\right)$$

$$(4.26)$$

4.2.1 Λόγος Poisson v_c συνθέτου υλικού

Ο λόγος Poisson ν_c, του σύνθετου κοκκώδους υλικού μπορεί να υπολογισθεί μέσω της σχέσης η οποία προκύπτει από το νόμο των φάσεων ο οποίος θεωρείται κατά γενική ομολογία μια καλή προσέγγισης μιας και η διαφορά μεταξύ των λόγων Poisson του εγκλείσματος και της μήτρας είναι μικρή. Αυτή η σχέσης πρέπει να μετασχηματισθεί για να περιέχει και την ενδιάμεσο φάση. Άρα

$$v_{c} = v_{f} \upsilon_{f} + v_{m} \upsilon_{m} + v_{i}(r) \upsilon_{i}$$
 (4.27)

η οποία γράφεται:

$$v_c = v_f v_f + v_m v_m + v_i(r) \frac{r_i^3 - r_f^3}{r_m^3}$$
 (4.28)

Εφ΄όσον ο λόγος Poisson στη περιοχή της ενδιαμέσου φάσεως είναι μεταβλητός έχουμε ότι:

$$v_{c} = v_{f} \upsilon_{f} + v_{m} \upsilon_{m} + \frac{3 \upsilon_{f}}{r_{m}^{3}} \int_{r_{i}}^{r_{f}} v_{i}(r) r^{2} dr \qquad (4.29)$$

4.3 Νόμοι μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της ενδιαμέσου φάσης

Το μέτρο ελαστικότητας E_i και ο λόγος Poisson v_i της ενδιάμεσης φάσης μπορουν να εκφρασθούν ως ένα πολυώνυμο n βαθμού με μεταβλητή την ακτίνα r.

Επομένως, έχουμε ότι:

$$E_i(r) = f(r) \text{ και } v_i(r) = g(r) (4.30)$$

$$\hat{\eta} \qquad E_i(r) = Ar^n + Br^{n-1} + Cr^{n-2} + \dots,$$

$$v_i(r) = A'r^n + B'r^{n-1} + C'r^{n-2} + \dots,$$
(4.31)

$$\hat{\sigma} \pi \text{ov } r_e < r < r_i.$$

Σελίδα **85**

Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Στη συγκεκριμένη εργασία θα θεωρήσουμε ότι η μεταβολή του $E_i(r)$ και $v_i(r)$ είναι γραμμική. Άρα θεωρούμε ότι $E_m \leq E_i(r) \leq E_f$ και $v_f \leq v_i(r) \leq v_m$, όταν $r_f \leq r \leq r_i$. Οι οριακές συνθήκες που θα χρησιμοποιήσουμε είναι:

Στο
$$r = r_f$$
: $E_i(r) = kE_f$ και $v_i(r) = v_f$ (4.32)
Ενώ Στο $r = r_i$: $E_i(r) = E_m$ και $v_i(r) = v_m$ (4.33)

Δεχόμεθα δηλαδή, ότι τα $E_i(r)$ και $v_i(r)$ της ενδιαμέσου φάσεως στο όριο αυτής με τη μήτρα είναι ίσα με E_m και v_m αντιστοίχως, ενώ στο όριο αυτής με το έγκλεισμα είναι ποσοστό των E_f και v_f αντιστοίχως, που εκφράζεται με το συντελεστή k. Για την μέγιστη επίδραση της ενδιάμεσης φάσης, θα θεωρήσουμε ότι το $E_i(r)$ και $v_i(r)$ στο όριο αυτής με το έγκλεισμα είναι ίσο με E_f δηλαδή κ=1 και v_f . Όπως αναφέραμε και στη προηγούμενη παράγραφο θεωρήσαμε γραμμική μεταβολή των $E_i(r)$ και $v_i(r)$ που είναι άλλωστε και η πιο απλή μορφή πολυωνύμου που μπορούν να πάρουν οι παραπάνω εκφράσεις.

Η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson στην ενδιάμεσο φάση μπορεί να υπολογισθεί από το παρακάτω τύπο:

$$E_{i} = \frac{1}{\nu_{i}} \int_{r_{f}}^{r_{i}} E_{i}(r) d\nu_{i} \text{ kat } \nu_{i} = \frac{1}{\nu_{i}} \int_{r_{f}}^{r_{i}} \nu_{i}(r) d\nu_{i} (4.34)$$

Επειδή η σχέση του μέτρου ελαστικότητας είναι συνάρτηση μόνο της ακτίνας r θα έχουμε ότι:

 $E_i(r) = A + Br (4.35)$ Στο r=α η εξίσωση (4.35) έχει ως εξής: $E_i = kE_f (4.36)$

Στο r=b η εξίσωση (4.35) και πάλι θα έχει ως εξής: $E_i = E_m$ (4.37)

Από τα παραπάνω έχουμε ότι:

$$A + B\alpha = kE_f$$
(4.38)
$$A + Bb = E_m$$

Αφαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$B\alpha - Bb = kE_f - E_m \implies$$
$$B = \frac{kE_f - E_m}{a - b} (4.39)$$

Αντικαθιστώντας στη (4.38α) την (4.39) βρίσκουμε ότι:

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 86 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

A =
$$kE_f - \frac{kE_f - E_m}{a - b}a$$
 (4.40)

Για τα εγκλείσματα και την ενδιάμεσο φάση έχουμε ότι:

$$\upsilon_f = \frac{a^3}{c^3} \, \mathrm{kat} \, \upsilon_i = \frac{b^3 - a^3}{c^3} \, (4.41)$$

4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων της μεταβολής των ^Ε και ^ν συναρτήσει της ακτίνας r:

Uf	Ui
0.05	0.0013
0.10	0.004
0.15	0.013
0.20	0.028
0.25	0.05

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1

Χρησιμοποιήθηκαν εγκλείσματα σιδήρου με r_f =75μm και η εποξειδική ρητίνη για αυτό το πείραμα είχε μέτρο ελαστικότητας E_m =3,5GN/m² ενώ ο λόγος Poisson ν_c=0,37, επομένως με βάση το τύπο:

$$v_f = \frac{r_f^3}{r_m^3}$$
 (4.42)

Προκύπτει ο πίνακας 4.2 που παρουσιάζει τη μεταβολή της ακτίνας r_m συναρτήσει της περιεκτικότητας εγκλείσματος $\upsilon_{\rm f.}$ Άρα

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 87 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$\mathbf{U_{f}}$	r _m
0.05	203.6
0.10	161.5
0.15	141.1
0.20	128.2
0.25	119.05
0.30	112.03

Από τα προηγούμενα και με βάση το τύπο:

$$U_i = \frac{r_i^3 - r_f^3}{r_m^3} (4.43)$$

Οι τιμές της ενδιάμεσης φάσης συναρτήσει της περιεκτικότητας U_f θα έχουν ως εξής και παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρακάτω πίνακα:

ΠΙΝΑ	ΚΑΣ	4.3
-------------	-----	-----

$\mathbf{U}_{\mathbf{f}}$	Ui	$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{i} + \mathbf{r}_{f}$
0	0	0
0.05	0.0013	0.30
0.10	0.0040	1.06
0.15	0.0130	2.12
0.20	0.028	3.53
0.25	0.050	5.00

Σελίδα

ίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

4.4.1.1 Μελέτη του τριφασικού μοντέλου για εγκλείσματα (Fe) με r_f =75μm

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η καμπύλη μεταβολής της περιεκτικότητας U_i της ενδιάμεσης φάσης συναρτήσει της περιεκτικότητας U_f σε έγκλεισμα. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα U_f του εγκλείσματος, αυξάνεται και η περιεκτικότητα U_i της ενδιάμεσης φάσης. Αντίθετα παρατηρούμε μέσω του Σχήμα 4.2 ότι η καμπύλη μεταβολής της περιεκτικότητας U_m συναρτήσει της περιεκτικότητας U_f σε έγκλεισμα παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι με αύξηση της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων U_f έχει σαν άμεση συνέπεια τη μείωση της περιεκτικότητας σε μήτρα U_m όπως υποδεικνύει και ο νόμος των φάσεων για τα σύνθετα υλικά:

$$1 = U_m + U_f + U_i (4.44)$$

Η πυκνότητα d_c του σύνθετου υλικού λαμβάνεται από τη αντίστοιχη σχέση του νόμου των φάσεων για την πυκνότητα των σύνθετων υλικών:

$$d_c = d_f U_f + d_m U_m (4.45)$$

όπου: d_f : η πυκνότητα του εγκλείσματος με $d_f = 7800 Kg \ / m^3$

 d_m :η πυκνότητα που έχει η μήτρα με $d_m = 1210 Kg / m^3$

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η καμπύλη μεταβολής της πυκνότητας d_c του σύνθετου υλικού συναρτήσει της περιεκτικότητας U_f σε έγκλεισμα. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του U_f εγκλείσματος, αυξάνεται, σχεδόν γραμμικά και η πυκνότητα d_c του σύνθετου υλικού.

Για το μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιούμε μειωτικό συντελεστή k που λαμβάνει 5 διαφορετικές τιμές μεταξύ του 0 και 1. Η καμπύλη στο Σχήμα 4.4 σχεδιάζεται για σταθερή τιμή περιεκτικότητας του εγκλείσματος $U_f = 0,25$ για την οποία η τιμή της ακτίνας της ενδιάμεσης φάσης υπολογίζεται ίση με $r_i = 79,68nm$. Παρατηρούμε από το Σχ.(4.3) ότι καθώς αυξάνεται η ακτίνα από την τιμή 0 έως και την τιμή $r_f = 75 \mu m$ η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι σταθερή και ίση με $E_f = 210GPa$. Στο διάστημα $75 \le r_i \le 79,68\mu m$ παρατηρούμε ότι το E_i ελαττώνεται γραμμικά για τις διάφορες τιμές του k. Τέλος, καθώς η ακτίνα αυξάνεται από την τιμή 79,68μm έως και την τιμή 119μm (εκτός διαγράμματος) η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι σταθερή και ίση με $E_m = 3,2GPa$.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η καμπύλη μεταβολής του λόγου Poisson v_i της ενδιάμεσης φάσης συναρτήσει της ακτίνας r του τριφασικού κυλινδρικού μας μοντέλου. Η καμπύλη σχεδιάζεται για σταθερή τιμή περιεκτικότητας του εγκλείσματος $U_f = 0,25$ για την οποία η τιμή της ακτίνας r_i της ενδιάμεσης φάσης υπολογίζεται ίση με $r_i = 79,68nm$

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 89 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης Στη συνέχεια κάνουμε μια σύγκριση του τριφασικού μοντέλου που μελετήσαμε προηγουμένως με τα υπόλοιπα γνωστά μοντέλα που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2 χρησιμοποιώντας εγκλείσματα σιδήρου (Fe) r_f =75μm.

Από το Σχήμα 4.6 παρατηρούμε ότι κανένα από τα μελετούμενα θεωρητικά μοντέλα δεν μπορεί να προσεγγίσει τις πειραματικές τιμές, επομένως απορρίπτονται από τη συνέχεια της μελέτης.

Αντίστοιχα από το Σχήμα 4.7 βλέπουμε ότι το μοντέλο του Counto δεν προσεγγίζει καμία από τις πειραματικές πέραν από αυτή του $U_f = 0\%$. Ομοίως και το μοντέλο του Hirsh προσεγγίζει και αυτό με τη σειρά του τις πειραματικές τιμές για περιεκτικότητες εγκλεισμάτων μόνο για $U_f = 0\%$ και $U_f = 0.05$ και ύστερα αποκλίνει αισθητά. Αντιθέτως τα μοντέλα των Sideridis-Theocharis και το τριφασικό μοντέλο προσεγγίζουν, σχέδον πλησιάζουν τις πειραματικές τιμές για περιεκτικότητες μεγαλύτερες από τις προαναφερθείσες παρατηρείται μια μικρή απόκλιση από τις πειραματικές τιμές για το μοντέλο των Sideridis-Theocharis ενώ το τριφασικό μοντέλο συνεχίζει να παρουσιάζει αυτή την σχεδόν ταύτιση με τις πειραματικές τιμές.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις που προέκυψαν από τη μελέτη των διαγραμμάτων επιβεβαιώνονται και από το Σχήμα 4.8 που παρουσιάζει την απόκλιση του κάθε ενός μοντέλου από τις τιμές του πειράματος. Δηλαδή βλέπουμε ότι μόνο ο τύπος του τριφασικού μοντέλου έχει μια ποσοστιαία απόκλιση της τάξεως του 1,37% και στη συνέχεια ο τύπος των Sideridis-Theocharis που παρουσιάζει και αυτός με τη σειρά του μια ποσοστιαία απόκλιση από τις πειραματικές τιμές της τάξεως του 3,47%. Οι υπόλοιποι τύποι παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις που μπορούν να φτάσουν και το ποσοστό του 15% όπως συμβαίνει με το τύπο των Eilers-Van Dyck.

4.4.1.1 Μελέτη του τριφασικού μοντέλου για εγκλείσματα (Al) με rf =80μm.

Εντελώς ανάλογα έγινε και η διαδικασία υπολογισμού των U_i, U_f, U_m, r_i και r_m για εγκλείσματα αλουμινίου (Al) ακτίνας $r_f = 80 \mu m_{\bullet}$. Άρα μπορούμε να περάσουμε στη σύγκριση του τριφασικού μοντέλου με τα υπόλοιπα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2.

Από το Σχήμα 4.9 παρατηρούμε ότι οι τύποι των Eilers-Van Dyck και Guth-Smallwood αποκλίνουν αρκετά από τις πειραματικές τιμές και μάλιστα ο δεύτερος παρουσιάζει μια αυξανόμενη απόκλιση όσο αυξάνεται και η συγκέντρωση των κόκκων. Αντίθετα ο τύπος του Kerner παρουσιάζει μια πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών τιμών για όλο το εύρος του ποσοστού εγκλεισμάτων και μάλιστα για $U_f = 0,05$ υπάρχει σχεδόν ταύτιση της πειραματικής τιμής με αυτή του θεωρητικού μοντέλου όπως αντίστοιχα συμβαίνει και για περιεκτικότητες εγκλεισμάτων για $U_f = 0,15$ και $U_f = 0,30$.

Τέλος από τη παρατήρηση του Σχήμα 4.10 μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι όλα τα μοντέλα μπορούν και προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές. Πιο αναλυτικά έχουμε ότι το τριφασικό μοντέλο για όλο το εύρος εγκλεισμάτων μας δίνει τιμές αρκετά πιο κοντά



από τα υπόλοιπα μοντέλα μιας και τα υπόλοιπα μοντέλα για περιεκτικότητες εγκλεισμάτων $U_f = 0,20$ εμφανίζουν μια αισθητή απόκλιση τις αντίστοιχες τιμές του πειράματος.

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζομαι τις ποσοστιαίες αποκλίσεις των μοντέλων, που μελετήσαμε στο Σχήμα 4.10, από τις πειραματικές τιμές. Διαπιστώνουμε και πάλι ότι το τριφασικό μοντέλο είναι αυτό που προσεγγίζει τις πειραματικές τιμές περισσότερο μιας και παρουσιάζει μια μέση απόκλιση 1,4% έπειτα είναι το μοντέλο των Sideridis-Theocharis με μέση απόκλιση 1,74% και τελευταίο είναι το μοντέλο του Hirsh για x=0,002 με μέση απόκλιση 2,07%.

Εν κατακλείδι, το τριφασικό μοντέλο καταφέρνει να πετύχει μια καλύτερη προσέγγιση στις πειραματικές τιμές σε σχέση με τα άλλα θεωρητικά μοντέλα διότι το τριφασικό μοντέλο λαμβάνει υπόψιν του και την ενδιάμεση φάση που δημιουργείται στα σύνθετα κοκκώδη υλικά μεταξύ του εγκλείσματος και της μήτρας. Μάλιστα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε έγκλεισμα αυξάνεται αυτή η μεσοφάση που δημιουργείται με αποτέλεσμα με την αύξηση του εγκλείσματος η ενδιάμεση φάση να έχει προοδευτικά ένα πιο ενεργό ρόλο στη τιμή του μέτρου ελαστικότητας.

<u>4.5 Μεταβολή της μεσοφάσης συναρτήσει της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων για</u> διάφορες διάταξεις.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε τη μεταβολή της μεσοφάσης συναρτήσει της περιεκτικότητας εγκλεισμάτων θα θεωρήσουμε ότι:

$$U_i = AU_f^3 + BU_f^2 + CU_f + D(4.46)$$

Λαμβάνοντας τώρα συνοριακές συνθήκες για τη σχέση (4.46) θα μπορέσουμε να βρούμε τις σταθερές A,B,C και D. Άρα έχουμε ότι:

$$\Gamma\iota\alpha U_{\rm f} = 0 \Longrightarrow U_{\rm i} = 0 \Longrightarrow D = 0(4.47)$$

$$\Gamma\iota\alpha U_{\rm f} = 1 \Longrightarrow U_{\rm i} = 0 \Longrightarrow A + B + C = 0(4.48)$$

$$\Gamma\iota\alpha U_{\rm f} = 0 \Longrightarrow \frac{\partial U_i}{\partial U_f} = 0 \Longrightarrow C = 0(4.49)$$

Aπό τις (4.48) και (4.49) έχουμε ότι: A+B=0(4.50) Για U_f =0,3 \Rightarrow U_i=0,06 \Rightarrow 1==0,45A+1,5B(4.51) Επομένως από τις (4.50) και (4.51) και την επίλυση του συστήματος προκύπτει ότι:

$$A = -0,95$$

 $B = 0,95$

Άρα το πολυώνυμο θα πάρει την εξής παρακάτω μορφή:

$$U_i=0.95U_f^2(1-U_f^2(4.52))$$

Τέλος θέλουμε να υπολογίσουμε τη της καμπύλης άρα από τη παράγωγο

$$\frac{\partial U_i}{\partial U_f} = 0 \implies U_f = 0,66(4.53)$$

Επαναλαμβάνουμε τη παραπάνω διαδικασία για τα διάφορα κυβικά μοντέλα διάταξης που έχουμε όπου το καθένα μπορεί να επιτύχει μέγιστη στοίβαξη για περιεκτικότητες εγκλεισμάτων

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 91 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

μικρότερες του 1. Επομένως στη παραπάνω διαδικασία αντικαθιστούμε όπου U_f την αντίστοιχη τιμή που έχουμε για μέγιστη στοίβαξη, άρα:

- Για cubic έχουμε ότι: $(U_f)_{max}$ =0.527, άρα για το cubic θα έχει μέγιστο η καμπύλη U_i στο U_f = 0,34.
- Για Body center έχουμε ότι: $(U_f)_{max}=0.68$, άρα για το body center θα έχει μέγιστο η καμπύλη U_i στο $U_f=0.45$.
- Για face center έχουμε ότι: $(U_f)_{max}=0.74$, άρα για το face θα έχει μέγιστο η καμπύλη U_i στο $U_f=0.58$.
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Σχήμα 4.1

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 94 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.2

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 95 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.3

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 96 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 97 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 98 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.6

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 99 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.7

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 100 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Συγκριτικός πίνακας των μοντέλων	
Einstein	5,70%
Paul	5,78%
Kerner	5,27%
Mooney	9,26%
Eilers-Van Dyck	15,0%
Hirsh	6,70%
Counto	6,01%
Sideridis-Theocharis	3,47%
Τριφασικό μοντέλο	1,37%

Σχήμα 4.8

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.9

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 102 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.10

Hirsh	2,07%
Sideridis-Theocharis	1,79%
Τριφασικό μοντέλο	1,4%

Σχήμα 4.11

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 103 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.12

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 104 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχήμα 4.13 Διφασικό μοντέλο



Σχήμα 4.14 Τριφασικό μοντέλο

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 50</u>

<u>ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΓΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</u> <u>ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΟΥ FICK</u>

5.1 Χαρακτηρισμός συνθέτων υλικών μήτρας εποξειδικής ρητίνης με τη βοήθεια του φαινομένου της υγροαπορρόφησης.

Είναι γνωστό εδώ και χρόνια ότι οι εποξειδικές ρητίνες απορροφούν αρκετά μεγάλο ποσοστό υγρασίας της τάξεως έως και 8% όταν βρίσκεται σε αντίστοιχο υγρό περιβάλλον. Αυτό οφείλεται κυρίως στη «moisture affinity» (ευαισθησία στην υγρασία) ορισμένων συναρτησιακών μοριακών ομάδων με υψηλό πολικό δεσμό που σχηματίζονται κατά τη θερμική κατεργασία (curring) της ρητίνης. Η υγροαπορρόφηση έχει σαν κύρια αποτελέσματα την πλαστικοποίηση με την ταυτόχρονη διόγκωση της μήτρας και τη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μεταβάσεως (Tg) της μήτρας του σύνθετου υλικού.

Αυτά τα αποτελέσματα οδηγούν, όμως, σε αρνητικές επιπτώσεις σε ότι αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπου παρατηρήθηκε κυρίως η μείωση της αντοχής του υλικού. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πλατιά έρευνα βελτίωσης αυτής της κατάστασης από μεγάλες αεροναυπηγικές και διαστημικές εταιρείες οι οποίες χρησιμοποιούσαν σύνθετα υλικά μήτρας ρητίνης ενισχυμένα με ίνες βορίου ή γραφίτη. Μέχρι και στις μέρες μας οι σχετικές έρευνες συνεχίζονται με αμείωτο ρυθμό, διότι όπως για κάθε φυσικό φαινόμενο μεγάλης πρακτικής σημασίας, υπάρχουν πάντα βασικές λεπτομέρειες για μελέτη. Για αυτό λοιπόν στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα προσπαθήσουμε να δώσουμε κάποιες νέες και συμπληρωματικές ερμηνείες ως προς το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού υπό την επίδραση της υγροαπορρόφησης. Παρακάτω θα δώσουμε ορισμένες βασικές έννοιες ύπαρξης της μεσοφάσης και μερικές απαραίτητες φυσικομαθηματικές βάσεις, που θα βοηθήσουν για το περεταίρω σχολιασμό και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

<u>5.1.1 Βασικές έννοιες της μεσοφάσης των κοκκωδών σύνθετων υλικών</u>

Η φυσική συμπεριφορά ενός διφασικού σύνθετου συστήματος εξαρτάται από τον συνδυασμό πολλών παραμέτρων, μερικές από τις οποίες εξαρτώνται από το έγκλεισμα, ενώ οι υπόλοιπες εξαρτώνται από τη μήτρα. Μεταξύ των παραμέτρων της πρώτης ομάδας, μπορούν να περιληφθούν η γεωμετρία των εγκλεισμάτων, το μέγεθός τους, η κατανομή τους, η κατ' όγκον περιεκτικότητα τους και οι σχετικές αποστάσεις. Στη δεύτερη ομάδα μπορούν να περιληφθούν η φυσικοχημική κατάσταση της μήτρας, ο βαθμός πολυμερισμού, η κρυσταλλικότητα, ο βαθμός διασταυρώσεως και άλλες.

Εκτός από τις προαναφερθείσες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την ολική συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού, υπάρχει μια παράμετρος η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μήτρας και των εγκλεισμάτων. Αυτή είναι η ποιότητα προσφύσεως μεταξύ των δύο φάσεων ή με

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 106 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

άλλα λόγια ο βαθμός επαφής και συνοχής που αναπτύσσεται στην ενδιάμεση επιφάνεια μήτραςκόκκων.

Η πρόσφυση μεταξύ των κόκκων και μήτρας εξαρτάται μεταξύ άλλων πάρα πολύ από τη τραχύτητα των επιφανειών των εγκλεισμάτων. Πράγματι, ο βαθμός τραχύτητας δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή δημιουργεί μικρές συγκεντρώσεις τάσεων πλησίον των κυματισμών των επιφανειών.

Επιπλέον, δημιουργείται ένας περιορισμός της κινητικότητας των μοριακών αλυσίδων της μήτρας κατά την διάρκεια του πολυμερισμού στις περιοχές που περιβάλλουν το κάθε ένα από τα εγκλείσματα εξ' αιτίας της προσκόλλησης τους στην επιφάνεια των εγκλεισμάτων. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία ενός ενδιαμέσου στρώματος, μιας διεπιφάνειας, η οποία αποτελείται από ένα διαφορετικό υλικό από αυτό της καθαρής μήτρας. Η πυκνότητα όπως και οι θερμομηχανικές ιδιότητες, του ενδιαμέσου στρώματος εξαρτώνται επίσης από το μέγεθος του εγκλείσματος. Όσο πιο λεπτοί είναι οι κόκκοι τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση στη κινητική του πολυμερισμού και στο σχηματισμό του ενδιαμέσου στρώματος.

Περιγράψαμε έτσι το σχηματισμό του ενδιαμέσου στρώματος το οποίο ονομάζουμε ενδιάμεση φάση ή μεσοφάση. Η σημασία της μπορεί να διαπιστωθεί όταν συγκρίνουμε τα θεωρητικά μοντέλα που περιγράφουν τη θερμομηχανική συμπεριφορά, τα οποία λαμβάνουν υπ' όψιν τους την ενδιάμεση φάση με αυτά που θεωρούν τέλεια πρόσφυση μεταξύ εγκλεισμάτων και μήτρας. Γίνεται εμφανές ότι τα πρώτα μοντέλα θα πρέπει να περιγράψουν καλύτερα μια πραγματική κατάσταση, από τα δεύτερα, τα οποία αναφέρονται σε μια ιδανική κατάσταση η οποία δεν υφίσταται στα σύνθετα υλικά. Όντως η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων, που προέρχονται από τους δύο τύπους μοντέλων και των πειραματικών αποτελεσμάτων δείχνει ότι υπάρχει καλύτερη σύμπτωση στη περίπτωση των μοντέλων που λαμβάνουν υπ' όψιν την ενδιάμεση φάση.

Ένας άλλος λόγος για την παραδοχή της ύπαρξης της ενδιάμεσης φάσης είναι το γεγονός ότι επειδή η άμεση γειτονιά κάθε εγκλείσματος χαρακτηρίζεται από συγκέντρωση τάσεων, κενών, ακαθαρσιών κλπ. υπάρχει έτσι μια αυξημένη δυνατότητα ανάπτυξης μικρορωγμών σε αυτή τη περιοχή, που μπορούν να δημιουργήσουν την έναρξη μιας πλήρους και πρώιμου θραύσεως του σύνθετου υλικού.

Στη περίπτωση τώρα της υδροαπορροφήσεως η δράση της υγρασίας οδηγεί στη μερική διάρρηξη των συνδέσμων μεταξύ μήτρας και εγκλεισμάτων και το σχηματισμό επιπλέον κοιλοτήτων, οι οποίες θα γεμίσουν με νερό. Υποστηρίζεται ότι το νερό εισέρχεται στον ενδιάμεσο όγκο της μεσοφάσης με ένα ρυθμό περίπου 450 φορές ταχύτερα απ' ότι στη μήτρα και συνεπώς οποιαδήποτε απορροφηθείσα υγρασία συγκεντρώνεται κατά προτίμηση στην ενδιάμεση φάση [45]. Μια εκτίμηση του όγκου της ενδιάμεσης φάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μετρήσεις θερμοχωρητικότητας είτε με θεωρήσεις μοντέλων [2,45].

5.2 Μοντέλο διάχυσης του Fick

Ο μηχανισμός της διάχυσης σύμφωνα με τον οποίο έχουμε μεταφορά μάζας ύλης (ή θερμότητας) από ένα σημείο σε άλλο μπορεί να εξηγήσει πλήρως το φαινόμενο της υγροαπορρόφησης και είναι αποτέλεσμα τυχαίων μοριακών κινήσεων που επιτελούνται στο στερεό.

Στη παρούσα μελέτη θα μας απασχολήσει ο μηχανισμός της μονοδιάστατης διάχυσης. Αυτός περιγράφεται αναλυτικά μέσω του δεύτερου νόμου του Fick για μια άπειρη λεπτή πλάκα και δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial^2 (D_x \partial c)}{\partial x^2}$$
(5.1)

Όπου,

c: η συγκέντρωση της διαχεόμενης ύλης

x: η συντεταγμένη διάχυσης, η κάθετη στην επιφάνεια διείσδυσης

 D_x : ο συντελεστής διάχυσης (Diffusivity)

Όμως για τη περίπτωση όπου ο συντελεστής διάχυσης είναι ανεξάρτητος του χ Dx= c, o δεύτερος νόμος του Fick που είναι σε διαφορική μορφή έχει αναλυτική λύση η οποία για ορισμένες αρχικές συνθήκες θα έχει τη μορφή προσεγγιστικής αναλυτικής λύσης [46,47] G, όπου:

$$G = \frac{m_t - m_i}{m_{\infty} - m_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\exp(-2(2j-1)^2 \pi^2 (\frac{D_x t}{h^2}))}{(2j-1)^2}$$
(5.2)

Όπου:

h: είναι το πάχος του δοκιμίου (πλάκας) κατά τη διεύθυνση του οποίου γίνεται η διάχυση (0<x<h)

 m_t : είναι η τρέχουσα τιμή του βάρους της απορροφούμενης υγρασίας επί της εκατό του αρχικού βάρους.

 m_i : η αρχική τιμή.

 m_{∞} : η αντίστοιχη τιμή για συνθήκες κορεσμού.

Από τη παραπάνω λύση του δεύτερου νόμου του Fick παρατηρούμε την εξάρτηση της απορροφούμενης υγρασίας από δύο παράγοντες: 1^{ον} την τιμή κορεσμού, και 2^{ον} από τον όρο της εκθετικής συνάρτησης ο οποίος καθορίζει και το ρυθμό της υγροαπορρόφησης ή της αφύγρανσης. Ακόμη η τιμή κορεσμού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους είναι: το ποσοστό μικροκενών και μικρορωγμών, της περιεκτικότητας σε ρητίνη και εγκλείσματα αλλά και της πίεσης των υδρατμών. Από τα παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η τιμή κορεσμού είναι των

μικροκενών. Επιπροσθέτως, η τιμή του ρυθμού διάχυσης εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης σε υγρό περιβάλλον, το πάχος του δοκιμίου και της σταθεράς διαχύσεως. Η σταθερά διαχύσεως D_x εξαρτάται και αυτή με τη σειρά της από τη θερμοκρασία, το βαθμό εμποδίου των κόκκων, του βαθμού τοπικής διόγκωσης της μήτρας από το εμποτισμό αυτής και της τοπικής συγκέντρωσης της υγρασίας.

Γνωρίζουμε ότι το D_x ακολουθεί μια Arrhenius τύπου εξάρτηση όμως στη συγκεκριμένη εργασία δεν θα μας απασχολήσει ο παράγοντας της θερμοκρασίας μιας και τα πειράματα της υγροαπορρόφησης διεκπεραιώθηκαν κάτω από σταθερή θερμοκρασία(περίπου 50^{0} C). Όμως για το παράγοντα εμποτισμού με διόγκωση μήτρας υπάρχουν πολλά πειράματα που δείχνουν ότι λόγο αυτής αναπτύσσονται ανάλογες εσωτερικές τάσεις οι οποίες περιπλέκουν την μελέτη της μηχανικής με αποτέλεσμα να πρέπει να ληφθεί υπόψιν.

Στο παρακάτω διάγραμμα παραδείγματος χάριν δίνονται ορισμένα πειραματικά δεδομένα [47] από τα οποία υπολογίζετε προσεγγιστικά ότι:

$$e_m = 0.5m_t$$
 (5.3)

Όπου:

em: η εκατοστιαία εσωτερική διόγκωση της μήτρας.

mt: η τρέχουσα τιμή της υγροαπορρόφησης επί της εκατό του αρχικού βάρους.

Η προσεγγιστική αναλυτική λύση (5.2) με τη χρήση μαθηματικών προσεγγίσεων [46] μπορεί να εκφραστεί μέσω της "ακριβούς αναλυτικής" κλειστής σχέσης:

$$\frac{m_t}{m_{\infty}} = G = 1 - \exp(-7.3 \frac{D_x t^{3/4}}{h^2}) \quad (5.4)$$

Λογαριθμίζοντας την παραπάνω σχέση έχουμε ότι:

$$Z = \ln(1-G) = -7.3(\frac{D_x}{h^2})t^{3/4} = AY \quad (5.5)$$

$$\mu \varepsilon Y = t^{3/4} \text{ kan } A = -7.3D_x / h^2$$

Η σχέση (4.5) είναι πλέον γραμμική και η παράσταση των διαγραμμάτων μπορεί να γίνει για χρόνο t^3/4. Επομένως με τη μορφή που έχει η σχέση (5.5) μπορούμε να ελέγξουμε κατά πόσο είναι γραμμική η σχέση της υγροαπορροφητικότητας. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε να μην έχουμε γραμμική σχέση για όλο τη χρονική διάρκεια των μετρήσεων, με αποτέλεσμα να μην είναι σταθερή η κλίση Α της σχέσης (5.5) για όλο το φάσμα του χρόνου. Πολλά πειράματα όμως έδειξαν πως το D_x για τέτοια υλικά είναι σταθερό, με άλλα λόγια ανεξάρτητο της τιμής της τοπικής συγκέντρωσης της υγρασίας. Για αυτό το λόγο η αρχική σχέση (5.4) δεν μπορεί να ισχύει γενικά για τα πειράματά μας. Την απάντηση για αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να την ψάξουμε στη ''γεωμετρία'' διάχυσης των δοκιμίων, δηλαδή στο τρόπο με τον οποίο διαχέεται η υγρασία μέσα στα δοκίμια. Πρακτικά αυτό σημαίνει για τα πειράματά μας ότι η διάχυση του υγρού στα δοκίμια δεν μπορεί να είναι μονοδιάστατη (μεγάλη πλάκα μικρού πάχους) αλλά πρέπει να είναι πολυδιάστατη (εισχώρηση

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 109 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

υγρού μέσω πολλών επιφανειών – διατομών μιας και τα δοκίμια είναι παραλληλεπίπεδα με διαστάσεις 1.2x1.2x2.4.

Η μαθηματική προσέγγιση της λύσης (5.2) της διαφορικής εξίσωσης διάχυσης (4.1) μας δείχνει ότι για πολύ μικρούς χρόνους t, η λύση είναι γραμμικής μορφής ως προς Y=t^1/2, άρα η τελική σχέση αυτού του είδους είναι [46]:

$$Z = \frac{m_t}{m_{\infty}} = \frac{4}{\pi^{1/2}h} (D_x) t^{1/2} = AY \quad (5.6)$$

Στα πρώτα στάδια της διάχυσης ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των μετώπων (επιφανειών) διείσδυσης του υγρού είναι αμελητέος, ως εκ τούτου η παραπάνω σχέση μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε επιφάνεια (άξονα x,y,z) ξεχωριστά και ανεξάρτητα με το αντίστοιχο D_x , D_y , και D_z . Η παραπάνω σχέση έχει ως εξής μιας και ο μηχανισμός της διάχυσης είναι τριαξονικός:

$$Z = \frac{4}{\pi^{1/2}} (D^{1/2}) t^{1/2}$$
 (5.7)

με D να είναι ο ισοδύναμος – τρισδιάστατος συντελεστής διάχυσης.

Η σχέση που μας δίνει το D είναι:

$$D = D_x [1 + \frac{h}{l} (\frac{D_y}{D_x})^{1/2} + \frac{h}{n} (\frac{D_z}{D_x})^{1/2}]^2 (5.8)$$

Για μη ομοιογενή υλικά όπως τα ινώδη και τα φυλλώδη, ενώ για τα ομοιογενή υλικά όπως είναι τα κοκκώδη που μας ενδιαφέρουν ισχύει ότι:

$$D_{x=} D_{y=} D_{z},$$

Και έχουμε ότι:
$$D = D_{x} (1 + \frac{h}{l} + \frac{h}{n})^{2}$$
 (5.9)

όπου l,h και n είναι τα μήκη των ακμών μιας παραλληλεπίπεδης πλάκας.

Η διάχυση που λαμβάνει χώρα γίνετε μέσω των έξι επιφανειών της παραλληλεπίπεδης πλάκας. Στη δική μας περίπτωση έχουμε ότι ο λόγος των ακμών είναι h/l=h/n=2 όπου h=2.4cm και n=l=1.2cm. Για την υλοποίηση των γραφικών παραστάσεων πρέπει να κάνουμε πέρασμα από πραγματικό χρόνο t σε χρόνο t^1/2, άρα τα διαγράμματα της υγροαπορρόφησης Σχ.(5.1) Σχ.(5.2) Σχ.(5.3) Σχ.(5.4) Σχ.(5.5) Σχ.(5.6) για μικρούς χρόνους μας δίνουν όντως μια τέτοια γραμμική συμπεριφορά. Άρα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η σχέση (5.7) είναι πιο γενικής φύσεως από τη (5.4) σε ότι αφορά τη γεωμετρία διάχυσης για πολύ μικρούς χρόνους. Από όλα τα παραπάνω μπορέσαμε να δείξουμε το πολύ σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει η γεωμετρία των δοκιμίων στην συμπεριφορά αυτών στην υγροαπορρόφηση.

Στην υγροαπορρόφηση πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και ο ρυθμός υγροαπορρόφησης ο οποίος εκφράζεται μέσω του συντελεστή διάχυσης D και δίνετε από τη σχέση:

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 110 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

$$D = \pi \left(\frac{h}{4m_{\infty}}\right)^2 \left(\frac{m_2 - m_1}{t_2^{1/2} - t_1^{1/2}}\right)^2 = d\left(\frac{\tan(a)}{m_{\infty}}\right)^2$$
(5.10)

Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης δίνετε παρακάτω, με "α" να είναι η κλίση της ευθείας και d η σταθερά γεωμετρίας με τύπο d= π (h/4)^2. Απο το διάγραμμα της απορρόφησης υγρασίας (%) συναρτήσει του ποσοστού του πλαστικοποιητή Σχ.(5.3) διαπιστώνουμε ότι ο πλαστικοποιητής έχει την τάση να αυξάνει το ρυθμό διάχυσης του υγρού. Αυτό οφείλετε στο γεγονός ότι η παρουσία του πλαστικοποιητή έχει τη τάση να αυξάνει τα μικροκενά μεταξύ των μακρομορίων, επιπλέον η θερμοκρασία δημιουργεί μικροσπηλαιώσεις (microcavitations). Όλα τα παραπάνω κάνουν πιο εύκολη την εισχώρηση των μορίων του ύδατος, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διάχυσης.

Η συμπεριφορά του ρυθμού απορρόφησης μπορεί να γίνει και μέσω των διαγραμμάτων αναγωγής σε καθαρή μήτρα. Ο ρυθμός που θα προκύψει μέσω αυτής της μεθόδου θα πρέπει να είναι διαφορετικός από εκείνο που θα προκύψει μέσω του κλασσικού διαγράμματος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γιατί η αναγωγή δίνει μια πλασματική εικόνα της συμπεριφοράς απορρόφησης. Δηλαδή η αναγωγή καθ' αυτή σαν πράξη απεικόνισης του βαθμού απορρόφησης της καθαρής μήτρας δεν είναι δυνατή γιατί γίνετε ένα σώμα το πλέγμα της ρητίνης και τα μόρια του πλαστικοποιητή.

Για τη περίπτωση που έχουμε μήτρα με κόκκους η διαδικασία της αναγωγής σε καθαρή μήτρα μεταβάλλει τα αρχικά διαγράμματα των πειραματικών μετρήσεων για τον υπολογισμό του ρυθμού απορρόφησης, όπως αυτό φαίνεται από τα διαγράμματα Σχ.(5.5) και Σχ.(5.6). Θεωρώντας ότι η απορρόφηση κορεσμού m_{∞} δεν θα μεταβάλλεται, σημαντικά για την ίδια μήτρα, διαπιστώνουμε ότι ο ρυθμός διάχυσης είναι μειωμένος εξαιτίας της ύπαρξης των κόκκων.

Ο συντελεστής διάχυσης D εξαρτάται από διάφορους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα μέσα στο υλικό όπως αυτός της εκτροπής-παρεμπόδισης εξαιτίας των εμποδίων που προκαλούν οι κόκκοι αλλά και λόγο των μικροκενών που δημιουργούνται και πάλι εξαιτίας των κόκκων εντός της μήτρας με αποτέλεσμα την διευκόλυνσης εισχώρησης της υγρασίας εντός του υλικού. Τα μικροκενά δημιουργούνται στα κοκκώδη υλικά εξαιτίας της ύπαρξης της μεσοφάσης (interphase) την οποία μπορούμε να την θεωρήσουμε σαν μια περιοχή με χαλαρή συνοχή [45]. Δηλαδή όταν σε ένα κοκκώδες υλικό έχουμε αύξηση του ποσοστού των κόκκων έχουμε και αντίστοιχα αύξηση του ποσοστού των κόκκων έχουμε και αντίστοιχα αύξηση του ποσοστού όγκου (επιφάνεια) της μεσοφάσης και ως εκ τούτου την αύξηση του ολικού ρυθμού διάχυσης. Για αυτό το λόγο ο ρυθμός εισχώρησης των μορίων νερού μέσα στη μεσοφάση μπορεί να είναι ακόμα και 450 φορές μεγαλύτερη από αυτή στη μήτρα.

Στη περίπτωση που κυριαρχούσε μόνο ο μηχανισμός της μεσοφάσης, τότε όλες οι καμπύλες με ποσοστό μεγαλύτερο από 0% σε κόκκους θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω από τη καμπύλη της σκέτης ρητίνης. Αυτό όμως δεν συμβαίνει μιας και ο ρυθμός υγροαπορρόφησης μειώνεται αρκετά αν λάβουμε υπόψιν τη σχέση (4.10) όπου η κλίση μειώνεται ενώ το όριο κορεσμού της καθαρής ρητίνης m_{∞} θα πρέπει να παραμένει σταθερό ή να μεταβάλλεται ελάχιστα. Έτσι είναι απαραίτητη η εισαγωγή ενός "ανταγωνιστικού" μηχανισμού που δεν είναι άλλος από τον αυτόν της παρεμπόδισης-εκτροπής της διάχυσης εξαιτίας της ύπαρξης των κόκκων στο σύνθετο υλικό. Τέλος ο μηχανισμός αυτός φαίνεται να είναι πιο ισχυρός από αυτόν της μεσοφάσης.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 111 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Ο μηχανισμός της μεσοφάσης φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο για ποσοστό κόκκων 20% και 30% μιας και ο ρυθμός διάχυσης για το υλικό είναι μεγαλύτερος ή τουλάχιστον ίσος σε σχέση με αυτόν για το υλικό με 10% ποσοστό κόκκων. Ενώ θα περίμενε κανείς μια μονότονη αύξηση του ρυθμού αυτό όμως δεν παρατηρείται διότι για ποσοστό κόκκων 20% ο ρυθμός διάχυσης ίδιος ή ελάχιστα μεγαλύτερος από αυτόν για ποσοστό κόκκων 30%. Αυτό οφείλετε στο γεγονός ότι ο μηχανισμός "παρεμπόδισης" γίνετε ισχυρότερος από αυτόν της μεσοφάσης για την περιεκτικότητα του 30% κόκκων.

Στα διαγράμματα Σχ.(5.7), Σχ.(5.7α), Σχ.(5.8) και Σχ.(5.8α) δίνεται μια συνολική εικόνα του παραπάνω σχολιασμού που δώσαμε για την επίδραση του ποσοστού σε πλαστικοποιητή και σε κόκκους στο ρυθμό διάχυσης των υλικών που χρησιμοποιήσαμε.

Τέλος αξίζει να σημειώσουμε ότι η μορφή των καμπύλων στα προηγούμενα διαγράμματα μπορεί να μεταβάλλεται σε σχέση με τη τιμή του ποσοστού κορεσμού που χρησιμοποιούμε. Ο λόγος αυτής της μεταβολής έγκειται στο γεγονός ότι στα περισσότερα πειράματα συνεχίζεται η διαδικασία της υγροαπορρόφησης με αποτέλεσμα να υπάρχουν κάποιες αλλαγές στις καμπύλες αυτές, που δεν αλλάζουν όμως τη γενική εικόνα και εκτίμηση που δώσαμε στο παραπάνω σχολιασμό.

<u>5.3 Επίδραση της υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες:</u> <u>5.3.1 Διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης</u>

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.10) παρουσιάζονται οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε δοκίμια χωρίς κόκκους και χωρίς υγρασία, ενώ στο Σχήμα (5.10α) εξετάζεται η περίπτωση δοκιμίων με υγρασία. Αντίστοιχα στα διαγράμματα Σχήμα (5.11) και Σχήμα (5.11α) παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για δοκίμια με κόκκους για τις περιπτώσεις χωρίς και με υγρασία.

Αξίζει να τονισθεί ότι τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης προκύπτουν από τη μετατροπή των διαγραμμάτων φορτίου-βράχυνσης που μας δίνουν οι εκάστοτε μηχανές.

5.3.2 Μέτρο ελαστικότητας E

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας Ε προκύπτουν από τις εφαπτόμενες των καμπύλων που διακρίνονται στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα διαγράμματα Σχήμα (5.12), Σχήμα (5.12α), Σχήμα (5.13), και Σχήμα (5.13α). Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα (5.12) έχουμε τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της περιεκτικότητας σε πλαστικοποιητή για τις περιπτώσεις με και χωρίς υγρασία. Παρατηρούμε πως στα δοκίμια με υγρασία το μέτρο ελαστικότητας Ε μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ποσοστού πλαστικοποιητή. Αυτό οφείλετε στο ότι η παρουσία πλαστικοποιητή "μαλακώνει" το σύνθετο και του προσδίδει ένα πιο όλκιμο χαρακτήρα.

Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε πως κάτι ανάλογο συμβαίνει και για τη περίπτωση των δοκιμίων χωρίς υγρασία. Από το διάγραμμα παρατηρούμε μια αυξομείωση για τη περιοχή γύρω από το 20% περιεκτικότητα. Πιο συγκεκριμένα το σημείο του 20% κόκκων μπορούμε να το

θεωρήσουμε ως ανώμαλο σημείο και να το πάρουμε ως σημείο αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνουμε ότι με την υγρασία έχουμε μια σχετική «εξομάλυνση», δηλαδή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας Ε. Αυτό το γεγονός μπορεί να αιτιολογηθεί από τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων λόγω διόγκωσης της μήτρας από εμποτισμό, με αποτέλεσμα τη συμπίεση της μεσοφάσης μεταξύ μήτρας και κόκκων. Έτσι το πάχος της μεσοφάσης μειώνεται δημιουργώντας καλύτερη συνοχή μεταξύ μήτρας και κόκκων γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα της αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Τέλος από το διάγραμμα αυτό φαίνεται πως η υγρασία γενικώς έχει τη τάση να υποβιβάζει το μέτρο ελαστικότητας όπως άλλωστε γίνεται αντιληπτό και από το διάγραμμα Σχήμα (5.12α) μιας και οι γραμμές τάσης που φέραμε για τις δύο περιπτώσεις έχουν μια φθίνουσα συμπεριφορά. Αυτό οφείλετε στο γεγονός ότι ο εμποτισμός του υλικού με υγρασία οδηγεί στη χαλάρωση των δεσμών του πλέγματος.

Στο διάγραμμα Σχήμα13α) έχουμε κάνει την αναγωγή των απολύτων τιμών στην αρχική τιμή της καθαρής μήτρας (0% κόκκους) από τις τιμές του διαγράμματος Σχήμα (5.13). Τώρα φαίνεται καλύτερα ο αυξημένος βαθμός της σχετικής βελτίωσης του υλικού ως προς τη στιβαρότητα (δυσκαμψία) του λόγω της υγρασίας. Αυτό γίνετε πιο εύκολα αντιληπτό από τις γραμμικές γραμμές τάσης που φέραμε για τα δοκίμια με υγρασία και χωρίς, μιας και ο ρυθμός αύξησης του μέτρου ελαστικότητας E_{rel} για τα δοκίμια με υγρασία είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν για τα δοκίμια σε ξηρό περιβάλλον. Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά στηρίζεται στο ίδιο φαινόμενο-μηχανισμό που δώσαμε πριν, δηλαδή δημιουργία εσωτερικών τάσεων λόγω διόγκωσης της μήτρας με αποτέλεσμα την αύξηση της συνοχής μεταξύ μήτρας και κόκκων κατόπιν «συρρίκνωσης» της μεσοφάσης.

5.3.3 Λόγος Poisson

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.14) παρουσιάζουμε τη μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει του ποσοστού πλαστικοποιητή για τις περιπτώσεις με και χωρίς υγρασία. Για τα δοκίμια με υγρασία παρατηρούμε ότι αυξανομένου του ποσοστού πλαστικοποιητή έχουμε μια ελαφρά μείωση του λόγου Poisson.

Στη περίπτωση όμως των δοκιμίων χωρίς υγρασία παρατηρούμε μια τάση για αύξηση του λόγου Poisson αυξανομένου του ποσοστού πλαστικοποιητή. Από τις δύο καμπύλες γίνετε αντιληπτό ο λόγος του Poisson αυξάνεται με την ύπαρξη υγρασίας.

Για το διάγραμμα Σχήμα (5.14α) που παρουσιάζει τις σχετικές τιμές ύστερα από την αναγωγή στην αρχική μήτρα με 0% πλαστικοποιητή, φαίνετε ότι η υγρασία δεν έχει ιδιαίτερα αυξανόμενο βαθμό επίδρασης στο μέτρο Poisson και μάλιστα παρουσιάζει μια μικρή αύξηση το μέτρο του Poisson για τα δοκίμια σε περιβάλλον υγρασίας σε σχέση με αυτά που βρίσκονται σε ξηρό περιβάλλον που παρουσιάζει μια μικρή μείωση. Αυτή η συμπεριφορά χρήζει περεταίρω μελέτης.

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.15) παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου Poisson συναρτήσει του ποσοστού κόκκων για τις περιπτώσεις με και χωρίς υγρασία. Για τα δοκίμια με υγρασία ο λόγος του Poisson μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού κόκκων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 113 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

ότι έχουμε πτώση της ικανότητας για εγκάρσια συστολή του υλικού με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι ισχύει για την διαμήκη, με την αύξηση της περιεκτικότητας των κόκκων που είναι απαραμόρφωτοι. Επιπλέον με την αύξηση του ποσοστού κόκκων, το σύνθετο υλικό γίνεται πιο ψαθυρό-δύσκαμπτο με αποτέλεσμα να έχουμε πτώση της τιμής του λόγου Poisson.

Τα ίδια με τα προηγούμενα ισχύουν και για την περίπτωση χωρίς υγρασία. Εδώ όμως ο ρυθμός μείωσης είναι πιο μικρός από τη περίπτωση με υγρασία. Στο διάγραμμα Σχήμα (5.15α) των σχετικών τιμών από αναγωγή στην μήτρα (0% κόκκοι), φαίνεται πιο καθαρά ο αυξημένος βαθμός επίδρασης της υγρασίας μέχρι περίπου το 20% της περιεκτικότητας σε κόκκους. Πάλι παρατηρούμε ότι τα δοκίμια σε περιβάλλον υγρασίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβολή του λόγου Poisson σε σχέση με τα δοκίμια σε ξηρό περιβάλλον όπως έγινε και για το μέτρο ελαστικότητας Ε που περιγράψαμε προηγουμένως. Για αυτό υπάρχει μια σχετική όμοια συμπεριφορά αυτών των καμπύλων με τις καμπύλες των διαγραμμάτων Σχ.(5.13α), με αποτέλεσμα η εξήγηση να βασίζεται στο ίδιο φαινόμενο-μηχανισμό που δώσαμε στο σχολιασμό αυτού του διαγράμματος.

Τέλος σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να εξάγουμε το γεγονός ότι η ύπαρξη υγρασίας μειώνει το λόγο Poisson κάτι φυσιολογικό μιας και αυτή κάνει το υλικό πιο όλκιμο (μαλακό).

<u>5.3.4 Τάση θραύσης</u>

Το διάγραμμα Σχήμα (5.16) παρουσιάζει τις τιμές της τάσης θραύσης συναρτήσει του πλαστικοποιητή. Παρατηρούμε ότι για τα δοκίμια χωρίς υγρασία και αυξανόμενου του ποσοστού πλαστικοποιητή η τάση θραύσης μειώνεται. Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλετε στο γεγονός ότι η παρουσία πλαστικοποιητή κάνει το σύνθετο πιο μαλακό και λιγότερο ανθεκτικό. Από το διάγραμμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η επίδραση της υγρασίας επιφέρει μια «ανωμαλία» πολύ κοντά της περιεκτικότητας 20% σε πλαστικοποιητή. Ύστερα από αυτό το σημείο η τάση θραύσης του υλικού αυξάνεται συνεχώς μέχρι και τη περιεκτικότητα του 40% πλαστικοποιητή. Φαίνεται ότι για ένα ορισμένο ποσοστό πλαστικοποιητή (>20%) τα μόρια του νερού μαζί με αυτά του πλαστικοποιητή σχηματίζουν κατ' αρχήν «ανεξήγητα» πεδία μοριακών δυνάμενων που οδηγούν σε σχετική αλλά και απόλυτη βελτίωση της αντοχής του υλικού.

Είναι γνωστό από τη θραύση των υλικών ότι όλα τα υλικά θραύονται πολύ πιο χαμηλά από τη θεωρητική τιμή της τάσης θραύσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα της 'ύπαρξης ενδογενών ατελειών (μικροκενά, τοπικές διακυμάνσεις στη συγκέντρωση του υλικο, ανομοιογένεια του υλικού κ.α). Ως αποτέλεσμα αυτών των ατελειών είναι ότι αυτά τα σημεία γίνονται σημεία συγκέντρωσης των τάσεων απ' όπου μπορεί να ξεκινήσει η θραύση. Ο πλαστικοποιητής εξαιτίας του ότι θεωρείται ως μεγαλομόριο (μακρομόριο) έχει πολύ πιο λίγες πιθανότητες εισχώρησης μέσα σε αυτά τα μικροκενά απ 'ότι τα πολύ μικρότερα μόρια του νερού. Έτσι το νερό μέχρι μια ορισμένη ποσότητα μπορεί να «πληρώνει» τα μικροκενά έτσι ώστε αυτά να μην δημιουργούν (ή να δημιουργούν λιγότερα) πεδία συγκέντρωσης τάσεων. Τα όρια του νερού αρχίζουν να υπερπληρούν τα μικροκενά πάνω από ένα όριο με τάση για υπερδιόγκωση αυτών έτσι ώστε τώρα οι ελκτικές ενδομοριακές δυνάμεις αλληλεπίδρασης, δυνάμεις συνοχής του πλέγματος της ρητίνης, να μειώνονται δραστικά με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της αντοχής του υλικού (ρητίνης). Σημειώνουμε ότι τα μεγαλομόρια του πλαστικοποιητή εισχωρώντας στα μεγαλύτερα μικροκενά έχουν τη τάση για την

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών 114 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

εξ' αρχής υπερπλήρωση αυτών, έτσι ώστε να έχουμε περαιτέρω συνεχή μείωση της αντοχής. Με άλλα λόγια το στάδιο της «εξομαλυντικής πλήρωσης» δεν το έχουμε ή το έχουμε πολύ λιγότερο για τον πλαστικοποιητή. Ο παραπάνω μηχανισμός ενισχύεται και από τις καμπύλες υγροαπορρόφησης όπου παρατηρούμε ότι με την αύξηση του ποσοστού σε πλαστικοποιητή μειώνεται και το ποσοστό της υγροαπορρόφησης για τον ίδιο χρόνο. Έτσι μετά το 20% του πλαστικοποιητή το μειωμένο ποσοστό νερού «λειτουργεί» ως «εξομαλυντής πλήρωσης», έχοντας το «πάνω χέρι» από το μηχανισμό «υπερπλήρωσης» του πλαστικοποιητή.

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.16α) παρουσιάζονται οι σχετικές τιμές και ο αυξημένος βαθμός επίδρασης της υγρασίας πάνω στη τάση θραύσης του υλικού. Ως εκ τούτου φαίνεται ξεκάθαρα το ΄΄ ανώμαλο ΄΄ σημείο αύξησης της σχετικής και της απόλυτης αντοχής του υλικού πέρα από το σημείο που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα 20% σε πλαστικοποιητή. Από τις γραμμικές γραμμές τάσης που φέραμε για τις πειραματικές τιμές σε περιβάλλον υγρασίας και μη, παρατηρούμε ότι υπάρχει μια σχετική μείωση της τάσης θραύσης για τις πειραματικές τιμές σε ξηρό περιβάλλον υπάρχει μια σχετική μη όμοια συμπεριφορά με μεγάλη διακύμανση για το σημείο με ποσοστό πλαστικοποιητή 20%. Αυτό πρέπει να μελετηθεί περεταίρω.

Αντίστοιχα στο διάγραμμα Σχήμα (5.17) παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης θραύσης συναρτήσει του ποσοστού των κόκκων. Για την περίπτωση συναρτήσει των κόκκων παρατηρούμε μείωση της τάσης αυξανομένου του ποσοστού των κόκκων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του ποσοστού των κόκκων (κόκκοι με ακανόνηστο σχήμα έχοντας ανάλογες ακμές και αιχμηρές κορυφές) αυξάνονται και τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων από τα οποία ξεκινά η θραύση. Από το γράφημα διαπιστώνουμε ότι για περιεκτικότητες μεγαλύτερες από 20% έχουμε αύξηση της τάσης θραύσης. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της συμπεριφοράς οφείλετε στο μηχανισμό που βασίζεται στο γεγονός ότι το ΄΄ ελεύθερο μήκος ΄΄ της κρίσιμης υπολανθάνουσας ρωγμής (subcritical crack length) γίνεται περίπου ίσο με την μέση απόσταση των κόκκων. Έτσι η διαδιδόμενη ρωγμή εγκλωβίζεται και ακινητοποιείται μεταξύ των κόκκων (ανάσχεση διάδοσης= subcritical crack arrest), με ταυτόχρονη εκτόνωση της αντίστοιχης υποκρίσιμης ενέργειας διάδοσης.

Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπό την επίδραση της υγρασίας δημιουργείται ένα μέγιστο αντοχής εκατέρωθεν της περιεκτικότητας 10% σε κόκκους. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο μηχανισμό που βασίζεται στο γεγονός ότι η δημιουργία των εσωτερικών θλιπτικών τάσεων μεταξύ της μήτρας και κόκκων λόγω διόγκωσης με νερό, μειώνει τη πιθανότητα δημιουργίας νέων μικρορωγμών ή και την επέκταση των ήδη υπαρχόντων γύρω από τους κόκκους και εντός της περιοχής της μεσοφάσης. Ταυτόχρονα από το διάγραμμα υγροαπορρόφησης Σχήμα (5.6) υπολογίζουμε ότι για τον ίδιο χρόνο, με αναφορά το τέλος της κόκκινης καμπύλης, έχουμε ποσοστά από 1,5% έως και πάνω από 2% υγρασία. Από τη σχέση 4.3 υπολογίζουμε στη συνέχεια μια διόγκωση (παραμόρφωση) από 0,7% έως και 1,5%. Έτσι τώρα από τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων προκύπτουν υπολογίσιμες τάσεις. Για τη μείωση της τάσης θραύσης πέρα του 10% σε κόκκους οφείλετε στην «επικράτηση» του μηχανισμού συγκέντρωσης των τάσεων γύρω από τους κόκκους που υποβιβάζει την τάση θραύσης.

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.17α) γίνετε πιο εύκολα αντιληπτό ο αυξημένος βαθμός επίδρασης της υγρασίας στη τάση θραύσης, με αποτέλεσμα να φαίνεται πιο καθαρά το σημείο μεγιστοποιήσεως της σχετικής αντοχής του σύνθετου υλικού. Τέλος από τις γραμμικές καμπύλες

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 115 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

διαπιστώνουμε μια πτώση της τάσης της μήτρας συναρτήσει της αυξήσεως του ποσοστού εγκλείσματος.

5.3.5 Παραμόρφωση θραύσης:

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.18) απεικονίζεται η μεταβολή της παραμόρφωσης θραύσης συναρτήσει του ποσοστού πλαστικοποιητή. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με και χωρίς υγρασία έχουν την ίδια συμπεριφορά συναρτήσει της αύξησης του ποσοστού πλαστικοποιητή, μάλιστα για τα δοκίμια χωρίς υγρασία διαπιστώνουμε ότι για 0% και 40% έχουμε παραπλήσιες παραμορφώσεις θραύσης ενώ για τα ενδιάμεσα ποσοστά πλαστικοποιητή έχουμε μικρότερες τιμές παραμόρφωσης θραύσης. Για τα δοκίμια με υγρασία παρατηρούμε ότι για 0% και για 10% έχουμε παραπλήσιες παραμορφώσεις ενώ μετά για 20% παρατηρούμε μια σημαντική μείωση και τέλος για 40% πλαστικοποιητή παρουσιάζει μια αύξηση έως σχεδόν την αρχική τιμή παραμόρφωσης θραύσης που υπολογίσαμε για 0% πλαστικοποιητή.

Πιο αναλυτικά για το «ανώμαλο» σημείο ελαχιστοποιήσεως της ολκιμότητας του υλικού που παρατηρείται στο 20% της περιεκτικότητας του πλαστικοποιητή που αναφέραμε και προηγουμένως, διαπιστώνουμε ότι για περιεκτικότητες πλαστικοποιητή κάτω του 20% η υγρασία έχει τάση για αύξηση της απόλυτης ολκιμότητας. Αυτή η «παράξενη» συμπεριφορά ελαχιστοποιήσεως θα πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω προκειμένου να αποκλεισθούν τυχαία πειραματικά σφάλματα. Παρ' όλα αυτά μια εξήγηση θα μπορούσε να είναι αυτή που δώσαμε για τη τάση θραύσης.

Από το διάγραμμα Σχήμα (5.18α) που παρουσιάζει τις σχετικές τιμές της τάσης θραύσης έχοντας κάνει αναγωγή στη μήτρα για 0% πλαστικοποιητή συναρτήσει του ποσοστού πλαστικοποιητή διαπιστώνουμε τον αυξημένο βαθμό επίδρασης της υγρασίας στη παραμόρφωση θραύσης, ιδιαίτερα για τη περιοχή κάτω του 20% της περιεκτικότητας σε πλαστικοποιητή.

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.19) απεικονίζεται η μεταβολή της παραμόρφωσης θραύσης συναρτήσει του ποσοστού των κόκκων. Από το διάγραμμα είναι εύκολο να παρατηρήσουμε την όμοια συμπεριφορά των δύο καμπυλών για δοκίμια με και χωρίς υγρασία αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα για τα δοκίμια χωρίς υγρασία παρατηρούμε μια μείωση της παραμόρφωσης θραύσης, συμπεριφορά όμως που είναι απόλυτα λογική μιας και γνωρίζουμε ότι η προσθήκη κόκκων σε ένα σύνθετο υλικό το κάνει πιο ψαθυρό. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο φαινόμενο της αύξησης της πιθανότητας θραύσης λόγω του μηχανισμού της συγκέντρωσης τάσεων γύρω από τις «αιχμηρές κορυφές» των κόκκων (πολυεδρικό σχήμα κόκκων). Η υγρασία όμως έχει μια τάση αποδυνάμωσης αυτού του φαινομένου. Όπως ήδη ειπώθηκε αυτή η αποδυνάμωση οφείλετε κυρίως στη δημιουργία εσωτερικών τάσεων από διόγκωση λόγω εμποτισμού της μήτρας. Τέλος οι τάσεις αυτές εξαιτίας του ότι είναι από τη φύση τους θλιπτικές μειώνουν την πιθανότητα δημιουργίας νέων μικρορωγμών

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.19α) των ανηγμένων τιμών της παραμόρφωσης θραύσης παρατηρούμε ότι υπάρχει μια πτωτική συμπεριφορά της παραμόρφωσης θραύσης με την αύξηση της συγκέντρωσης των κόκκων. Μια μικρή αύξησης της παραμόρφωσης θραύσης παρατηρείται για τα δοκίμια με υγρασία για συγκέντρωση κόκκων 10%. Ακόμη διαπιστώνεται καλύτερα ο αυξημένος βαθμός επίδρασης της υγρασίας στο παραπάνω φαινόμενο με απώτερο σκοπό την αποδυνάμωση του τελευταίου.

5.3.6 Ειδική ενέργεια θραύσης

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.20) παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής ενέργειας θραύσης συναρτήσει του ποσοστού πλαστικοποιητή. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι για τα δοκίμια χωρίς υγρασία πως με την αύξηση του ποσοστού πλαστικοποιητή η ειδική ενέργεια θραύσης μειώνεται. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι η παρουσία πλαστικοποιητή προσδίδει στο σύνθετο υλικό ένα πιο «χαλαρό» χαρακτήρα με αποτέλεσμα να απαιτείται πιο μικρή ενέργεια θραύσης. Αντιθέτως για τα δοκίμια με υγρασία παρατηρούμε την «ανώμαλη» συμπεριφορά αυξομείωσης που λογικά πηγάζει από τα διαγράμματα Σχήμα (5.16) και Σχήμα (5.18).

Επιπλέον από το διάγραμμα Σχήμα (5.20α) προκύπτει και πάλι το ίδιο συμπέρασμα μιας και η «ανώμαλη» επίδραση της υγρασίας φαίνεται ακόμα πιο καθαρά. Επιπλέον από τις γραμμές τάσης που έχουμε για τα δύο είδη δοκιμίων για με και χωρίς υγρασία διαπιστώνουμε ότι έχουμε μια πτώση της ειδικής ενέργειας με την αύξηση του ποσοστού πλαστικοποιητή. Η εξήγηση-ερμηνεία για αυτή τη συμπεριφορά είναι ίδια με αυτή που δώσαμε για τη τάση θραύσης και τη παραμόρφωση θραύσης.

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.21) παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής ενέργειας θραύσης συναρτήσει του ποσοστού κόκκων για συνθήκες με και χωρίς υγρασία. Για τα δοκίμια χωρίς υγρασία παρατηρούμε ότι η ειδική ενέργεια θραύσης μειώνεται, το οποίο όμως είναι αναμενόμενο μιας και η ύπαρξη των κόκκων αυξάνει τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για τη θραύση. Αντίθετα για τη περίπτωση των δοκιμίων με υγρασία όπως φαίνεται και από το διάγραμμα υπάρχει μια αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη θραύση. Αντίθετα για τη περίπτωση των δοκιμίων με υγρασία όπως φαίνεται και από το διάγραμμα υπάρχει μια αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για περιεκτικότητες μέχρι και 10% κόκκων. Μείωση της ειδικής ενέργειας θραύσης παρατηρείται για περιεκτικότητες μεγαλύτερες του 10%. Πιο συγκεκριμένα για 10% περιεκτικότητα κόκκων για τα δοκίμια με υγρασία μεγιστοποιείτε η ειδική ενέργεια η οποία οφείλεται εξαιτίας του φαινομένου της δημιουργίας εσωτερικών θλιπτικών τάσεων (λόγω εμποτισμού και ορισμένο ποσοστό υγρασίας) που έχει σαν αποτέλεσμα την «εξομάλυνση» των πεδίων συγκέντρωσης των τάσεων γύρω από τους κόκκους και εντός της μεσοφάσης.

Τώρα από το διάγραμμα Σχήμα (5.21α) παρατηρούμε ότι και για τα δοκίμια με υγρασία και για τα δοκίμια χωρίς υγρασία οι γραμμικές τους σχέσεις έχουν μια φθίνουσα συμπεριφορά, δηλαδή μια μείωση της ειδικής ενέργειας της μήτρας που έχουμε κάνει αναγωγή για 0% κόκκους. Επιπλέον φαίνεται για ακόμη μια φορά καλύτερα ο αυξανόμενος βαθμός επίδρασης της υγρασίας στη συμπεριφορά της ειδικής ενέργειας θραύσης με αύξηση του ποσοστού κόκκων.

5.3.7 Σύγκριση με θεωρητικά μοντέλα

Στη παρούσα φάση της εργασίας θα κάνουμε σύγκριση των πειραματικών τιμών για τα μεγέθη Ε, σ_θ,ε και για την ειδική ενέργεια θραύσης με τις τιμές που προκύπτουν από τα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο 2° κεφάλαιο.

5.3.7α Μέτρο ελαστικότητας E

Από τα διαγράμματα Σχήμα (5.22) και Σχήμα (5.22α) που παρουσιάζουν τις τιμές των θεωρητικών μοντέλων που προκύπτουν για το μέτρο ελαστικότητας όταν τα δοκίμια δεν έχουν την επίδραση της υγρασίας (κανονικές συνθήκες). Παρατηρούμε όμως να διαφέρουν οι πειραματικές τιμές αρκετά με ορισμένα μοντέλα, ενώ με άλλα διακρίνουμε μια ικανοποιητική προσέγγιση. Από τα μοντέλα που μελετήσαμε διαπιστώσαμε ότι αυτό που έχει τη καλύτερη προσέγγιση στις πειραματικές τιμές είναι αυτό του Einstein. Αντίστοιχα το μοντέλο του Guth φαίνεται να δίνει καλή προσέγγιση μόνο για περιεκτικότητες μέχρι 10% σε κόκκους, ενώ το μοντέλο του Eilers προσεγγίζει ικανοποιητικά μόνο την περιεκτικότητα του 20%.

Για τα διαγράμματα τώρα Σχήμα (5.23) και Σχήμα (5.23α) παρουσιάζονται οι τιμές των θεωρητικών μοντέλων που προκύπτουν για τα δοκίμια τα οποία βρίσκονται υπό την επίδραση υγρασίας. Πιο αναλυτικά πρόκειται για δοκίμια που έχουν παραμείνει εντός απεσταγμένου ύδατος και σε θερμοκρασία 50°C για 35 ημέρες. Για τη περίπτωση αυτή το μοντέλο που μας δίνει μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτό του Paul.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονται στο γεγονός ότι οι παραδοχές που ακολούθησαν οι διάφοροι ερευνητές κατά τη κατασκευή των θεωρητικών μοντέλων διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές καταστάσεις των δοκιμίων και των πειραμάτων. Η απόκλιση των θεωρητικών και των πραγματικών τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι τα μοντέλα αναφέρονται σε πειράματα εφελκυσμού ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα προήλθαν από πειράματα θλίψης. Επίσης κατά την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν εγκλείσματα με ακανόνιστο σχήμα και όχι σφαιρικά όπως στα περισσότερα των θεωρητικών μοντέλων. Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ότι στη πραγματικότητα υπάρχουν και συσσωματώματα κόκκων και όχι μόνο μεμονωμένοι κόκκοι όπως απαιτούν τα περισσότερα θεωρητικά μοντέλα. Μάλιστα πολύ σημαντικό είναι και το γεγονός ότι τα συσσωματώματα των κόκκων μπορούν να εγκλωβίσουν ανάμεσά τους αέρα με αποτέλεσμα τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας.

<u>5.3.7β Τάση θραύσης σ_{θ} </u>

Στο διάγραμμα Σχήμα (5.24) παρουσιάζονται οι τιμές των θεωρητικών μοντέλων συγκριτικά με τις πειραματικές τιμές που προέκυψαν για τις τάσεις θραύσης υπό κανονικές συνθήκες (0% υγρασία).

Αντίστοιχα _{στο} διάγραμμα Σχήμα (5.24α) έχουμε τη σύγκριση των θεωρητικών τιμών που προκύπτουν από τα μοντέλα με τις πειραματικές τιμές για δοκίμια που παρέμειναν εντός της θερμομπανιέρας για 35 ημέρες.

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε ότι οι θεωρητικές τιμές της τάσης θραύσης είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες πειραματικές. Οι μικρότερες τιμές της τάσης θραύσης που παρατηρούνται στα θεωρητικά μοντέλα εξηγούνται κυρίως από το γεγονός ότι σε κάθε ψαθυρό υλικό σε θλίψη είναι πιο μεγάλη από την αντίστοιχη του εφελκυσμού.

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 118 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

5.3.7γ Παραμόρφωση θραύσης ε

Τα διαγράμματα Σχήμα (5.25) και Σχήμα (5.25α) παρουσιάζουν τη σύγκριση των θεωρητικών μοντέλων για τη παραμόρφωση θραύσης με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές για τις περιπτώσεις χωρίς και με υγρασία αντίστοιχα.

Και στα δύο αυτά διαγράμματα παρατηρούμε απόκλιση των πειραματικών τιμών από τις τιμές που δίνουν τα μοντέλα. Αυτό είναι λογικό αφού στην θλίψη έχουμε την δυνατότητα για μεγαλύτερες παραμορφώσεις από αυτές στον εφελκυσμό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 120 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



 Σελίδα
 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών

 121
 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.2)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 122 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 123 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.3)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 124 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.4)



Σχ.(5.5)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 126 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.6)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 127 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.7)



 Σελίδα
 Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών

 128
 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.7α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
 129 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.8)


Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
130 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.8α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
131 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.9b)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
132 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.9α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
133 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.9β)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
134 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.10)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
135 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.10α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
136 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.11)

Σχ.(5.11α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
137 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
138 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.12)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
139 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.12α)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
140 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.13)



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
141 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Σχ.(5.13α)





Σχ.(5.14α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
142 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.15)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
143 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.15α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
144 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.16)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
145 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.16α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
146 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.17)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
147 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.17α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
148 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.18)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
149 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.18α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
150 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.19)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
151 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
152 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.20)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
153 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.20α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
154 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.21)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
155 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.21α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
156 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
157 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.22α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
158 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.23)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
159 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.23α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
160 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.24)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
161 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.24α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
162 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.25)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
163 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης



Σχ.(5.25α)

Σελίδα Θεωρητική και πειραματική μελέτη της αντοχής και δυσκαμψίας κοκκωδών συνθέτων υλικών
164 υπό κανονικές και συνθήκες υδροαπορρόφησης

Βιβλιογραφία

- 1. Lee and Neville, "Epoxy Resin, Their applications and technology", Mc Graw Hill, New York.
- 2. H. Lee, K Neville, "Handbook of Epoxy Resins", Mc Graw Hill, New York (1967).
- Κοντού, "Σχέση Δομής και Θερμομηχανικής Συμπεριφοράς Εποξειδικής Ρητίνης Τροποποιημένης με Μηχανικά και Χημικά Πρόσθετα", Διδακτορική Διατριβή, ΑΘήνα (1985).
- 4. A. Manson and L.H. Sperling, "Polymer Blends and Composites" (Plenum Press, New York, 1976) Cb. 12.
- 5. E. Ashton, J.C. Halpin and P.H. Petit, "Primer fon Composite Materials Analysis" (Technomic, Stafmford, Conn., 1969) Ch. 5.
- 6. J. Broutman and R.H. Krock, "Modern Composite Materials" (Addison Weskey, Reading. Mass, (1967).
- Takayanagi, H. Harima anf Y. Iwata, Rep. Prog. Polymer. Phys. (Japan) 6 (1963) 121.
- 8. Sato, Prog. Organic Coatings 4 (1976) 271.
- 9. Guth, J. Appl. Phys 15 (1945) 20.
- 10. L. Frisch and R. Simha, in "Rheology. Vol. 1, edited by F.R. Eirich (1956) Ch. 14.
- 11. Kuhn and H. Kuhn, Helv. Chim. Acta 28 (1945) 97.
- 12. E. Nielsen, J. Comp. Mater. 2 (1968) 120.
- 13. S. Chow, Appl. Phys. 48 (1977) 472.
- 14. Idem, J. Polymer Sci. Polymer Phys. ed. 16 (1978) 959.
- 15. Idem, ibid. 16 (1978) 967.
- 16. Counto, Mag. Concr. Res 16 (1964) 129.
- 17. Paul, Trans Amer. Inst. Mech. Eng. 36 (1960) 218.
- 18. Ferry, "Viscoelastic Properties of polymers" John Wiley and Sons Inc.

και συνθήκες υδροαπορρόφησης

165
- A. Einstein, "Uber die von Molekularkinetischen theorie der. Warme Gefoderto Bewegung von in Ruhenden Flussigkeiten suspendionten Teilchen", Ann Physic, Vol. 17, p 549, (1905), "Eine Neue Bestimmung der Molekuldimensionen" Ann Physic, Vol 19, p 289, (1906), "Berichtigung zu meiner Arbeit Eine neue Bestimmung der Molekuldimensionen", Vol 34, p 591, (1911).
- 20. E. Cuth, "Theory of Filler Reinforcement", Jnl Appl. Phys. Vol. 16, pp 20 26 (1945).
- 21. H. M. Smallwood, "Limiting Law of the Reinforcement of Rubber" Jnl. Appl. Phys, Vol. 15, pp 785 - 762, (1944).
- 22. E.H. Kerner, The Elastic and Thermoelastic Propeties of Composite Media, Proc. Phys. Soc. 698, pp. 808 813, (1956).
- Y. Sato and Furukawa, "A Molecular Theory of Filler Reinforcement based upon the conception of the internal Deformation" Rubber Chem. Technol., Vol 35, pp 857 - 862, (1962).
- 24. Y. Sato and Furukawa, "A Molecular Theory of Filler Reinforcement based upon the conception of the internal Deformation" ("a Rough Approximation of the Internal Deformation") J. Faculty Textile Sci. and Tech of Shinshu University (Japan), Vol 35f pp. 1-7, (1962), Rubber Chem. Tech. Vol. 36, pp 1081 - 1087, (1936).
- 25. M Mooney, "The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles", Inl. Colloid Sci. Vol. 6, pp, 162 169, (1951).
- 26. H. Eilers and Van Dyck, kolloid Z, Vol. 97, pp 313 318, (1941).
- K. Bills, K Sweeny and F. Salcedo, "The Tensile Properties of Highly Filled Polymers. Effect of Filler Concentration", Jnl. Appl. Pol Sci. Vol. 12, pp. 259 - 262, (1960).
- 28. **M.Narkis, "Crazing in Glassy Polymers Studies on Polymer Glass bead** Composites" ,Polym. Eng. - Sci., Vol. 15, pp 316 - 320, (1975).
- 29. K. Takahashi, M. Ikeda, K. Harakawa and K. Tanaka, "Analysis of the Effect of Intefacial Slippage on the Elastic Moduli of a Particle Filled Polymer", Jnl. Pol. Phys. Ed., Vol. 16, pp 415 421, (1978).
- 30. J.C. Halpin and S.W. Tsai, "Effects of Environmental Factors on Composite Materials, AFML - TR67 - 423, (1969).

και συνθήκες υδροαπορρόφησης

- G.D. Spathis, E.P. Sideris and P.S. Theocharis. "Adhesion efficiency and Volume Fraction of the Boundary Interphase in Metal Filled epoxies", Intl. Jnl. Adhesion and adhesives, Vol. 1, No 1, pp 195 201, (1981).
- P.S. Theocharis, "The Mesophase and its influence on the Mechanical Behaviour of Composites", Advances in Polymer Science 66, Springer -Verlag Berlin, pp 149 - 186, (1985).
- P.S. Theocharis, "The Adhesion Quality and the Extent of the Mesophase in Particulates", Jnl. of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 3, pp 204 - 233, (1984).
- P.S. Theocharis and E. Sideridis, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 29, 2997 - 3011 (1984).
- 35. J.J. Hermans, Proc. R. Acad. (Amsterdam) B 70 (1967) 1.
- 36. Z. Hashin and B.W. Rosen, L. Appl. Mech. 31 (1964) 223.
- 37. R. Hill, J. Mech. Phys. Solids 13 (1965) 213.
- 38. B. Budiansky, J. Mech. Phys. Solids 13 (1965) 223.
- 39. E.H. Kerner, Proc. Phys. Soc. (London) B69 (1956) 808.
- 40. G.P. Sendeckyi, "Composite Materials", Vol. 2 (Academic Press, New York, 1974) Chs. 3 to 4.
- 41. J.L. Kardos, Crit. Rev. Solid State Sci. 3 (1973) 419.
- 42. R. Hill, J. Mech. Phys. Solid 11 (1963) 357.
- 43. T.J. Hirsch, J. Amer. Conc. Inst. 59 (1962) 427.
- 44. M. Takayanagi, S. Nemura and S. Minami, J. Polym. Sci. 5C. (1964) 113.
- 45. G. Kraus akd K.W. Rollmann, in "Multi Component System", edited by F. Gould (American Chemical Society, New York, 1971), Chap. 12. p. 189.
- 46. T.T. Wu, J. Appl. Mech. 32E (1964) 211.
- 47. T. Lewis and L. Nielsen, J. Appl. Polym. Sci. 14 (1970) 1449.
- 48. J. Spanoudakis and R.J. Young, J. Mater. Sci. 19 (1984) 487.
- 49. R.J. Young, Proceedings of the International Conference, "Fillers '86" (PRL. London, 1986) Paper 13.
- 50. P.H. Tb. Vollenberg and D. Heikens, ibid. (PRL. London, 1986) Paper 14.

και συνθήκες υδροαπορρόφησης

- 51. A.M. Bueche, J. Polym. Sci. 25 (1957) 139.
- 52. T.T. Wu, Int. J. Solids Struc. 2 (1966) 1.
- 53. T.S. Chow, J. Polym. Phys. 16 (1978) 959.
- 54. S. Ahmed and F.R. Jones, Composites 19 (1988) 277.
- 55. Idem, ibid. 21 (1990) 81.
- 56. R.A. Dickie, J. Appl. Polym. Sci., 17 (1973) 454.
- 57. R.M. Christensen, "Mechanics of Composite Materials", (Wiley New York, 1979).
- 58. S. Mcgee and R.L. Mc Gullough, Polym. Composites 2 (1981) 149.
- 59. F.J. Guild and R.J. Young, J. Mater. Sci. 24 (1989) 298.
- 60. Y. Sato and J. Furukawa, Rubber Chem. Technol. 36 (1963) 1081.
- 61. A.C. Moloney, H.H. Kaush and H.R. Stieger, J. Mater. Sci. 18 (1983) 208.
- 62. Idem, ibi. 19 (1984) 1125.
- 63. G.W. Brassell and K.B. Wischmann, J. Mater. Sci. 9 (1974) 307.
- 64. L.E. Nielsen, J. Compos. Mater. 1 (1967) 100.
- 65. L.E. Nielsen, J. Appl. Polym. Sci. 10 (1966) 97.
- 66. L. Nicolais, E. Drioli and R.E. Landel, Polym. 14 (1973) 21.
- 67. L. Nicolais, Polym Eng. Sci. (1975) 137.
- 68. L. Nicolais and M. Narkis, ibid 11 (1971) 194.
- 69. L. Nicolais and L. Nicodemo, ibid 13 (1973) 469.
- 70. M.R. Piggott and J. Leidner, J. Appl. Polym. Sci. 18 (1974) 1619.
- 71. G. Landon, G. Lewis and G. Boden, J. Mater. Sci. 12 (1977) 1605.
- 72. J. Leidner and R.T. Woodhams, J. Appl. Polym. Sci. 18 (1974) 1639.
- 73. A. Kelly, "Strong Solids" (Clarendon Oxford, 1966), p. 161.
- 74. H. Hojo and W. Toyoshima, 31st ANTEC, SPE Montreal, Canada (1973) (Technomic, 1973), p. 163.
- 75. H. Hojo, W. Tanura and N. Kawanura, Polym. Eng. Sci. 14 (1974) 604.
- T.L. Smith, Rubber Chem. Techn. Vol. 34 pp 123 129, (`1961), Trans.
 Sac. Rheol., Vol. 3 pp 113 119, (1959).

και συνθήκες υδροαπορρόφησης

- F. Bueche, "Molecular Basis for the Mullins Effect" Jnl. Appl. Polym. Sci., Vol. 4 pp 107 - 114, (1960).
- K.D. Ziegel, H. K. Frensdorff and A.W. Fogiel, "Strain Magnification in Polym. Composites", Jnl. Appl. Polym. Sci., Vol. 9, pp 2993 - 3009, (1965).
- P.S. Theocharis and J. Prassianakis, "Interrelation of Mechanical and Optical Properties of plasticized Epoxy Polymers", J. Appl. Polymer Science, Vol. 22, pp 1725 - 1734 (1978).
- 80. Kerner EH (1956), Proc. Phys. Soc. 69B: 808.
- 81. Tummala RR, Friedberg AL (1970), J. Appl. Phys. 11:5104.
- 82. Thomas JP (1960) AD 287 826 General Dynamics, Fort Worth, Tex.
- 83. Turner PS (1946) J. Res. NBS 37:239.
- 84. Gribb L (1986) Nature 220:576.
- 85. Fahmy AA, Ragai AI (1970) J. Appl. Phys, 41:5108.
- 86. Saada SA (1962) Elasticity. Theory and Applications, Pergamon Press, New York.
- 87. Αιμ. Σιδερίδης, "Μελέτη των θερμομηχανικών ιδιοτήτων των κοκκωδών
 και ινωδών συνθέτων υλικών με την έννοια της ενδιαμέσου φάσεως",
 Διδακτορική διατριβή,
- 88. A.J. Kinloch, D. Gillert, S. J. Show, "A Mechanism f or Ductile Crack Growth in Epoxy Polymers", J., Mat Sci. 21 (1986), 1051 - 1056.
- W.J. Cantwell, A.C. Roulin Moloney, T. Kaiser, "Fractography of Unfilled and Particulate - Filled Epoxy Resins", J. Mat. Sci. 23, (1988), 1615 - 1631.
- 90. Salim Yamini, Robert J. Young, "Crack Propagation in and Fractography of Epoxy Resins", J. Mat. Sci. 14, (1979), 1609 1618.
- 91. S. Yamini, R. J. Young, "The Mechanical Properties of Epoxy Resins", J. Mat. Sci. 15, (1980), 1823 1831.
- 92. D.C. Phillips, J.M. Scott, M. Jones, "Crack Propagation in a Amine -Cured Epoxide Resin", J. Mat. Sci. 13, (1978), 311 - 322.
- A.J. Kinloch and R.J. Young, "Toughened Multiphase Plastics in Fracture Behaviour of Polymers" Elsevier Applied Science Publishers, London - New York (1985), pp 421 - 468.

και συνθήκες υδροαπορρόφησης

- 94. F.F. Lange and K.C. Radfort, J. Mat. Sci. 6, (1971), 1197.
- 95. F.F. Lange, Phil. Mag. 22 (1970) 983.
- 96. F.F. Lange, J. Amer. Ceram. Soc., 54, (1971), 614.
- 97. B.N. Kytopoulos, "Συμβολή της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σαρώσεως στη Μελέτη Ελαστοπλαστικών Φαινομένων κατά τη Θραύση του Υλικού", Διδακτορική Διατριβή, Ε.Α.Υ.- Ε.Μ.Π. (1990).
- A.J. Kinloch and R.J. Young, "Classy Polymers II Thermosets in Fracture Behaviour of Polymers", Elsevier Appl. Sci. Publ., (1985), pp 286 - 310.
- 99. A.G. Evans, Phil Mag. 26, (1972), 1327.
- 100. J.W. Smith, T. Kaiser, "Deformation induced Volume Damage in Particulate - Filled Epoxy Resins", J. Mat. Sci. 23, (1988), 3833 - 3843.
- 101. A.C. Moloney, H.H. Kausch, H.R. Steiger, "The Fracture of Particulate -Filled Epoxide Resins (Part 1)", J. Mat. Sci 18, (1983), 208 - 216.
- 102. A.C. Moloney, H.H. Kausch, H. R. Steiger, "The Fracture of Particulate -Filled Epoxide Resins (Part 2)". J. Mat. Sci. 19, 1125 - 1130, (1984).
- 103. Jones D. Miller, H Ishide, F.D. Mauser, "Interfacial Role and Properties in Model Composites: Fracture Surface by Scanning Electron Microscopy", K. Mat. Sci. 24, (1989), 2355 - 2370.
- 104. L.E. Nielsen, "Mechanical Properties of Polymers and Composites", Marcel Dekker, New York, Vol., (1974).
- 105. I. WASWORTH, R. STEVENS, "Strengthening and toughening of cordierite by the addition of silicon carbite whiskers, platelets and and particles". J. Mat. Sci. 28, (1993), 1175 1181.
- 106. KATSUAKI SUGANUMA, GENN SASAKI, TERUAKI FUJITA, MASATOSHI OKUMURA KOUICHI NIIHARA "Mechanical properties and microstructures of machinable silicon carbide" J. Mat. Sci. 28, (1993), 1175 - 1181.
- 107. R.W.K. HONEYCOMBE "The plastic deformation of metals" EDWARD ARNOLD (1971), 178 183.

και συνθήκες υδροαπορρόφησης