



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

---

**ΔΠΜΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Επίδραση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα στις  
μηχανικές ιδιότητες πολυμερικών μητρών»**

**ΣΟΦΡΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2016**



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πέραν της προσωπικής προσπάθειας που καταβλήθηκε, η διαμόρφωση και η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την συμβολή ορισμένων ανθρώπων που συνέβαλλαν κατά την εκπόνησή της.

Αρχικά, οφείλω θερμές ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Διευθυντή του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την τιμή που μου έκανε δίνοντας μου την ευκαιρία να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του.

Ταυτόχρονα, οφείλω βαθύτατες ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη για όλο τον χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η καθημερινή καθοδήγησή του, η υπομονή και το πνεύμα συνεργασίας του από την αρχή μέχρι το τέλος αποτελούν αναμφίβολα στοιχεία έμπνευσης και για την μετέπειτα επαγγελματική σταδιοδρομία μου. Η υποστήριξή του σε θέματα τεχνικά και επιστημονικά ήταν κρίσιμης σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμη οφείλω ευχαριστίες στον Δρ. κ. Γεώργιο Κούζιλο που βοήθησε στην διεξαγωγή των σκληρομετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του Τομέα Κατεργασιών των Υλικών, και συγκεκριμένα τον κ. Νικόλαο Μελισσά και τον κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη, για τη βοήθεια και τεχνική υποστήριξη στο χώρο του εργαστηρίου. Επιπλέον, σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τους συμφοιτητές μου Γεώργιο Τζωρτζόπουλο και Κωνσταντίνο Ζουφιάκο για την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας της παρούσας εργασίας.



## Περίληψη

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια, προσελκύουν ολοένα και περισσότερο το επιστημονικό, αλλά και το βιομηχανικό ενδιαφέρον. Τα σωματίδια που χρησιμοποιούνται ως προσθήκες στα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη επιφάνεια επαφής επηρεάζοντας έτσι τη φυσική και χημική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Τα τελευταία χρόνια, μάλιστα, η εμφάνιση των πολυμερικών συνθέτων υλικών έχει οδηγήσει σε πολλές τεχνολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές στην αντικατάσταση των μετάλλων, γεγονός που οφείλεται, μεταξύ άλλων, στην ευκολία παραγωγής τους και στο συνδυασμό χαμηλού βάρους με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα ( SSF - stainless steel flakes) σε τρία είδη πολυμερικής μήτρας.

Τα απαραίτητα δοκίμια ρητίνης παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της χειροκίνητης έγχυσης, ενώ η ενσωμάτωση των φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα πραγματοποιήθηκε κατά την προετοιμασία του συστήματος με ανάδευση σε θερμοκρασία δωματίου. Για τα δοκίμια πολυαιθυλενίου χρησιμοποιήθηκε ο extruder του εργαστηρίου, ενώ η ενσωμάτωση των φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα πραγματοποιήθηκε με ανάδευση πριν την είσοδο της πρώτης ύλης στον extruder.

Συνολικά παρασκευάστηκαν δοκίμια από τρεις διαφορετικές μήτρες, εποξική θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, μεθακρυλική ελαστομερή ρητίνη και θερμοπλαστικό πολυαιθυλένιο. Πρόκειται για δοκίμια πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων χάλυβα σε περιεκτικότητες κατά βάρος 1,2,3,4,5 και 10%. Για τους τρεις τύπους μήτρας παρασκευάστηκαν δείγματα αναφοράς χωρίς την προσθήκη φολίδων χάλυβα, που αποτέλεσαν το μέτρο σύγκρισης για την επίδραση της προσθήκης σωματιδίων χάλυβα στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Στόχος ήταν η εξαγωγή δοκιμίων κατάλληλων διαστάσεων και ποιότητας για να υποβληθούν σε μετρήσεις εφελκυσμού, κάμψης τριών σημείων και συμπίεσης σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D882-02 , ASTM D790-03 και ASTM D695-02a αντίστοιχα. Στην περίπτωση εποξικής και πολυαιθυλενικής μήτρας η περιεκτικότητα σε χάλυβα έφτασε μέχρι το 10% κατά βάρος της πολυμερικής μήτρας, ενώ στην περίπτωση της μεθακρυλικής μήτρας η περιεκτικότητα έφτασε μέχρι το 5% (w.t.) διότι παρατηρήθηκε



αύξηση της ανομοιογένειας του παραχθέντος υλικού καθώς και υψηλός αριθμός συσσωματωμάτων από φολίδες χάλυβα.

## **Abstract**

Composite materials reinforced with particles or just composites are increasingly attracting interest of the scientific community and the industrial world. Particles used as fillers in composite materials exhibit a large contact surface affecting the physical and chemical properties of the composite. Over the last years, the appearance of polymer composites has led to the replacement of metals in many technological and structural applications, mainly due to ease of production and the combination of low weight with great mechanical properties.

This project is investigating the effect of stainless steel flakes on three different polymer matrices.

The test specimens were produced through Hand molding method. The stainless steel flakes(SSFs) were incorporated during polymer system preparation by stirring in room temperature. For the polyethylene specimens was used the lab's extruder, also the integration of stainless steel flakes was been with stirring before enter the raw material to the extruder.

Overall specimens prepared from three different matrices, thermosetting epoxy resin, methacrylate resin elastomers and thermoplastic polyethylene. These polymeric matrix are with reinforcing steel particles in concentrations by weight of 1,2,3,4,5 and 10%. For the three types of matrix reference specimens were prepared without the addition of steel flakes, which have been the benchmark for the effect of adding steel particles in the behavior of the composite. The aim was to export specimens of suitable dimensions and quality to undergo tensile measurements, three-point bending and compression according to the ASTM D882-02 standards, ASTM D790-03 and ASTM D695-02a respectively. In the case of epoxy and polyethylene matrix in steel content reached to 10% by weight of the polymer matrix, while in the case of the methacrylate matrix content reached up to 5% (wt) because there was an increase of heterogeneity of the produced material and high number of aggregates flakes of steel.



## Περιεχόμενα

1	Σύνθετα υλικά .....	21
1.1	Εισαγωγή.....	21
1.2	Μήτρες σύνθετων υλικών.....	26
1.2.1	Μεταλλικές μήτρες.....	26
1.2.2	Κεραμικές μήτρες.....	27
1.2.3	Πολυμερικές μήτρες.....	28
1.3	Διέλαση πολυαιθυλενίου.....	41
1.3.1	Εξοπλισμός Διέλασης.....	41
1.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοσκληρυνόμενης και θερμοπλαστικής μήτρας.....	46
2	Μέσα ενίσχυσης.....	47
2.1	Κοκκώδη σύνθετα υλικά .....	47
2.2	Πολυστρωματικά σύνθετα υλικά.....	47
2.3	Ινώδη σύνθετα υλικά .....	48
2.4	Νανοσύνθετα υλικά.....	51
2.4.1	Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία .....	51
2.5	Διεπιφάνεια μήτρας - ενίσχυσης.....	53
3	Χάλυβας.....	54
3.1	Χαλυβουργικά προϊόντα.....	57
3.2	Χάλυβες σπλισμού σκυροδέματος.....	58
3.3	Χάλυβας 316-L.....	59
3.4	Παρασκευή σκόνης χάλυβα.....	61
3.4.1	Water atomization .....	63
3.4.2	Gas atomization.....	64
3.4.3	Επεξεργασία της σκόνης χάλυβα.....	66
3.4.4	Ιδιότητες σκόνης χάλυβα.....	68
4	Παρασκευή δοκιμών.....	74
4.1	Διέλαση και ομογενοποίηση πολυαιθυλενίου.....	74
4.1.1	Υλικά και εξοπλισμός.....	74
4.1.2	Διαδικασία διέλασης πολυαιθυλενίου.....	78
4.1.3	Παραχθέντα δοκίμια.....	83



4.2	Έγχυση ρητίνης για κατασκευή μήτρας με ενίσχυση φολίδων χάλυβα.....	89
4.2.1	Υλικά και εξοπλισμός .....	89
4.2.2	Μέτρα προστασίας κατά την έγχυση ρητίνης .....	93
4.2.3	Διαδικασία έγχυσης ρητίνης .....	94
4.2.4	Παραχθέντα δοκίμια .....	96
4.2.5	Λείανση των δοκιμών .....	101
5	Αποτελέσματα δοκιμών .....	104
5.1	Μελέτη Μικροδομής.....	104
5.1.1	Αποτελέσματα Μελέτης Μικροδομής .....	104
5.2	Σκληρομέτρηση .....	130
5.3	Πρότυπα δοκιμών .....	132
5.3.1	Πρότυπο εφελκυσμού ASTM D882-02.....	132
5.3.2	Πρότυπο κάμψης τριών σημείων ASTM D790-03 .....	133
5.3.3	Πρότυπο συμπίεσης ASTM D695-02a.....	134
5.3.4	Πρέσα μετρήσεων Instron 4482 .....	135
5.4	Δοκιμή αντοχής σε Εφελκυσμό (Tensile Strength Test) .....	135
5.4.1	Δοκίμια εποξικής μήτρας .....	136
5.4.2	Δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας .....	139
5.4.3	Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας .....	142
5.5	Δοκιμή αντοχής σε Κάμψη τριών σημείων (3Point Bending Test) .....	148
5.5.1	Δοκίμια εποξικής μήτρας .....	149
5.5.2	Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας .....	151
5.6	Δοκιμή αντοχής σε συμπίεση .....	154
5.6.1	Δοκίμια εποξικής μήτρας .....	154
5.6.2	Δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας .....	158
5.6.3	Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας .....	162
6	Συμπεράσματα δοκιμών και προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	166
6.1	Σύνοψη συμπερασμάτων από πειράματα.....	166
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	168



## Εικόνες

Εικόνα 2.1 Είδη υαλοφασμάτων[30] .....	50
Εικόνα 3.1 Μικροσκοπική απεικόνιση φολίδων χάλυβα (α) φακός x5, (β) φακός x10, (γ) φακός x20 .....	62
Εικόνα 3.2 Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα .....	63
Εικόνα 4.1 Ο extruder του εργαστηρίου όπου έγινε η Διέλαση του πολυαιθυλενίου .....	74
Εικόνα 4.2 Το πολυαιθυλένιο που χρησιμοποιήσαμε ως πρώτη υλη .....	75
Εικόνα 4.3 Οι φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν .....	75
Εικόνα 4.4 Το σημείο του extruder όπου υπάρχουν οι αντιστάσεις θέρμανσης του πολυμερούς και ο κοχλίας .....	76
Εικόνα 4.5 Η μήτρα μορφοποίησης του πολυμερούς .....	77
Εικόνα 4.6 Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας .....	77
Εικόνα 4.7 Ζύγισμα φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα .....	78
Εικόνα 4.8 Κόκκοι πολυαιθυλενίου .....	79
Εικόνα 4.9 Κόκκοι πολυαιθυλενίου μετά την ανάμειξη με φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	79
Εικόνα 4.10 Προφίλ αλουμινίου σχήματος (Π) .....	80
Εικόνα 4.11 Στήριξη του εξαγόμενου τήγματος από τη μήτρα , στο προφίλ αλουμινίου .....	80
Εικόνα 4.12 Μεταλλική πλάκα συμπίεσης 40Kg .....	81
Εικόνα 4.13 Αποφυγή λυγισμών με μικρά βαρίδια .....	81
Εικόνα 4.14 Σύνθετο υλικό HDPE/SSF μετά από συμπίεση από όπου θα προκύψουν τα τελικά δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης τριών σημείων .....	82
Εικόνα 4.15 Στήριξη για στερεοποίηση ράβδου πολυαιθυλενίου που θα χρησιμοποιηθεί για τεστ συμπίεσης και μεταλλογραφίας .....	82
Εικόνα 4.16 Όλες οι ράβδοι διαφορετικών περιεκτικότητων σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	83



Εικόνα 4.17 Χειροκίνητος διατμητικός κόφτης .....	85
Εικόνα 4.18 Δισκοτόμος struers.....	86
Εικόνα 4.19 Δοκίμιο καθαρού πολυαιθυλενίου διαστάσεων : 100X30x6 .....	86
Εικόνα 4.20 Δοκίμια διαφορετικών περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα, για τα τεστ συμπίεσης .....	87
Εικόνα 4.21 Δοκίμια διαφορετικών περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα, για την μικροσκοπική απεικόνιση .....	87
Εικόνα 4.22 Διχοτόμηση δοκιμίου για μικροσκοπικό έλεγχο.....	88
Εικόνα 4.23 Δοκίμια πολυαιθυλενίου με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5,10 % αντίστοιχα σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	88
Εικόνα 4.24 Ζυγός ακριβείας .....	89
Εικόνα 4.25 Κερί αποκόλλησης καλουπιών(honey wax 250).....	90
Εικόνα 4.26 Εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών(ES-35A) .....	90
Εικόνα 4.27 Μεθακρυλική ρητίνη (DEGADUR 332) .....	91
Εικόνα 4.28 Καταλύτης μεθακρυλικής ρητίνης σε σκόνη.....	91
Εικόνα 4.29 Χαρακτηριστικά στοιχεία μεθακρυλικής ρητίνης DEGADUR 332.....	92
Εικόνα 4.30 Πλαστικός ορθογώνιος δίσκος ως καλούπι έγχυσης.....	92
Εικόνα 4.31 Πλαστικό κυλινδρικό καλούπι .....	93
Εικόνα 4.32 Μέτρα προστασίας: Γυαλιά-μάσκα-γάντια .....	94
Εικόνα 4.33 Καθαρή εποξειδική ρητίνη πριν την κοπή για κατασκευή δοκιμίων.....	95
Εικόνα 4.34 Κυλινδρικά δοκίμια εποξειδικής ρητίνης πριν εξαχθούν από το καλούπι.....	96
Εικόνα 4.35 Δοκίμια εποξειδικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10%.....	98
Εικόνα 4.36 Δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4 και 5%.....	98





Εικόνα 4.37 Κυλινδρικά δοκίμια εποξειδικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10%.....	99
Εικόνα 4.38 Δοκίμια εποξειδικής ρητίνης που μετασχηματίστηκαν από κυλινδρικά σε 25.4X12.7X12.7 για τα τεστ συμπίεσης κατά πρότυπο ASTM.....	99
Εικόνα 4.39 Κυλινδρικά δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4 και 5%.....	100
Εικόνα 4.40 Δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης που μετασχηματίστηκαν από κυλινδρικά σε 25.4X12.7X12.7 για τα τεστ συμπίεσης κατά πρότυπο ASTM.....	100
Εικόνα 4.41 Αυτόματος περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος struers.....	101
Εικόνα 4.42 Λειασμένα κυλινδρικά δοκίμια πολυαιθυλενίου.....	102
Εικόνα 4.43 Λειασμένα διχοτομημένα δοκίμια πολυαιθυλενίου.....	102
Εικόνα 4.44 Λειασμένα δοκίμια εποξειδικής ρητίνης.....	103
Εικόνα 4.45 Λειασμένα δοκίμια μεθυλακρυλικής ρητίνης.....	103
Εικόνα 5.1 Οπτικό μικροσκόπιο Leica DMR.....	104
Εικόνα 5.2 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) τριών διαφορετικών σημείων σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	106
Εικόνα 5.3 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκίμιου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	107
Εικόνα 5.4 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκίμιου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	107
Εικόνα 5.5 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) τριών διαφορετικών σημείων σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	108
Εικόνα 5.6 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκίμιου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 20% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	109



Εικόνα 5.7 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	109
Εικόνα 5.8 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση φολίδων στο κέντρο του δοκιμίου. ....	110
Εικόνα 5.9 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	110
Εικόνα 5.10 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	111
Εικόνα 5.11 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, παρατηρείται συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα.....	111
Εικόνα 5.12 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	112
Εικόνα 5.13 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x300) που δείχνει λεπτομέρειες από ομοιόμορφη διασπορά φολίδων και από συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα αλλά και υπεροξείδια (πάνω βέλος) (περιεκτικότητα 5% wt SSF) σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου .....	112
Εικόνα 5.14 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x2000) που δείχνει συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα από την πλάγια όψη της σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου (περιεκτικότητα 5%).....	113
Εικόνα 5.15 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x2000) που δείχνει φολίδα χάλυβα από την πλάγια όψη της σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου (περιεκτικότητα 5%) .	113



Εικόνα 5.16 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η δομή της περιοχής θραύσης.....	114
Εικόνα 5.17 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η δομή της περιοχής θραύσης.....	114
Εικόνα 5.18 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται θραύση στο σημείο που υπήρχαν συσσωματώματα.....	115
Εικόνα 5.19 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται θραύση στο σημείο που υπήρχαν συσσωματώματα.....	115
Εικόνα 5.20 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	116
Εικόνα 5.21 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) εγκάρσιας τομής δοκιμίου εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα.....	116
Εικόνα 5.22 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x50) που δείχνει την διασπορά των φολίδων χάλυβα (περιεκτικότητα 1%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης .....	117
Εικόνα 5.23 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x800) που δείχνει συσσωματώματα φολίδων χάλυβα και λεπτομέρεια αυτών σε μεγαλύτερη εστίαση( x5000) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης (περιεκτικότητα 1%).....	117
Εικόνα 5.24 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x1000) που δείχνει φολίδα χάλυβα (in plane επίπεδο) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης (περιεκτικότητα 1%).....	118



Εικόνα 5.25 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x50) που δείχνει την ενσωμάτωση των φολίδων χάλυβα και τη δημιουργία πορώδους (περιεκτικότητα 10%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης.....	118
Εικόνα 5.26 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x800) που δείχνει τη δημιουργία πόρου ανάμεσα σε συσσωματώματα φολίδων χάλυβα (περιεκτικότητα 10%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης.....	119
Εικόνα 5.27 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, πριν και μετά από εφελκυστική καταπόνηση. Παρατηρείται σημείο κοντά στη θραύση .....	120
Εικόνα 5.28 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου καθαρής εποξικής ρητίνης (μήτρα), κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης. ....	121
Εικόνα 5.29 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης.....	121
Εικόνα 5.30 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης.....	122
Εικόνα 5.31 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	122
Εικόνα 5.32 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	123



Εικόνα 5.33 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	123
Εικόνα 5.34 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	124
Εικόνα 5.35 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	124
Εικόνα 5.36 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	125
Εικόνα 5.37 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	125
Εικόνα 5.38 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	126
Εικόνα 5.39 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) εγκάρσιας τομής δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	126
Εικόνα 5.40 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα .....	127
Εικόνα 5.41 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) δοκιμίου καθαρής μεθακρυλικής ρητίνης.....	127
Εικόνα 5.42 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	128



Εικόνα 5.43 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης .	
Παρατηρείται ρηγμάτωση. ....	128
Εικόνα 5.44 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης.	
Παρατηρείται διάδοση ρωγμών από πόρο του υλικού.....	129
Εικόνα 5.45 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης.	
Παρατηρείται θραύση σε σημείο όπου αρχικά υπήρχε πόρος.....	129
Εικόνα 5.46 Δοκίμιο εποξικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02.....	137
Εικόνα 5.47 Δοκίμιο εποξικής ρητίνης κατά την αστοχία σε δοκιμή εφελκυσμού .....	138
Εικόνα 5.48 Δοκίμια εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2,3 και 4 % σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό.....	138
Εικόνα 5.49 Δοκίμιο μεθακρυλικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02 .....	140
Εικόνα 5.50 Δοκίμιο μεθακρυλικής ρητίνης κατά την δοκιμή εφελκυσμού .....	141
Εικόνα 5.51 Δοκίμιο μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό (μπορεί να παρατηρηθεί η εμφάνιση πόρων μετά το πέρας του εφελκυσμού).....	141
Εικόνα 5.52 Δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2 και 3 % σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό.....	142
Εικόνα 5.53 Δοκίμιο πολυαιθυλενικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02 .....	146
Εικόνα 5.54 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου (μήτρα) μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό .....	146



Εικόνα 5.55 Δοκίμια πολυαιθυλενίου (επαναλήψιμης συμπεριφοράς) περιεκτικότητας 2% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό .....	147
Εικόνα 5.56 Δοκίμια πολυαιθυλενίου (επαναλήψιμης συμπεριφοράς) περιεκτικότητας 3% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό .....	147
Εικόνα 5.57 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό .....	148
Εικόνα 5.58 Δοκίμια εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες χάλυβα μετά την κάμψη τριών σημείων .....	150
Εικόνα 5.59 Προοδευτικές απόψεις από πείραμα κάμψης πολυαιθυλενικής μήτρας με 3% φολίδες χάλυβα .....	151
Εικόνα 5.60 Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας με ποσοστό φολίδων χάλυβα 0,1,2,3,4,5 και 10% μετά την κάμψη τριών σημείων.....	153
Εικόνα 5.61 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου πριν και μετά τη δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων.....	153
Εικόνα 5.62 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 1% σε φολίδες χάλυβα πριν και μετά τη δοκιμή σε συμπίεση .....	157
Εικόνα 5.63 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση.....	157
Εικόνα 5.64 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης μετά τη δοκιμή σε συμπίεση.....	158
Εικόνα 5.65 Δοκίμο μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 1% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση.....	161
Εικόνα 5.66 Δοκίμο πολυαιθυλενίου πριν και μετά τη δοκιμή σε συμπίεση .....	164
Εικόνα 5.67 Δοκίμια πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση .....	165



## Σχήματα

Σχήμα 1.1 Ταξινόμηση των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών[4] .....	25
Σχήμα 1.2 Στοιχειώδη μοντέλα συνθέτων με ενίσχυση κόκκων και ινών, αντίστοιχα.....	25
Σχήμα 1.3 Δομή Εποξειδικής Ρητίνης [5] .....	32
Σχήμα 1.4 Μορφή μη τροποποιημένης εποξειδικής ρητίνης[6] .....	32
Σχήμα 1.5 Λεπτομέρειες στη γεωμετρία του κοχλία .....	44
Σχήμα 2.1 Τύποι συνθέτων υλικών με ινώδη μέσα ενίσχυσης[29].....	49
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα Schaffler κατάταξης των ανοξειδωτων χαλύβων .....	55
Σχήμα 3.2 Διάταξη μεθόδου water atomization.....	63
Σχήμα 3.3 Διάταξη της Gas atomization .....	65
Σχήμα 3.4 Όψη σε τομή κεφαλών gas atomizing.....	65
Σχήμα 3.5 Διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης τριών λιπαντικών στην πυκνότητα (α) και την greens strength (β) της σκόνης χάλυβα [15].....	72
Σχήμα 5.1 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας.....	131
Σχήμα 5.2 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια εποξικής μήτρας.....	131
Σχήμα 5.3 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας.....	132
Σχήμα 5.4 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμίων ρητίνης με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα.....	136
Σχήμα 5.5 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμίων εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	137





Σχήμα 5.6 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα.....	139
Σχήμα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	140
Σχήμα 5.8. Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα .....	143
Σχήμα 5.9 . Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	143
Σχήμα 5.10 Συγκριτικό διάγραμμα μήκους πλατό πλαστικής περιοχής δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	144
Σχήμα 5.11 Συγκριτικό διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	144
Σχήμα 5.12 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών επιμήκυνσης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	145
Σχήμα 5.13 Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	145
Σχήμα 5.14 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων εποξικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα.....	149
Σχήμα 5.15 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε κάμψη (UTS) δοκιμίων εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	150
Σχήμα 5.16 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα .....	152
Σχήμα 5.17 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε κάμψη (UTS) δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	152



Σχήμα 5.18 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμίων εποξικής ρητίνης με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) περιεκτικότητα φολίδων χάλυβα .....	155
Σχήμα 5.19 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμίων εποξικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	156
Σχήμα 5.20 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε συμπίεση (UTS) δοκιμίων εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	156
Σχήμα 5.21 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα.....	159
Σχήμα 5.22 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε συμπίεση (UTS) για παραμόρφωση 68.5%, δοκιμίων μεθακρυλικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	159
Σχήμα 5.23 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμίων μεθακρυλικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF.....	160
Σχήμα 5.24 Επαναφορά ύψους δοκιμίων με το πέρας του χρόνου για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	160
Σχήμα 5.25 Επαναφορά ύψους δοκιμίων για κάθε περιεκτικότητα SSF (wt) ,δοκιμίων μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση σε σχέση με το χρόνο που πέρασε από τη συμπίεση .....	161
Σχήμα 5.26 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα .....	163
Σχήμα 5.27 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF (η συνολική ενέργεια μετρήθηκε σε 65% Strain).....	163
Σχήμα 5.28 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε συμπίεση (UTS) για παραμόρφωση 60%, δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF .....	164



Σχήμα 5.29 Επαναφορά ύψους δοκιμίων με το πέρας του χρόνου για δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση με βάση την περιεκτικότητα σε SSF ...	165
Σχήμα 5.30 Επαναφορά ύψους δοκιμίων για κάθε περιεκτικότητα SSF (wt) ,δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση σε σχέση με το χρόνο που πέρασε από τη συμπίεση.....	166

## Πίνακες

Πίνακας 1 Ταξινόμηση του χάλυβα βάση χημικής σύσταση.....	56
Πίνακας 2 Ταξινόμηση του χάλυβα βάση της περαιτέρω κατεργασίας του.....	56
Πίνακας 3 Ιδιότητες του χάλυβα 316-L.....	60
Πίνακας 4 Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316-L.....	60
Πίνακας 5 Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες.....	61
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα.....	76
Πίνακας 7 Παραχθέντα Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας.....	84
Πίνακας 8 Περιγραφή όλων των δοκιμίων εποξικής ρητίνης.....	96
Πίνακας 9 Περιγραφή όλων των δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης.....	97
Πίνακας 10 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα.....	130
Πίνακας 11 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμίων εποξειδικής ρητίνης με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα.....	130
Πίνακας 12 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα.....	130
Πίνακας 13 Επαναφορά παραμόρφωσης με το πέρας του χρόνου για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση.....	160



Πίνακας 14 Επαναφορά παραμόρφωσης με το πέρας του χρόνου για δοκίμια πολυαιθυλενίου που υπέστησαν συμπίεση ..... 164



## 1 Σύνθετα υλικά

### 1.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν μια ευρεία και σημαντική κατηγορία υλικών με πολλές τεχνικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση ενισχυμένων υλικών με ίνες σε πολλές εφαρμογές και υπάρχουν πολλές ενδείξεις ότι κάτι τέτοιο θα συνεχιστεί. Η ραγδαία ανάπτυξη οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών και κυρίως των μετάλλων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες (όπως ακαμψία, σκληρότητα, χαμηλή πυκνότητα κλπ.) σε σχέση με τις ιδιότητες των παραδοσιακών υλικών τα οποία αντικαθιστούν. Οι ιδιότητες αυτές δεν μπορούν να επιτευχθούν από τη χρήση των μεμονωμένων συστατικών τους.[3]

*Ορισμός κατά Agarwal–1990: Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους*

**Ορισμός :** Σύνθετο υλικό είναι ένα σύστημα που συνίσταται από ένα μείγμα ή συνδυασμό μιγμάτων δύο ή περισσότερων διαφορετικών υλικών (που διαφέρουν είτε στη συγκεκριμένη κατάσταση που βρίσκονται, είτε στη χημική σύσταση) και που είναι αδιάλυτα το ένα στο άλλο. Οι ιδιότητες του συνθέτου είναι διαφορετικές από εκείνες των συστατικών του και διαφοροποιούνται εντονότερα όταν ένα από τα συστατικά:

1. Είναι σε ινώδη μορφή,
2. έχει κ.ο. περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 10% και
3. παρουσιάζει ιδιότητες με τιμές σημαντικά υψηλότερες (>5 φορές ) του άλλου.[3]



### **Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών:**

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγηθείσα ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbonfibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.



Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης.

Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θεοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

Ένα σύνθετο υλικό που προορίζεται για κατασκευαστικές εφαρμογές θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:



1. Να περιέχει δύο ή περισσότερα φυσικά και μηχανικά διαχωριζόμενα υλικά.
2. Να μπορεί να δημιουργηθεί από την ανάμειξη διαφορετικών υλικών με τρόπο τέτοιο, ώστε η διασπορά του ενός στο άλλο υλικό να είναι ελεγχόμενη, με φυσικό επακόλουθο την επίτευξη των βέλτιστων ιδιοτήτων.
3. Οι ιδιότητες του να είναι ανώτερες και σε μερικές περιπτώσεις μοναδικές σε σχέση με τις ιδιότητες των μεμονωμένων συστατικών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται συνήθως από μία μήτρα και το μέσο ενίσχυσης ή το πληρωτικό υλικό. Η μήτρα είναι το κύριο συστατικό που χρησιμεύει στο να συγκρατηθεί το σύνθετο και του δίνει την κύρια μορφή του. Το μέσο ενίσχυσης αποτελεί το δομικό συστατικό και καθορίζει τη δομή και τη μηχανική αντοχή του συνθέτου. Άλλα συστατικά όπως ο καταλύτης, ο σταθεροποιητής και κάποια άλλα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες.

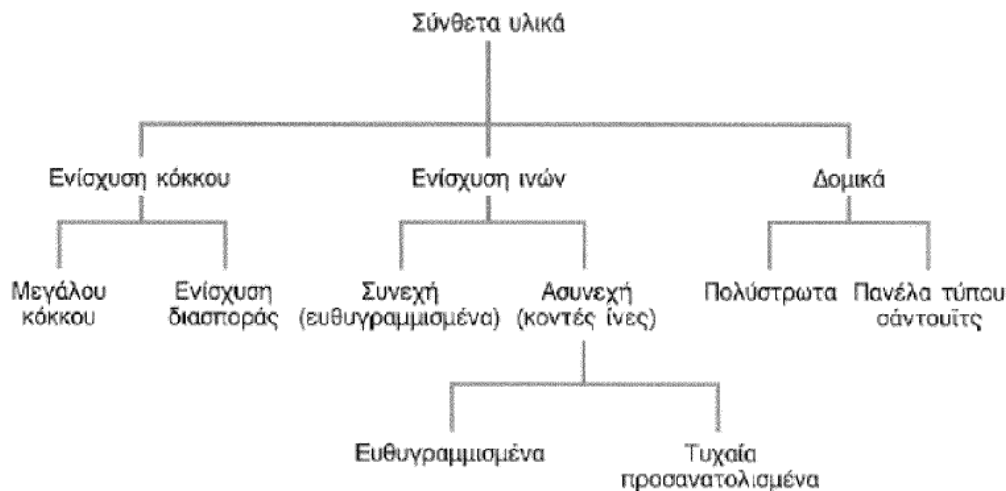
Τα σύνθετα κατατάσσονται αναλόγως της φύσης της μήτρας σε τρεις κύριες κατηγορίες, ως ακολούθως:

- \_ Σύνθετα με μεταλλική μήτρα.
- \_ Σύνθετα με πολυμερική μήτρα.
- \_ Σύνθετα με κεραμική μήτρα.

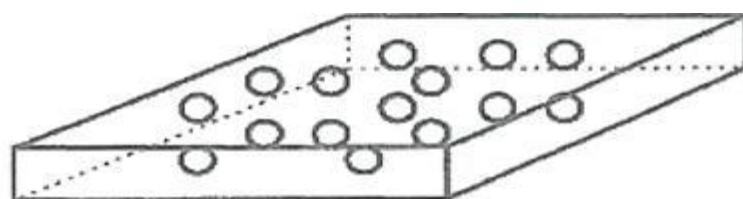
Ανάλογα με το μέσο ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε 4 ακόμα κατηγορίες:

- Σύνθετα ενισχυμένα με τεμαχίδια (particulatefillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (fibres).
- Σύνθετα ενισχυμένα με φύλλα (laminarfillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με δομικά στοιχεία (π.χ. δομικό αφρό ή κυψελλωτά στρώματα honeycombpanels).

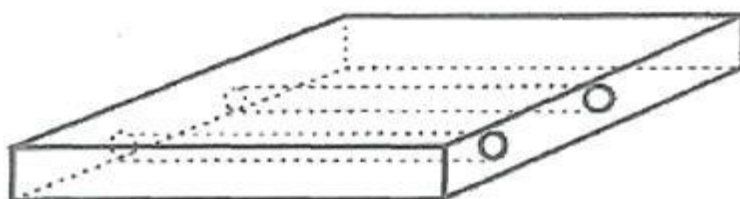




Σχήμα 1.1 Ταξινόμηση των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών[4]



**κοκκώδες σύνθετο**



**ινώδες σύνθετο**

Σχήμα 1.2 Στοιχειώδη μοντέλα συνθέτων με ενίσχυση κόκκων και ινών, αντίστοιχα

Η συμπεριφορά καθώς και οι ιδιότητες του συνθέτου καθορίζονται από τα υλικά από τα οποία αποτελείται, από τη μορφή των συστατικών και τη διεύθυνσή τους, καθώς και από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών, γι' αυτό και οι ιδιότητες κάθε συστατικού που συμμετέχει στο σύνθετο είναι κρίσιμης σημασίας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των



συστατικών οδηγεί σε νέες ιδιότητες, οι οποίες συνήθως διαφέρουν από εκείνες του καθενός συστατικού ξεχωριστά.

Εξίσου σημαντικό ρόλο στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου παίζουν τα χαρακτηριστικά τόσο της δομής όσο και της γεωμετρίας των συστατικών. Το σχήμα και το μέγεθος των φάσεων, η διευθέτηση και η κατανομή τους, αλλά και το σχετικό ποσοστό του καθενός είναι ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες και συνεισφέρουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη συνολική απόδοση του συνθέτου. Τα συστατικά των συνθέτων υλικών μπορούν να επιλεγούν κατά τρόπο που να δίνουν στο σύνθετο υλικό ασυνήθιστους συνδυασμούς σκληρότητας, αντοχής, βάρους, αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχής σε διάβρωση ή αγωγιμότητας και άλλες ιδιότητες.

Πολλά υλικά είναι στη πραγματικότητα σύνθετα, και ας μην φαίνονται έτσι από πρώτης όψεως. Αυτό συμβαίνει, π.χ., στα φυσικά πολυμερή, τα οποία συχνά αποτελούνται από τουλάχιστον δύο συστατικά. Πλήθος υλικά συχνά αποτελούν συνδυασμό μετάλλου με μέταλλο, μετάλλου με κεραμικό, μετάλλου με πολυμερές, κεραμικού με πολυμερές, κεραμικού με κεραμικό ή πολυμερές με πολυμερές.

## **1.2 Μήτρες σύνθετων υλικών**

### **1.2.1 Μεταλλικές μήτρες**

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρες προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή (~300 οC), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 οC.

Σε σχέση με τις πολυμερικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων ακολουθούν.



### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες.
- Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.
- Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.
- Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.
- Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.
- Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.
- Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.
- Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO<sub>2</sub> σε μήτρα Al).
- Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
- Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

#### **1.2.2 Κεραμικές μήτρες**

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αφινδιασμούς και αφέτερου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το



ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας. Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών. Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

### **1.2.3 Πολυμερικές μήτρες**

Ο ορισμός της μήτρας σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να δοθεί λαμβάνοντας υπ' όψη το ρόλο της στο υλικό. Η μήτρα αποτελεί το συνδετικό μέσο που περικλείει το πιο σημαντικό στοιχείο του συνθέτου υλικού, δηλαδή το μέσο ενίσχυσης, μεταφέροντας το φορτίο σε αυτό. Μπορεί να θεωρηθεί όμως και ως η πρωτεύουσα φάση του συνθέτου που είναι συνδεδεμένη με τη δευτερεύουσα φάση (την ενίσχυση).

Ο πρώτος ορισμός είναι και ο πιο διαδεδομένος γιατί στα περισσότερα σύνθετα υλικά χρησιμοποιείται μια μήτρα με σχετικά χαμηλές αντοχές, όπως ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Η αντοχή σε τέτοια σύνθετα οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο μέσο ενίσχυσης, και για λόγους υψηλής απόδοσης είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας του συνθέτου στο τελευταίο. Σύμφωνα λοιπόν με αυτήν την προσέγγιση, κυρίαρχης σημασίας είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών κατεργασίας της μήτρας και της συνάφειας της με το μέσο ενίσχυσης, ενώ μικρότερης αξίας είναι οι βελτιώσεις στις ιδιότητες δομής του συνθέτου που σχετίζονται με τη μήτρα.

Ο λιγότερο σημαντικός ρόλος της δομής της μήτρας στη λειτουργία της ως συνεκτικού μέσου δεν πρέπει να επισκιάζει την ανάγκη της διατήρησης της δομικής της ακεραιότητας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η διεπιφανειακή(μήτρας-μέσου ενίσχυσης) αντοχή σε διάτμηση και εφελκυσμό μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμες. Η σημασία της ακεραιότητας της μήτρας γίνεται εμφανής όταν ληφθεί υπ' όψη το γεγονός ότι οι συνεχείς ίνες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ως μέσα ενίσχυσης δεν παραμένουν άθικτες υπό συνήθη καταπόνηση. Έτσι, μικρές ατέλειες οδηγούν σε τοπικές αστοχίες. Οι αστοχίες αυτές δεν θα εξασθενήσουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης φορτίου από το σύνθετο υλικό,



εφόσον τα φορτία μπορούν να μεταφερθούν αποτελεσματικά, μέσω της μήτρας, σε άλλες ίνες.

Οι εφαρμογές που απαιτούν σημαντικές βελτιώσεις των ιδιοτήτων της μήτρας είναι εκείνες στις οποίες τα υλικά υπόκεινται σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, κυρίως ως προς την θερμοκρασία. Εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως, π.χ., σε πυραύλους, απαιτούν για μήτρες υλικά με υψηλό βαθμό θερμικής αντοχής.

Τέλος, η επιλογή της μήτρας για ένα σύνθετο υλικό είναι στενά περιορισμένη όχι μόνο από τις μηχανικές ιδιότητές της αλλά και από το βάρος της. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το βάρος του συνθέτου υλικού χωρίς να θυσιάσει η δομική ακεραιότητα του, το ποσοστό του υλικού της μήτρας συνήθως διατηρείται στην ελάχιστη τιμή που μπορεί να δώσει επαρκή αντοχή σε διάτμηση και χαμηλό περιεχόμενο σε κενά (φουσαλίδες)[3].

### **Ιδιότητες της μήτρας**

Η μήτρα ως συστατικό του συνθέτου εξυπηρετεί δύο πολύ σημαντικές λειτουργίες. Αφ' ενός διατηρεί την ινώδη φάση στη θέση της, αφ' ετέρου κάτω από τη εφαρμογή δύναμης παραμορφώνεται και διανέμει την τάση στο υψηλού μέτρου ελαστικότητας ινώδες συστατικό. Η επιλογή της μήτρας για την κατασκευή συνθέτου που θα χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό περιορίζεται από την απαίτηση ότι η μήτρα θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη επιμήκυνση στη θραύση από ότι η ίνα. Επίσης, η μήτρα θα πρέπει να μεταφέρει τις τάσεις στις ίνες και να αλλάζει σχήμα, ώστε να επιταχύνει τη μεταφορά των τάσεων και να ασκεί μόνο εφελκυστική φόρτιση στις ίνες. Εξάλλου, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, η μήτρα πρέπει να περικλείει την ινώδη φάση χωρίς υπερβολική συρρίκνωση, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει στη συσσώρευση εσωτερικών τάσεων στις ίνες.

Ο τύπος της μήτρας επηρεάζει συχνά τις χημικές θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του συνθέτου. Επηρεάζει επίσης τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού και συγκεκριμένα τη διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση, την αντοχή σε κάμψη και τις αντοχές σε εγκάρσια φόρτιση κατά τον εφελκυσμό, την κάμψη και τη θλίψη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η ρητίνη χρησιμοποιείται για μήτρα, είναι αυτή που καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας και τις παραμέτρους της παραγωγικής διαδικασίας για την κατασκευή του συνθέτου.[3, 2]



## Είδη μητρών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρες στα σύνθετα υλικά διαφέρουν ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι κυριότερες κατηγορίες υλικών είναι τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πολυμερή. Ειδικότερα, οι πολυμερικές μήτρες διακρίνονται σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε θερμοσκληρυνόμενη μήτρα (εποξειδική ρητίνη). Ο λόγος αυτής της προτίμησης είναι η κατάσταση του υλικού στο στάδιο παρασκευής του συνθέτου και η ευκολία διαβροχής του ενισχυτικού μέσου σε αυτό το στάδιο[3, 2].

### 1.2.3.1 Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες

Ο όρος θερμοσκληρυνόμενα αποδίδεται στα πολυμερή τα οποία στην τελική φάση επεξεργασίας αποκτούν σταυροδεσμούς και σχηματίζουν ένα δικτύωμα με την επίδραση της θερμότητας. Τα μόρια δηλαδή στο τελικό προϊόν συνδέονται σταθερά με κύριους δεσμούς μεταξύ τους κι έτσι επιτυγχάνεται τέτοια συνοχή στο πλέγμα, ώστε δεν μπορεί πλέον το πολυμερές να μεταβεί στην πλαστική κατάσταση με θέρμανση. Τέτοιου είδους δικτυώματα συνιστούν εξαιρετικά κατασκευαστικά υλικά, λόγω της διαστατικής τους σταθερότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και το υψηλό μέτρο ελαστικότητάς τους. Η παρουσία των σταυροδεσμών παρεμποδίζει τη πλαστική παραμόρφωση και τον ερπυσμό του υλικού, καθώς αναστέλλει την ελευθερίας κινήσεως των μακρομοριακών αλυσίδων. Με αυτόν τον τρόπο η πλαστική παραμόρφωση του υλικού γίνεται αδύνατη χωρίς τη θραύση των σταυροδεσμών. Επίσης, τα υλικά αυτά παραμένουν αδιάλυτα από τους διαλύτες, που δεν μπορούν να καταστρέψουν τους σταυροδεσμούς.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή - πλέγματα παρασκευάζονται με την χημική αντίδραση ανάμεσα σε μοριακές μονάδες (μονομερή) που διαθέτουν πολλαπλά σημεία αντίδρασης, ή από πολυμερή, τα μόρια των οποίων συνδέονται μεταξύ τους μέσω πολυδραστικών αντιδραστηρίων. Οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος εξαρτώνται από τη φύση των μοριακών μονάδων που συνθέτουν το πλέγμα και από την πυκνότητα των σημείων διασταύρωσης. Η δομή του τελικού δικτυώματος καθορίζεται από το είδος των αρχικών αντιδρώντων/πολυμερών/πολυδραστικών αντιδραστηρίων, και από τις συνθήκες δικτύωσης (χρόνος, θερμοκρασία).

Έτσι, για παράδειγμα, σύνθετα με μήτρα φαινολικής ρητίνης και ενίσχυση από ίνες

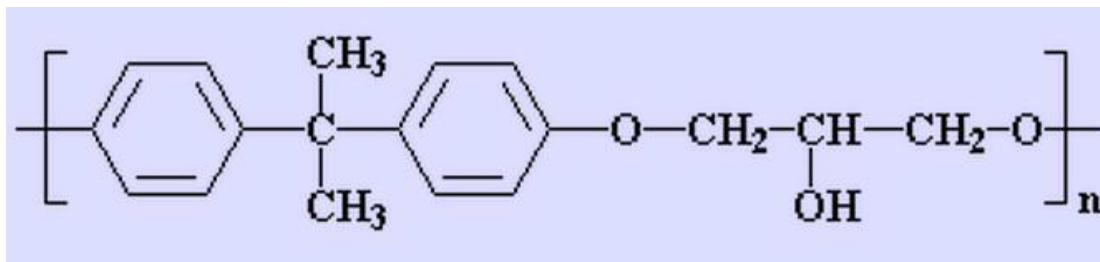


γυαλιού έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα (μηδενικό ερπυσμό). Οι ρητίνες μελαμίνης χαρακτηρίζονται από σκληρότητα, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμική προσβολή και αντοχή στη φθορά. Η χρήση σιλικόνων ως μήτρα οδηγεί σε σύνθετα με εξαιρετική αντοχή σε θερμική προσβολή και υψηλού επιπέδου ηλεκτρικές (μονωτικές) ιδιότητες. Η εφαρμογή τους, όμως, περιορίζεται λόγω των υποβαθμισμένων μηχανικών τους ιδιοτήτων. Οι πολυεστέρες, λόγω της ποικιλίας της σύστασης τους και των πολλών δυνατών μεθόδων παραγωγής, είναι εύχρηστοι και από τις πιο διαδεδομένες μήτρες σε σύνθετα υλικά. Οι περισσότερες βάρκες και σκάφη κάτω από 20 μέτρα μήκους είναι φτιαγμένες από σύνθετο υλικό με πολυεστερική μήτρα και υαλονήματα ως ενίσχυση. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή ως μήτρες είναι οι φαινολικές ρητίνες, οι ρητίνες μελαμίνης και ουρίας, οι σιλικόνες, οι ακόρεστοι πολυεστέρες κλπ[3, 2].

#### 1.2.3.1.1 Εποξειδικές ρητίνες

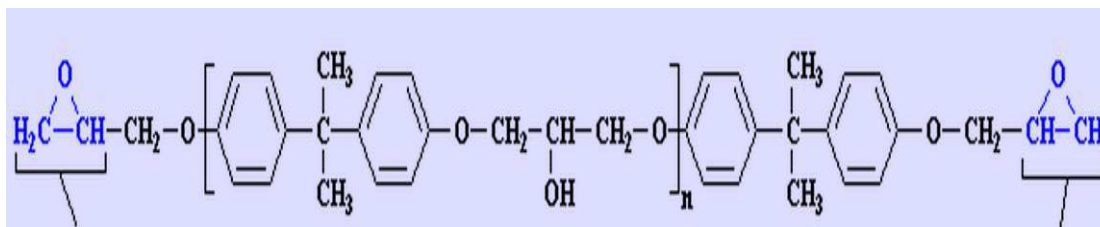
##### **Γενικά**

Εποξειδικό ή πολυεποξειδικό είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο επόξυ-ομάδες.



Σχήμα 1.3 Δομή Εποξειδικής Ρητίνης [5]

Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας την δομή των εποξειδικών ρητινών με κάποιο πρόσθετο όπως σκληρυντής, πλαστικοποιητής με την βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα, μέτριου μοριακού βάρους, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο από μόρια μικρού μοριακού βάρους[7,8].



Σχήμα 1.4 Μορφή μη τροποποιημένης εποξειδικής ρητίνης[6]

Βασικό χαρακτηριστικό της αντίδρασης πολυμερισμού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται στο μίγμα της ρητίνης με τα διάφορα πρόσθετα. Με την έκλυση θερμότητας η αντίδραση πολυμερισμού χαρακτηρίζεται εξώθερμη. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες παρέχουν σκληρή και αμετάβλητη αντίσταση τριβής και πολύ καλή χημική αντίσταση[7,8]

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση τις υγρές ρητίνες είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες[7,8].





Ένας σημαντικός αριθμός εποξειδικών ρητινών είχε ως αποτέλεσμα το γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης και την ευρεία σε έκταση χρήση τους. Οι κυριότερες ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών είναι οι παρακάτω:

- 1) Χαμηλή υδροσκοπικότητα, καλή διαστατική σταθερότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με χαμηλό ιξώδες, όπως και τα μίγματά τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές), με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.
- 2) Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από 50C μέχρι 1500C και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.
- 3) Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους, έτσι μειώνεται η παρουσία τάσεων.
- 4) Άριστη ηλεκτρική μόνωση.
- 5) Υψηλή δύναμη συγκόλλησης.(Στην σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί). Αυτή η ιδιότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τις πολλές εφαρμογές.
- 6) Ποικιλία εφαρμογών. Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.(Ανάμειξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων).
- 7) Καλή χημική αντίσταση που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα.
- 8) Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτή η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εποξειδικές ρητίνες.[7,8]

Άλλες εποξειδικές ρητίνες είναι :

- Διγλυκοδιαιθέρας της διφαινόλης Α (DGEBA) ,
- Τετραγλυκιδιαιθέρας της διανυλίνης (TGMDA) ,
- Εποξειδική φαινολοκρεζολικής νεολάκης
- Κυκλοαλειφατικές εποξειδικές (CA)



### ➤ Παραγωγή και σκλήρυνση εποξειδικής ρητίνης

Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α. Οι εποξειδικές ρητίνες τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυνμένο προϊόν με την προσθήκη ενός «σκληρυντή» και μπορούν να πολυμεριστούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (potlife), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξειδικής ρητίνης – μέσω σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την εποξυ-ομάδα [9].

Υπάρχει μια μεγάλη ομάδα εταιρειών που αγοράζει πρώτες ύλες από τους κυρίως παραγωγούς και κατόπιν συνθέτουν (αναμιγνύουν, τροποποιούν ) εποξειδικά συστήματα από αυτές τις πρώτες ύλες. Οι εταιρείες αυτές είναι γνωστές σαν «formulators» και μπορούν με χιλιάδες τρόπους να τροποποιήσουν τα εποξειδικά: με την προσθήκη ορυκτών πληρωτικών (π.χ. τάλκης, οξείδιο πυριτίου, σκόνη αλουμινίου, ανθρακικό ασβέστιο, καολίνης, μίκα, μπεντονίτης, πυριτικό αλουμίνιο, πυριτικό μαγνήσιο κλπ), με τη προσθήκη πλαστικοποιητών (plasticizers) για τη βελτίωση της ευκαμψίας του υλικού και την αύξησης του συγκολλητικού δεσμού, μειωτών ιξώδους - αραιωτικών (diluent, extenders), επιταχυντών, βελτιωτικών πρόσφυσης κλπ. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορούν να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την εκτέλεση του έργου. Ευρύτερη εφαρμογή έχουν τα αραιωτικά και τα πληρωτικά υλικά[9].

Τα αραιωτικά υλικά, που μπορεί να είναι δραστικά ή αδρανή, ενώ μειώνουν το ιξώδες πολλών εμπορικών εποξειδικών ρητινών με πολύ μεγάλο ιξώδες. Τυπικό παράδειγμα δραστικού αραιωτικού αποτελεί ο φθαλικός διβουτυλεστέρας[9].

Τα πληρωτικά υλικά έχουν ως κύριο σκοπό να αυξήσουν το βάρος και τον όγκο του τελικού προϊόντος και μ'αυτό τον τρόπο να μειωθεί το κόστος. Συνήθως γίνεται διάκριση σε αγώγιμα και μη αγώγιμα πληρωτικά ανάλογα αν αυξάνουν ή όχι την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ρητίνης[9].



Οι εποξειδικές ρητίνες δεν είναι εύκαμπτα υλικά και ακόμα και με την προσθήκη μεγάλων συγκεντρώσεων πλαστικοποιητή δεν αποκτούν ιδιότητες που να προσεγγίζουν ιδιότητες συνηθισμένων ελαστομερών. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο προστίθενται οι πλαστικοποιητές, είναι η ελάττωση του έμφυτου εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Το αποτέλεσμα της προσθήκης του πλαστικοποιητή είναι η αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης και γι' αυτόν τον λόγο πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν [7-8].

### ➤ Εφαρμογές

Τα εποξειδικά βρίσκουν αξιόλογη χρήση σε εφαρμογές όπως:

#### Χρώματα και επικαλυπτικά

Η ευρύτερη εφαρμογή των εποξειδικών ρητινών γίνεται στον τομέα των επικαλυπτικών με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και αντοχή σε χημικά μέσα. Περιλαμβάνονται τα επικαλυπτικά σε μορφή σκόνης για πλυντήρια, στεγνωτήρια και άλλες ηλεκτρικές συσκευές κουζίνας. Τα επικαλυπτικά με βάση τα εποξειδικά σε σκόνη, που η συγκόλληση τους γίνεται με τήξη, χρησιμοποιούνται ευρέως για αντιδιαβρωτική προστασία χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ελαίων και αερίων, σε σωληνώσεις (χαλύβδινες) για τη μεταφορά πόσιμου νερού, σε ράβδους οπλισμού σκυροδέματος κλπ [9].

Εποξειδικά επικαλυπτικά χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως ως αστάρια για τη βελτίωση της πρόσφυσης των θαλασσιών χρωμάτων και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Μεταλλικά δοχεία κονσέρβας και άλλα δοχεία για τρόφιμα, όπως π.χ. τομάτες που είναι όξινες συνήθως επικαλύπτονται με εποξειδικά για να αποτραπεί η διάβρωση τους. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης για δάπεδα υψηλών απαιτήσεων και για διακοσμητικά δάπεδα[9].

#### Συγκολλητικά

Τα εποξειδικά συγκολλητικά ανήκουν στα συγκολλητικά εκείνα που ονομάζονται «δομικά συγκολλητικά» (που περιλαμβάνουν επίσης πολυουρεθάνες, ακρυλικά, κυανοακρυλικά κλπ.). Τα υψηλών απαιτήσεων αυτά εποξειδικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων, ποδηλάτων κλπ όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές πρόσφυσης [9].



Τα εποξειδικά συγκολλούν ξύλο, μέταλλο, γυαλί, πέτρα και κάποια πλαστικά. Μπορεί να είναι εύκαμπτα ή δύσκαμπτα, διαφανή ή αδιαφανή/έγχρωμα, σκληρυνόμενα γρήγορα ή πολύ αργά και είναι γενικώς ασυγκρίτως καλύτερα από τα κοινά συγκολλητικά όσον αφορά την αντίστασή τους στη θερμότητα και στα χημικά[9].

#### Βιομηχανικά εργαλεία παραγωγής και σύνθετα υλικά

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλουπιών, μοντέλων, αντικολλητών φύλλων, στη χύτευση και στη βιομηχανική παραγωγή βοηθημάτων[9].

Τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή στοιχείων ενισχυμένων με ίνες ή από σύνθετα υλικά. Είναι πιο ακριβά από τις πολυεστερικές ρητίνες και τις ρητίνες από βινυλεστέρα, αλλά γενικώς παράγουν ισχυρότερα και πιο ανθεκτικά στη θερμοκρασία σύνθετα υλικά[9].

#### Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα

Οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, στον εξοπλισμό διανομής μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων, στους μονωτήρες μετασχηματιστών και στους μονωτήρες. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι εξαιρετικοί ηλεκτρικοί μονωτές και προστατεύουν τα ηλεκτρικά στοιχεία από μικρά κυκλώματα, σκόνη και υγρασία[9].

#### Ναυτιλιακές εφαρμογές

Τα εποξειδικά πωλούνται σε καταστήματα σιδηρικών, σε σετ δύο συστατικών. Μπορεί όμως να πωλούνται σε καταστήματα με ναυτιλιακά είδη για θαλάσσιες εφαρμογές. Τα εποξειδικά δεν χρησιμοποιούνται ως εξωτερική στρώση ενός σκάφους γιατί επηρεάζονται από τις UV ακτίνες. Συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την επισκευή και συναρμολόγηση σκαφών, και κατόπιν επικαλύπτονται από ένα πολυουρεθανικό χρώμα ή βερνίκι θαλάσσης που παρέχουν UV προστασία[9].

#### Αεροδιαστημικές εφαρμογές



Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, οι εποξειδικές ρητίνες εφαρμόζονται ως το υλικό της δομικής μήτρας το οποίο μετά ενισχύεται με ίνες, όπως υάλου, άνθρακος, Kevlar και βορίου. Επίσης χρησιμοποιούνται ως δομική κόλλα[9].

#### 1.2.3.1.2 Μεθυλακρυλικές ρητίνες

#### **1.2.3.2 Θερμοπλαστικές μήτρες**

Ο όρος θερμοπλαστικά καλύπτει τα πολυμερή υλικά τα οποία υπό την επίδραση θερμότητας και πίεσης καθίστανται εύπλαστα και ρέουν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα περισσότερα θερμοπλαστικά μπορούν να μορφοποιηθούν πολλές φορές (ανακύκλωση), αν και η εμφάνιση φαινομένων αποπολυμερισμού μειώνει σε πολλές περιπτώσεις το δυνατό αριθμό των κύκλων μορφοποίησης. Από άποψη δομής, θερμοπλαστικές ιδιότητες παρουσιάζουν τα γραμμικά ή διακλαδωμένα πολυμερή, στα οποία μία αύξηση της θερμοκρασίας ή η επίδραση ενός διαλύτη επιτρέπει μια σημαντική αναβάθμιση της κινητικότητας των μακρομορίων, ώστε να επιτρέπεται τελικά μια πλήρης ανεξαρτησία κινήσεως του ενός σε σχέση με το άλλο. Με άλλα λόγια, ανάμεσα στα μακρομόρια των θερμοπλαστικών πολυμερών δεν υπάρχουν χημικοί δεσμοί και οι θερμικές κινήσεις τους είναι αρκετές ώστε να παρουσιάζονται ως τήγματα σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, λοιπόν, γίνονται οι διεργασίες μορφοποίησής τους σε χρήσιμα προϊόντα. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, στην κατάσταση τήγματος, γίνεται και η παρασκευή των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούν τα θερμοπλαστικά πολυμερή ως μήτρα. Τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής πολυμερικής μήτρας παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα έχουν μεγάλες ενέργειες θραύσης, γιατί έχουν διαθέσιμο ελεύθερο όγκο που απορροφά την ενέργεια που συνδέεται με μετάδοση ρωγμής. Γενικά τα υλικά αυτής της κατηγορίας οφείλουν την αντοχή και την ακαμψία τους στις ιδιότητες των μονομερών, από τα οποία παρασκευάστηκαν, και στο μεγάλο μοριακό βάρος τους, και όχι στη δημιουργία ενός πλέγματος (cross-linking).

Όλα τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες. Από πλευράς όμως βιομηχανικής παραγωγής χρησιμοποιούνται ορισμένα πολυμερή τα οποία επιδέχονται ενίσχυση και παρουσιάζουν δυνατότητες εφαρμογής ως κατασκευαστικά υλικά.



Ανάμεσα στα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούση (High Impact Polystyrene – HIPS), το πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο) (PMMA), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE) κ.α.

Όσον αφορά τις εφαρμογές τους ως δομικά υλικά, τα θερμοπλαστικά πολυμερή συγκεντρώνουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η δυνατότητα ανακύκλωσης, και οι ευκολότερες διεργασίες μορφοποίησής τους. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται οι περιορισμοί στις μεθόδους παραγωγής, το υψηλό ιξώδες του τήγματος στις διεργασίες μορφοποίησης, οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται, ο ερπυσμός που μπορεί να παρουσιάσουν κ.α[3].

#### 1.2.3.2.1 Πολυαιθυλένιο

Το πολυαιθυλένιο είναι σήμερα το πολυμερές με την ευρύτερη εφαρμογή στην παγκόσμια αγορά. Είναι εμπορικά διαθέσιμο σε μεγάλο αριθμό τύπων και ποιοτήτων, σε τρόπο που να καλύπτονται οι απαιτήσεις ενός ευρύτατου φάσματος εφαρμογών [2].

Κατά τη προδιαγραφή ASTM D 1248 οι βασικοί τύποι πολυαιθυλενίου (PE) είναι:

Τύπος 1: PE χαμηλής πυκνότητας (low density polyethylene LDPE) ή διακλαδωμένο PE. Πυκνότητα από 0.91 έως 0.925 g/cm<sup>3</sup>.

Τύπος 2: PE μέσης πυκνότητας (medium density polyethylene, MDPE). Πυκνότητα από 0.926 έως 0.94 g/cm<sup>3</sup>.

Τύπος 3: PE υψηλής πυκνότητας (high density polyethylene, HDPE) ή γραμμικό.

Πυκνότητα από 0.941 έως 0.96 g/cm<sup>3</sup>.

Οι παραπάνω τύποι αναφέρονται σε πολυμερές συνήθους μοριακού βάρους (M<sub>w</sub>: 100000 - 300000). Οι διαφορετικές πυκνότητες των παραπάνω τύπων πολυαιθυλενίου αντανακλούν τις διαφορετικές τους κρυσταλλικότητες [3].

Το HDPE έχει τον υψηλότερο βαθμό κρυστάλλωσης ενώ το LDPE τον χαμηλότερο. Οι διαφορετικοί βαθμοί κρυστάλλωσης προέρχονται από τις διαφορές στη μοριακή δομή των τριών τύπων. Το LDPE έχει πολλούς μακρούς κλάδους στη μοριακή αλυσίδα. Έτσι δύσκολα μπορεί αυτή η αλυσίδα να διπλώσει και να δημιουργήσει κρυστάλλους κατά την ψύξη από το τήγμα. Το HDPE δεν έχει μακρούς κλάδους στην αλυσίδα και έτσι κρυσταλλώνεται πιο εύκολα. Το πολυαιθυλένιο μεσαίας πυκνότητας έχει συνήθως μόνο κοντούς κλάδους (μήκους 3 -6 ατόμων άνθρακα) και ενδιάμεση κρυσταλλικότητα. Το τελευταίο λέγεται



συνήθως και LLDPE (Linear Low Density Polyethylene). Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE).

#### 1.2.3.2.2 Βιομηχανική παραγωγή

Το PE παράγεται με πολυμερισμό του αιθυλενίου. Ο πολυμερισμός ακολουθεί τόσο το μηχανισμό ελευθέρων ριζών, όσο και ετερογενούς κατάλυσης. Από πλευράς τεχνικής εφαρμόζονται τόσο πολυμερισμοί μάζας όσο και διαλύματος και γαλακτώματος. Η πυκνότητα του PE είναι βασικά συνάρτηση της μεθόδου παραγωγής. Οι συνηθισμένες μέθοδοι παραγωγής μπορούν να διαχωριστούν σε:

##### 1. Υψηλής πίεσης

Πολυμερισμός μάζας

Πολυμερισμός γαλακτώματος

##### 2. Χαμηλής πίεσης

Μέθοδος Ziegler

Μέθοδος Phillips

Μέθοδος Standard Oil

Οι μέθοδοι υψηλής πίεσης ακολουθούν μηχανισμό ελεύθερων ριζών και δίνουν PE χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Οι μέθοδοι χαμηλής πίεσης ακολουθούν μηχανισμούς ετερογενούς κατάλυσης και δίνουν PE υψηλής πυκνότητας (HDPE). Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνικές πολυμερισμού που χρησιμοποιούν στερεοειδικούς οργανομεταλλικούς καταλύτες και παράγουν πολυαιθυλένια με ελεγχόμενη μοριακή δομή και διακλαδώσεις

#### 1.2.3.2.3 Χαρακτηριστικά και εφαρμογές

Το PE άρχισε να εφαρμόζεται σαν ειδικό διηλεκτρικό υλικό με ιδιαίτερη αξία σαν μονωτικό υλικό για υψηλές συχνότητες. Με την αυξανόμενη διαθεσιμότητα του πολυμερούς



επεκτάθηκε η εφαρμογή του σε χημικές εγκαταστάσεις και σωλήνες ύδρευσης.

Τα χαρακτηριστικά του PE που το οδήγησαν σε εκτεταμένες εφαρμογές μπορούν να συνοψιστούν στα εξής [3]:

- Εύκολη επεξεργασία
- Άριστες ηλεκτρικές ιδιότητες
- Άριστη χημική αντοχή
- Ευκαμψία σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Απουσία οσμής και τοξικότητας
- Ικανοποιητικά χαμηλή διαπερατότητα υδρατμών

Τα χαρακτηριστικά που περιορίζουν την εφαρμογή του PE είναι:

- Χαμηλό σημείο μαλάκυνσης
- Η ευπάθεια των τύπων χαμηλού μοριακού βάρους σε ρηγμάτωση, υπό μηχανική καταπόνηση
- Η ευπάθεια στην οξείδωση
- Η αδιαφάνεια του υλικού σε μεγάλο πάχος
- Η κακή αντοχή σε τριβή
- Η χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- Η υψηλή διαπερατότητα αερίων

Σε πολλές περιπτώσεις αυτοί οι περιορισμοί δεν είναι σοβαροί, ενώ σε άλλες η ορθή επιλογή του πολυμερούς, των προσθέτων και των συνθηκών επεξεργασίας μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Ο ευρύτερος τομέας κατανάλωσης του PE είναι η παραγωγή λεπτών φύλλων. Ανεπτυγμένος είναι επίσης ο τομέας παραγωγή αντικειμένων σε μόνωση με έγχυση για είδη οικιακής χρήσης, παιχνίδια και εξαρτήματα ηλεκτρικών και χημικών εγκαταστάσεων. Σημαντική ακόμα είναι η συμμετοχή του PE στον τομέα της συσκευασίας υγρών. Επίσης εφαρμόζεται ως ηλεκτρικός μονωτής στις επικαλύψεις συρμάτων και καλωδίων.

Παρ' ότι το πολυαιθυλένιο είναι ακατάλληλο για μεταφορά θερμού νερού, οι σωλήνες από PE έχουν βρει σημαντικές εφαρμογές. Η αντοχή του σε διάρρηξη από παγωμένο νερό και η ασφάλεια που παρέχει από πλευράς υγιεινής οδήγησαν το PE σε ευρεία εφαρμογή σε σωλήνες ψυχρού νερού και στην άρδευση. Τα πολυαιθυλένια χρησιμοποιούνται συχνά σε μορφή φύλλων. Τα πολυμερικά φύλλα παρασκευάζονται από θερμοπλαστικά





πολυμερή (π.χ. πολυαιθυλένιο χαμηλής, μέσης και υψηλής πυκνότητας). Μερικές σημαντικές εφαρμογές είναι στη βιομηχανία τυποποίησης, και προϊόντα όπως σακούλες σκουπιδιών, σακούλες μεταφοράς, λεπτά φύλλα για τυποποίηση, φιλμ συσκευασίας (θερμοσυρρικνούμενο ή όχι), για κάλυψη θερμοκηπίων, φύλλα για απολύμανση εδάφους, για κάλυψη λιμνοδεξαμενών, κ.α.

#### 1.2.3.2.4 Η ανακύκλωση του πολυαιθυλενίου

Το πολυαιθυλένιο, ως θερμοπλαστικό μπορεί να ανακυκλωθεί από τα απορρίμματα μετά τη χρήση με δευτερογενή ανακύκλωση: τα πλαστικά απορρίμματα πλένονται για να απομακρυνθούν οι ρύποι/ακαθαρσίες που πιθανόν να περιέχουν, κονιορτοποιούνται, λιώνονται και ανα-μορφοποιούνται σε νέα πλαστικά προϊόντα[11-21].

### 1.3 Διέλαση πολυαιθυλενίου

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει έναν συνεχώς περιστρεφόμενο κοχλία μέσα στο σώμα ενός extruder. Ο ρυθμός παραγωγής της ράβδου από τήγμα πολυμερούς συγχρονίζεται με τον υπόλοιπο κύκλο μόρφωσης με τη βοήθεια ενός συστήματος ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής. Στην περίπτωση αυτή, η διόγκωση και η ψύξη γίνονται σε ξεχωριστό τμήμα ώστε να μην εμποδίζεται η συνεχής εκβολή του πολυμερούς.

Η διέλαση μέσω συνεχούς εκβολής πολυαιθυλενίου εξασφαλίζει μεγαλύτερη ομοιομορφία στο τήγμα από πλευράς κατανομής θερμοκρασιών. Οι χρόνοι στασιμότητας ελαττώνονται και έτσι είναι μειωμένος ο κίνδυνος θερμικής αποσύνθεσης του τήγματος, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία όταν μορφώνονται ευαίσθητα υλικά.

#### 1.3.1 Εξοπλισμός Διέλασης

##### **Μονοκόχλιος Extruder**

Ο μονοκόχλιος extruder αποτελεί μια διάταξη τήξης, ανάμειξης και προώθησης του πολυμερούς μέσω μιας μήτρας μορφοποίησης, χρησιμοποιώντας έναν περιστρεφόμενο κοχλία μέσα σε έναν κύλινδρο.



Τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν μια διάταξη extrusion είναι τα εξής:

**i. Σύστημα μετάδοσης κίνησης**

**ii. Κύριο σώμα**

**iii. Σύστημα μεταφοράς θερμότητας και ελέγχου της θερμοκρασίας**

**iv. Μήτρα εκβολής**

Σε μια συνήθη διέλαση το πολυμερές σε μορφή σκόνης ή κόκκων (pellets) αναμιγνύεται με τα απαραίτητα πρόσθετα και μέσω της χοάνης τροφοδοσίας προωθούνται στο κυλινδρικό σώμα του extruder.

Ο κοχλίας περιστρέφεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από ένα ηλεκτροκινητήρα και ένα κιβώτιο ταχυτήτων για τον έλεγχο των στροφών του κοχλίου. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης εξασφαλίζει τις απαιτήσεις της διάταξης σε μηχανική ενέργεια.

Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια μιας διάταξης extrusion αυξάνεται όταν:

**(1) αυξάνεται η ογκομετρική παροχή εξόδου**

**(2) αυξάνεται η διάμετρος του κυλινδρικού σώματος**

**(3) αυξάνεται το μήκος του κοχλίου και**

**(4) όταν απαιτείται υψηλή ογκομετρική παροχή εξόδου σε υψηλές θερμοκρασίες.**

Οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια επίσης εξαρτώνται από τον τύπο της πολυμερικής ρητίνης και το σχεδιασμό της μήτρας. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης, σύστημα ψύξης στην περιοχή της τροφοδοσίας και έναν αριθμό θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα με τους ρυθμιστές θερμοκρασίας οι οποίοι ενεργοποιούν τα θερμαντικά ή ψυκτικά στοιχεία ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό προφίλ στον extruder. Κατά την περιστροφή του ο κοχλίας δέχεται μια ώθηση από το πολυμερικό τήγμα προς το πίσω μέρος του εκβολέα. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τα έδρανα αντίθλιψης που λειτουργούν για την απόσβεση αυτής της δράσης. Το κύριο σώμα της διάταξης εκβολής αποτελείται από τον



κύλινδρο (barrel) και τον κοχλία (screw). Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και η εσωτερική επιφάνεια είναι ειδικά επεξεργασμένη για να έχει αντίσταση στην τριβή και στη διάβρωση. Η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος και τη δυναμικότητα ενός extruder. Με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα ο κοχλίας περιστρέφεται αξονικά μέσα στον κύλινδρο, προωθώντας το πολυμερές που τροφοδοτείται μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Κατά τη διαδρομή προς την έξοδο το προϊόν τήκεται, συμπιέζεται και εξέρχεται μέσω της μήτρας εκβολής.

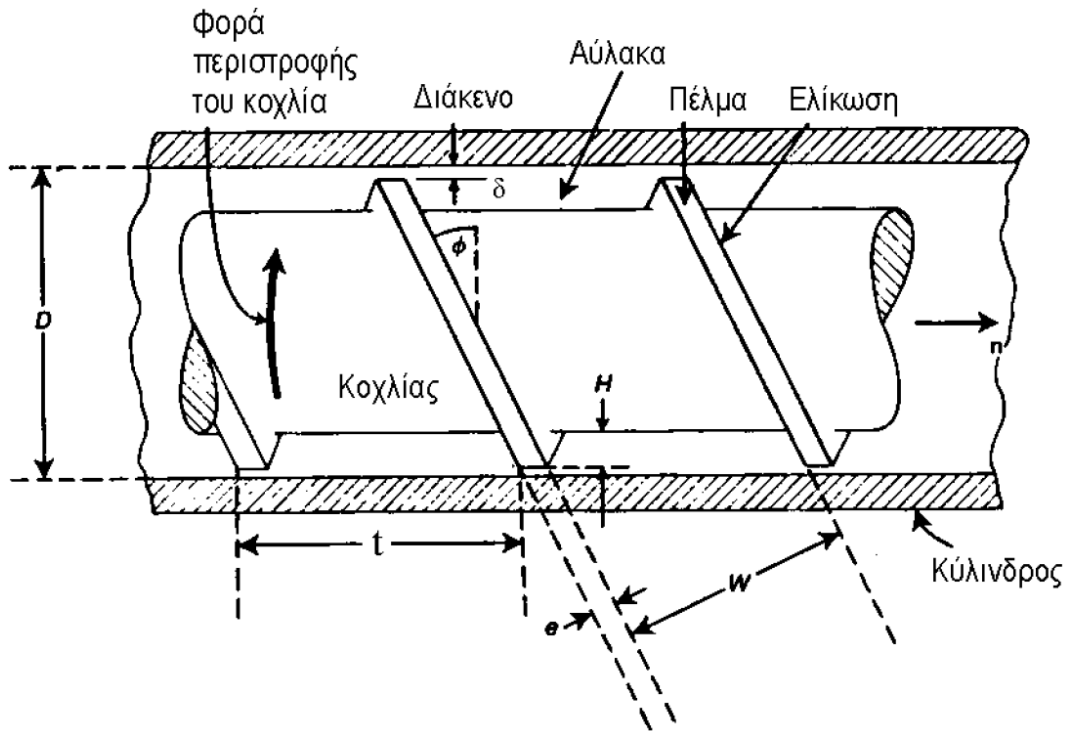
Η τήξη συντελείται από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

- μεταφορά θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία και
- από τη διάτμηση που προκαλεί η κίνηση του κοχλίας

Ο κοχλίας εκτελεί σημαντικές λειτουργίες όπως:

- **Μεταφορά της ρητίνης μέσα στον extruder**
- **Μετάδοση της μηχανικής ενέργειας η οποία αποτελεί μέρος της διαδικασίας τήξης**
- **Ανάμιξη των διαφορετικών πρώτων υλών**
- **Ανάπτυξη πίεσης στον extruder ούτως ώστε η ρητίνη να εξωθηθεί στη μήτρα.**

Μια σημαντική παράμετρος η οποία συνδέεται με τον κοχλία είναι ο αδιάστατος λόγος L/D, όπου L το μήκος του κοχλίας και D η διάμετρός του. Για τα θερμοπλαστικά ο λόγος L/D κυμαίνεται συνήθως από 16:1 μέχρι 32:1, ενώ για τα ελαστομερή είναι πολύ μικρότερος και κυμαίνεται μεταξύ 4:1 μέχρι 7:1. Η διάμετρος του κοχλίας ποικίλει, με τιμές κάτω των 20mm για τους εργαστηριακούς extruders, ενώ στους βιομηχανικούς η διάμετρος φθάνει τα 750mm. Γενικά, όσο αυξάνει το μήκος του κοχλίας τόσο αυξάνει και η απόδοση της εγκατάστασης ανά μονάδα καταναλισκόμενης ισχύος, καθώς και η ομοιομορφία του τήγματος και η ακρίβεια των διαστάσεων του εξερχόμενου προϊόντος.



Σχήμα 1.5 Λεπτομέρειες στη γεωμετρία του κοχλίας

Η διάμετρος του κυλίνδρου  $D_b$  είναι σταθερή σε όλο το μήκος του extruder. Η γωνία που σχηματίζει η έλικα με έναν άξονα κάθετο προς τον κοχλία ονομάζεται γωνία ελίκωσης ( $\phi$ ). Το διάστημα που προχωρεί η ελίκωση σε μια πλήρη περιστροφή ονομάζεται βήμα ( $t$ ). Σε πολλούς κοχλίες σε μια πλήρη στροφή η ελίκωση προχωρεί κατά μήκος ίσο προς τη διάμετρο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε κοχλίας τετράγωνου βήματος (squared pitched screw) και αντιστοιχεί σε γωνία ελίκωσης  $\phi=17.65^\circ$ . Το πέλμα της ελίκωσης είναι η επιφάνειά της που είναι στραμμένη προς το σώμα του κυλίνδρου του extruder. Το πλάτος του πέλματος και το διάκενο μεταξύ πέλματος σώματος του κυλίνδρου, συμβολίζονται με  $e$  και  $\delta$  αντίστοιχα.

Για τη διάμετρο του κοχλίας ισχύει:  $D_s = D_b - 2\delta$

Το διάκενο ( $\delta$ ) είναι τόσο μικρό ώστε η διάμετρος του κυλίνδρου ( $D_b$ ) και η διάμετρος του κοχλίας ( $D_s$ ) μπορεί να θεωρηθεί ότι στις περισσότερες εφαρμογές ταυτίζονται:

$D_b = D_s = D$ .



Το διάκενο που υπάρχει μεταξύ των σπειρών της ελίκωσης ονομάζεται αύλακα. Το πλάτος της αύλακας παρίσταται με  $W$  και το βάθος με  $H$ . Στον κοχλία διακρίνουμε τρεις ζώνες: τη ζώνη τροφοδοσίας (feedsection), τη ζώνη συμπίεσης ή τήξης (compressionsection) και ζώνη δοσιμετρίας (meteringsection).

#### **Ζώνη τροφοδοσίας:**

Η λειτουργία της ζώνης αυτής έχει ως σκοπό την προθέρμανση του πολυμερούς και τη μεταφορά του στην επόμενη ζώνη. Η ζώνη τροφοδοσίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και σχετικά μεγάλο βάθος αύλακας. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε το υλικό να μην υπερθερμανθεί πολύ γρήγορα γιατί στην περίπτωση αυτή η ρητίνη θα κολλήσει στον κοχλία και απλώς θα περιστρέφεται χωρίς να μεταφέρεται στην επόμενη ζώνη.

Η ζώνη τροφοδοσίας σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς στα επόμενα τμήματα του κοχλία ώστε να μην παρουσιασθεί έλλειψη υλικού.

#### **Ζώνη συμπίεσης ή τήξης:**

Κατά μήκος της ζώνης αυτής το βάθος της αύλακας του κοχλία μειώνεται βαθμιαία, με αποτέλεσμα το τήγμα να συμπιέζεται και να εξαναγκάζεται ο εγκλωβισμένος από το πλαστικό αέρας καθώς και άλλες πτητικές ουσίες, να εξέλθουν από το πολυμερές.

#### **Ζώνη δοσιμετρίας:**

Στη ζώνη αυτή ο κοχλίας χαρακτηρίζεται από σταθερό και πολύ μικρό βάθος αύλακας. Το μικρό βάθος της αύλακας επιφέρει την ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στη ρητίνη με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της τήξης του πολυμερούς. Η ανάπτυξη υψηλών διατμητικών τάσεων στη ζώνη αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη πίεσης στο πολυμερικό τήγμα, ούτως ώστε να εξωθηθεί προς την έξοδο του extruder. Το τήγμα ομογενοποιείται και με ομοιόμορφη σύσταση, θερμοκρασία και πίεση οδηγείται με σταθερή παροχή στη μήτρα διελασης.

Η συμπίεση του πολυμερούς οφείλεται στην προοδευτική μείωση στο βάθος της αύλακας του κοχλία κατά μήκος του extruder. Μια σημαντική παράμετρος ενός extruder είναι ο λόγος συμπίεσης (compressionratio), που ορίζεται ως ο λόγος του βάθους της αύλακας στη ζώνη τροφοδοσίας προς το βάθος της αύλακας στη ζώνη δοσιμετρίας.



Μετά τον κοχλία το τήγμα οδηγείται σε μια πλάκα όπου είναι στερεωμένα μεταλλικά πλέγματα, τα οποία χρησιμεύουν ως φίλτρα για την κατακράτηση ακαθαρσιών και άλλων ξένων σωμάτων που τυχόν εμπεριέχονται στο πολυμερές.

Οι βασικές λειτουργίες που συμβαίνουν κατά τη διεργασία της διέλασης είναι οι εξής:

- **Μεταφορά των στερεών σωματιδίων**
- **Πλαστικοποίηση ή τήξη**
- **Μεταφορά του τήγματος**
- **Απαερίωση**
- **Ανάμειξη και Μορφοποίηση**

#### **1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοσκληρυνόμενης και θερμοπλαστικής μήτρας**

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και συνεχείς ίνες έχουν σήμερα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές ως μήτρα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο λόγος είναι ότι τα (ρευστά) συστατικά της μήτρας έχουν χαμηλό ιξώδες πριν τον σχηματισμό του δικτυώματος (πολυμερισμό) και μπορούν έτσι να διαβρέξουν εύκολα τις ενισχυτικές ίνες. Το βασικό τους μειονέκτημα, όμως, είναι ότι ο πολυμερισμός τους, και το υλικό, γίνεται με τη μορφοποίηση του τελικού προϊόντος. Αυτό επιβάλλει αρκετούς περιορισμούς στη μορφή και πολυπλοκότητα του προϊόντος και στη μέθοδο παρασκευής. Επίσης η ανακύκλωση του υλικού είναι πολύ δύσκολη[2]. Τα σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα και κοντές ίνες γυαλιού είναι ευρέως διαδεδομένα, γνωστά και ως glass fibre reinforced plastics (πλαστικά ενισχυμένα με υαλόνημα — GFRP). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι ίδιες διεργασίες που χρησιμοποιούνται και για τη μορφοποίηση των απλών θερμοπλαστικών (εκβολή, χύτευση με έγχυση, πρέσα κ.λπ.). Τα υλικά αυτά είναι ανακυκλώσιμα, καθώς, μετά τη χρήσιμη ζωή των αντικειμένων, το υλικό μπορεί να ξανατηχθεί και να ξαναμορφοποιηθεί[10]. Το κύριο μειονέκτημα των θερμοπλαστικών πολυμερών ως μήτρα είναι το υψηλό τους ιξώδες. Αυτό δυσκολεύει τον εμποτισμό των δεσμίδων των ινών. Για τον εμποτισμό πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η διαδρομή της ροής για το τήγμα του



πολυμερούς με το να έρθουν τα συστατικά πολύ κοντά μεταξύ τους πριν την τήξη, π.χ. με το στοίβαγμα εναλλασσομένων στρωμάτων φύλλου πολυμερούς και ινών, με την χρήση σκόνης (αλεσμένου) πολυμερούς, ή με την ανάμιξη των ινών του ενισχυτικού υλικού με ίνες του πολυμερούς. Σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες και θερμοπλαστική μήτρα χρησιμοποιούνται λιγότερο από αυτά με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα.

## **2 Μέσα ενίσχυσης**

Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά σε διάφορες μορφές που ενσωματώνονται στη μάζα του πολυμερούς προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να βρίσκονται σε μορφή κόκκων, νιφάδων, ασυνεχών ινών, συνεχών ινών και κυψελωδών φύλλων κ.α.

Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν:

### **2.1 Κοκκώδη σύνθετα υλικά**

Αυτά τα υλικά αποτελούνται από τεμαχίδια ενός ή και πολλών υλικών που βρίσκονται διάχυτα σε μια μήτρα διαφορετικού υλικού. Τα σωματίδια αυτά έχουν ασυνεχή μορφή και μικρές διαστάσεις. Μπορεί να είναι μεταλλικά ή αμέταλλα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων υλικών είναι το σκυρόδεμα ( αμέταλλα σωματίδια σε αμέταλλο υλικό), τα καύσιμα των πυραύλων που αποτελούνται από σκόνη αλουμινίου και άλλες οξειδωτικές ουσίες μέσα σε εύκαμπτη οργανική μήτρα, χρώματα και κόλλες με αιωρήματα μετάλλων, κράματα μετάλλων και τέλος η περίπτωση αμέταλλων σωματιδίων όπως κεραμικά υλικά σε μεταλλικές μήτρες, που κυρίως προορίζονται για κατασκευή εργαλείων.

### **2.2 Πολυστρωματικά σύνθετα υλικά**

Τα πολυστρωματικά υλικά αποτελούνται από στρώματα δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών σε επαφή και συνεργάζονται μεταξύ τους. Είναι διφασικά υλικά και αποτελούνται από δύο συνεχείς φάσεις, μια του πολυμερούς και μια του μέσου ενίσχυσης, που εναλλάσσονται κανονικά, η μία επί της άλλης, στη κατά το ύψος οργάνωση του υλικού. Οι ιδιότητες που βελτιώνονται μέσω ενός πολυστρώματος είναι η αντοχή στη θραύση, η ακαμψία, οι ειδικές ιδιότητες, η αντοχή στη διάβρωση, η αντοχή στην τριβή, η αντοχή σε



εφελκυσμό κ.α. Βέβαια, οι ιδιότητες κάθε κατασκευής επηρεάζονται από τις ιδιότητες των υλικών που την αποτελούν.

## 2.3 Ινώδη σύνθετα υλικά

Από τις διάφορες μορφές ενίσχυσης, αυτή της ίνας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αύξηση των μηχανικών αντοχών. Έτσι εξηγείται και η μεγάλη προτίμηση προς τα ινώδη μέσα ενίσχυσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν, σε αυτή την κατεύθυνση οι αποκαλούμενες ίνες υψηλής τεχνολογίας, οι οποίες διαθέτουν πολύ υψηλή αντοχή και πολύ υψηλή ακαμψία σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα.

Μία διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως [28]:

- Συνεχείς μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers). Όταν  $l/d \geq 100$ .
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers). Όταν  $l/d < 100$
- Νημάτια ή τριχίτες (whiskers). Με  $d < 1 \mu\text{m}$  και  $l$  περίπου ίσο με  $100 \mu\text{m}$  (λεπτοί μονοκρυσταλλοί κεραμικού υλικού).

Βάση του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών [3].

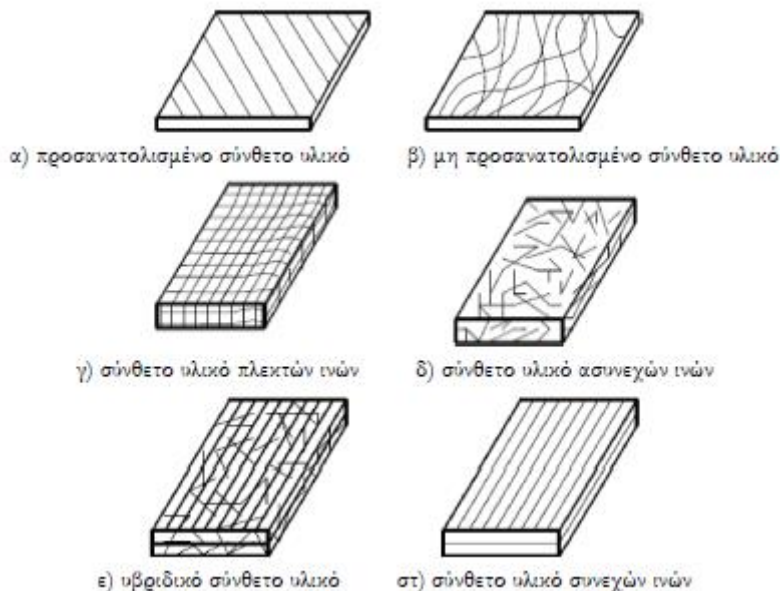
- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 1.3α).
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 1.3β).

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η ανάπτυξη της κατηγορίας των σύνθετων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος προέκυψε εξαιτίας της απλούστερης διαδικασίας κατασκευής τους. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης (ύφανση) και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες [2]:

- Υφασμένες ίνες (wovenmat), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δε παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 1.3γ). Η γωνία ανάμεσα στις δύο κυρίαρχες κατευθύνσεις των νημάτων είναι  $90^\circ$ .



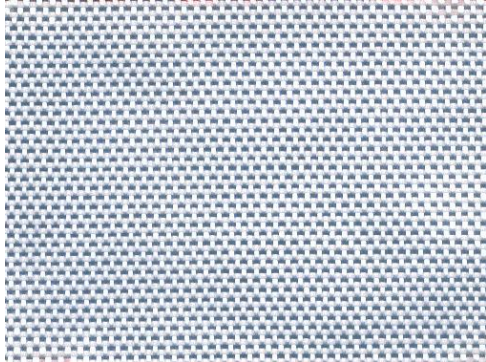
- Συνεχείς ίνες πλεγμένες με διάφορους τρόπους που χρησιμοποιούνται και στην υφαντουργία. Ο προσανατολισμός του νήματος αλλάζει συνεχώς (knitted fabrics)
- Μη υφασμένα συνεχή νήματα χωρίς προσανατολισμό (non-woven mats)
- Στρώματα ασυνεχών ινών (chopped strand fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα σε συνδετικό υλικό και μη προσανατολισμένες (Σχήμα 1.3δ). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 1.3ε) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητινης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 1.3στ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



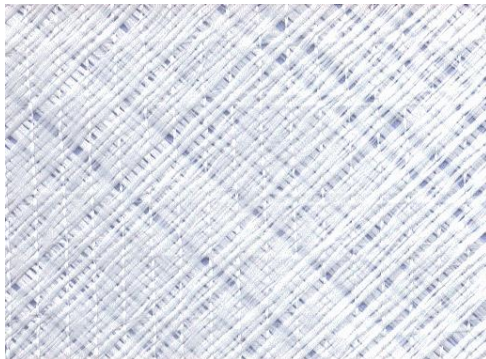
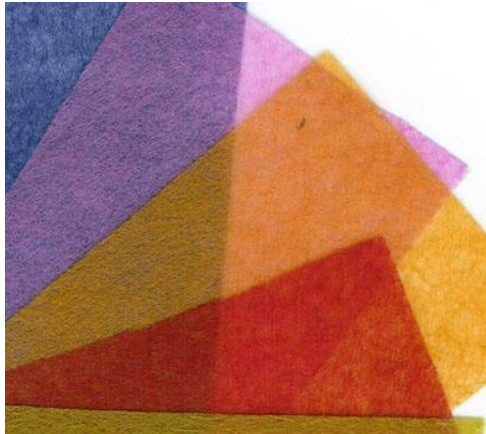
Σχήμα 2.1 Τύποι συνθέτων υλικών με ινώδη μέσα ενίσχυσης[29]



biaxialfiberglass



uniaxialfiberglass



nonwoven

Εικόνα 2.1 Είδη υαλοφασμάτων[30]



Μία κατηγοριοποίηση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφάσματος γίνεται αρχικά σε δισδιάστατα, 2D, και τρισδιάστατα, 3D, ανάλογα με το αν η υφασμένη δομή απουσία της μήτρας μπορεί να παραλάβει φορτία σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια τα 2D χωρίζονται ανάλογα με το πρότυπο της ύφανσης σε plain, satin, triaxial, ή uniweave, ενώ τα 3D ανάλογα με τη γωνία ενίσχυσης στην z-διεύθυνση[31]. Για την παραγωγή του υφάσματος, το πρώτο στάδιο είναι ο σχηματισμός των δεσμών ινών (yarns). Ακολούθως οι δεσμίδες ινών υφαινόνται ώστε να σχηματισθεί η δομή υφάσματος. Η ομάδα ινών κατά το μήκος της ύφανσης ονομάζεται στημόνι (warp) ενώ κατά το πλάτος ονομάζεται υφάδι (weft ή fill). Τελικά το σύνθετο μορφοποιείται μετά την εμφάνιση της ενίσχυσης στο μητρικό υλικό σε ειδικά καλούπια.

## **2.4 Νανοσύνθετα υλικά**

### **2.4.1 Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία**

Η νανοτεχνολογία αφορά τη μελέτη της ύλης σε ατομικό, μοριακό επίπεδο και υπερμοριακό επίπεδο. Ο συγκεκριμένος όρος εισήχθη για πρώτη φορά το 1974 από τον καθηγητή Norio Taniguchi [35] και αναφέρεται στο σχεδιασμό νέων υλικών, συσκευών και συστημάτων που δουλεύουν σε κλίμακα μεγέθους από 1 έως 100 nm. Στη νανοκλίμακα οι μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών διαφέρουν σημαντικά με τη συμπεριφορά των ίδιων υλικών στην μακροκλίμακα. Τα νανοσωματίδια εμφανίζουν μεγάλη επιφάνεια επαφής, πράγμα που επηρεάζει την κινητικότητα και τη συμπεριφορά τους. Επομένως, αφού καθίσταται δυνατή η αλλαγή σε θεμελιώδεις ιδιότητες των υλικών, χωρίς να τροποποιηθεί η χημική τους σύσταση, δημιουργείται η προοπτική για πάρα πολλές εφαρμογές. Τα υλικά που τουλάχιστον η μια διάστασή τους βρίσκεται στην νανοκλίμακα καλούνται νανοϋλικά και οι διάφορες δομές νανοδομές. Τα φουλερένια, δομές άνθρακα σε μορφή σφαίρας, καθώς και οι νανοσωλήνες άνθρακα, δομές άνθρακα σε μορφή σωλήνα, διαθέτουν ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα και αποτελούν σταθμούς στην εξέλιξη της νανοτεχνολογίας[36]. Στα νανοσύνθετα υλικά, το ένα τουλάχιστον υλικό πρέπει να βρίσκεται στη νανοκλίμακα. Ως μήτρα χρησιμοποιείται κάποιο πολυμερές, κεραμικό ή μεταλλικό υλικό, ενώ ως ενισχυτική φάση προστίθεται κάποιο έγκλεισμα μεγέθους τάξεως νανοκλίμακας (νανοέγκλεισμα).



Τα νανοσωματίδια παρασκευάζονται είτε σε μορφή κόκκου (μηδενικής διάστασης), είτε σε νανοσωλήνες (μιάς διάστασης), είτε λεπτά υμένια (thinfilms, δύο διαστάσεων), είτε συμπολυμερή και πολύστρωτες δομές, όπως τα πολυστρωματικά γραφένια (δύο ή τριών διαστάσεων). Τα νανოსύνθετα ξεχωρίζουν με τις εξαιρετικές ιδιότητες που προσφέρουν. Αυτή η υπεροχή αποδίδεται στα εγκλείσματα που προέρχονται από υλικά με αξιοσημείωτες ιδιότητες. Ωστόσο, οι ιδιότητες των νανοσυνθέτων δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των εγκλεισμάτων, αλλά και από τη μορφολογία και τη διεπιφάνεια εγκλείσματος – μήτρας. Η διεπιφάνεια στην περίπτωση των νανοσυνθέτων είναι ουσιαστικά άπειρη, καθώς η επιφάνεια επαφής των εγκλεισμάτων με τη μήτρα είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, στη νανοκλίμακα εμφανίζονται μοριακά, ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα.

Ακολουθούν ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των νανοσυνθέτων υλικών σε σχέση με των κοινών σύνθετων:

- ✓ Βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες
- ✓ Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά και αυτή των μετάλλων.
- ✓ Αν και γενικά άφλεκτα, στην περίπτωση που επέλθει καύση διαχέονται λιγότερο τοξικά αέρια και καπνοί προς το περιβάλλον.
- ✓ Θερμικώς σταθερά
- ✓ Χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα, οπότε προκύπτουν νανοσύνθετα με ειδικές ιδιότητες πολύ υψηλές.
- ✓ Υψηλή αντοχή σε έντονα τοξικό (χημικό) περιβάλλον

Από την τα νανοσύνθετα παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα έναντι των κοινών συνθέτων υλικών, τα οποία όμως δεν μπορούν να γενικευθούν σε όλες τις περιπτώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα, κυρίως στα νανοσύνθετα πολυμερικής μήτρας, είναι η οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στην παρασκευή τους. Η αιτία εντοπίζεται στο γεγονός πως τα νανοεγκλείσματα έχουν την τάση να έλκονται μεταξύ τους με δυνάμεις Vander Waals, δημιουργώντας συσσωματώματα. Συνεπώς για να εξασφαλιστούν οι βέλτιστες ιδιότητες του νανοσύνθετου υλικού, πρέπει να εξασφαλιστεί η ομογενής διασπορά των εγκλεισμάτων στη μήτρα. Για να συμβεί αυτό απαιτούνται χρονοβόρες διεργασίες, οι οποίες κοστίζουν και προϋποθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό [37, 38].



## 2.5 Διεπιφάνεια μήτρας - ενίσχυσης

Η ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων, στα ενισχυμένα πολυμερή, μέχρι των μεγίστων δυνατών τιμών, είναι δυνατή μόνο όταν εξασφαλίζεται η πλήρης συνεργασία των συστατικών τους[3].

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης συνεργασία μεταξύ της μήτρας και του μέσου ενίσχυσης είναι απαραίτητο να επιτυγχάνονται:

- Πλήρης επαφή
- Ανάπτυξη ισχυρού συγκολλητικού δεσμού

Η δυνατότητα για πλήρη επαφή ελέγχεται από την ικανότητα του τήγματος του πολυμερούς να διαβρέξει πλήρως την επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο υλικών. Μεταβολή της επιφανειακής τάσεως, ώστε να λάβει τιμές που να πληρούν τις απαιτήσεις για πλήρη διαβροχή, είναι δυνατή με τη χρήση ειδικών τασιενεργών (διαβρέκτες). Αυτά χρησιμοποιούνται στην επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης ή στη μάζα του τήγματος του πολυμερούς. Η μη πλήρης επαφή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα στη μάζα του υλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής. Η πλήρης διαβροχή επιτυγχάνεται όταν εξαφανισθούν οι φυσαλίδες, που οφείλονται στα σημεία μη επαφής των υλικών, και απαιτεί ένα χρονικό διάστημα για να συμπληρωθεί. Ο ρυθμός διαβροχής είναι συνάρτηση του ιξώδους του τήγματος, της επιφανειακής τάσης, της τυχόν επεξεργασίας και της μορφής της επιφάνειας του μέσου ενίσχυσης.

Η ισχύς του συγκολλητικού δεσμού, που είναι δυνατό να αναπτυχθεί ανάμεσα στη μήτρα και το μέσο ενίσχυσης, εξαρτάται βασικά από τη φύση του. Η ισχυροποίηση του συγκολλητικού δεσμού επιτυγχάνεται με:

- Αύξηση της επιφάνειας επαφής: Πρόκειται για μια επεξεργασία του μέσου ενίσχυσης που έχει ως αποτέλεσμα την τράχυνση της. Ανάλογα με το βαθμό τράχυνσης η αρχικά λεία επιφάνεια αποκτά ένα πολύ μεγαλύτερο ανάπτγμα.
- Τροποποίηση της επιφάνειας επαφής: Έχει ως σκοπό τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας που μπορεί να αναπτύξει έναν ισχυρότερο συγκολλητικό δεσμό με το πολυμερές.



Σε πολλά σύνθετα, το μέσο ενίσχυσης αποτελείται από ανεξάρτητα στρώματα από ίνες που ενώνονται μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να ελεγχθεί όχι μόνο η σύνδεση μεταξύ ίνας-μήτρας αλλά και η σύνδεση μεταξύ των ίδιων των στρωμάτων, μια και έλλειψη καλής σύνδεσης τους μπορεί να προκαλέσουν αστοχία. Για τη αποφυγή του φαινομένου μια λύση είναι η τριαξονική ύφανση που χρησιμοποιείται για να προσανατολίσει τις ίνες, η οποία ταυτόχρονα συγκρατεί τα διάφορα στρώματα των ινών.

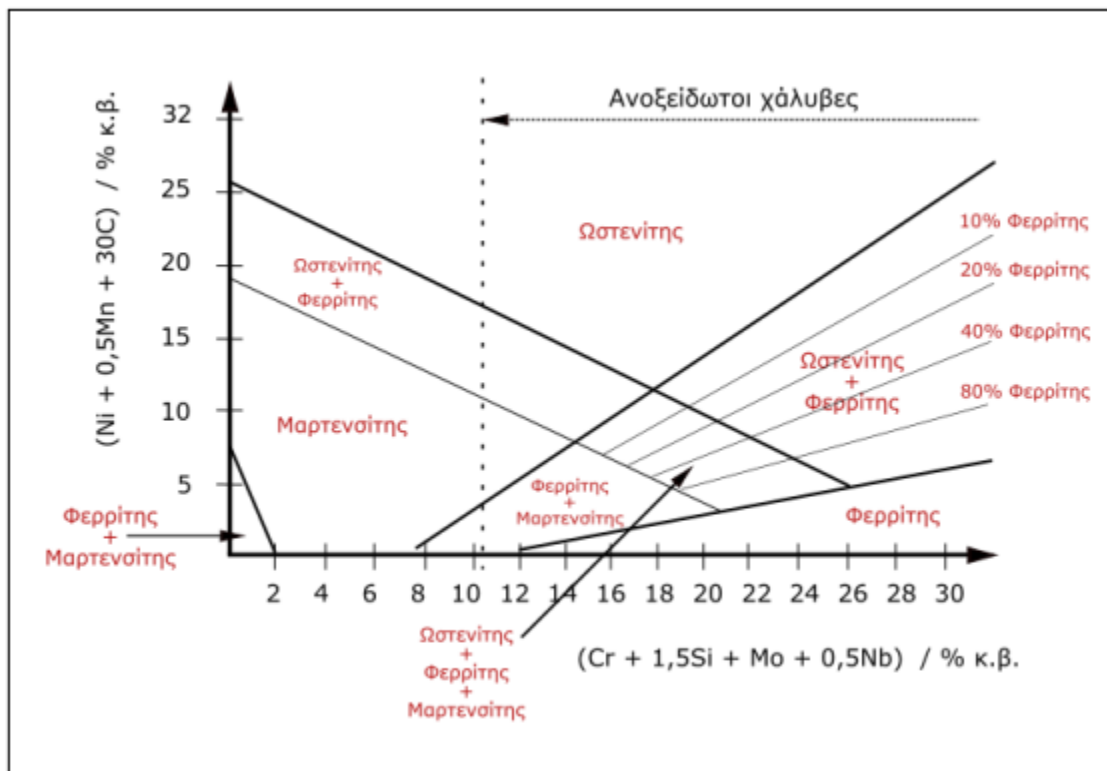
### 3 Χάλυβας

Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία τήξης του σιδήρου (1534 °C), μια σειρά από μηχανικές ιδιότητες, όπως μέτριο (200-300 MPa) όριο διαρροής, με εξαιρετική ολκιμότητα σε πέραν των 1400 MPa τάση διαρροής, με δυσθραυστότητα έως 100 MPa/m<sup>2</sup>, και συναφείς μικροδομές που παράγονται από μετασηματισμούς φάσης στερεάς κατάστασης με μεταβολή του ρυθμού ψύξης από την ωστενιτική κατάσταση.

Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις βαριές βιομηχανίες. Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα. Ανάλογα την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν σε μικρές ποσότητες κραματικά στοιχεία τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές και τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Το ποσοστό δηλαδή των στοιχείων αυτών είναι τέτοιο σε κάθε χάλυβα, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες για την αντίστοιχη εφαρμογή. [18] Με κριτήριο το κύριο συστατικό της φάσης της

Μικροδομής οι ανοξείδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε ωστενιτικούς, μαρτενσιτικούς και φερριτικούς (Σχ. 3.1) .[25,26]



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα Schaffler κατάταξης των ανοξείδωτων χάλυβων

### Ποιότητες του χάλυβα

Ο χάλυβας δεν είναι ένα μοναδικό προϊόν. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χάλυβων με πολύ διαφορετικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Περίπου τα τρία τέταρτα των ειδών των χάλυβων δημιουργήθηκαν μόλις τα τελευταία είκοσι χρόνια. Οι σύγχρονοι χάλυβες είναι πολύ πιο ανθεκτικοί σε σύγκριση με παλιότερες ποιότητες χάλυβων. Αν χτιζόταν σήμερα ο Πύργος του Άιφελ στο Παρίσι, θα χρειαζόταν το ένα τρίτο της ποσότητας χάλυβα. Ένα σύγχρονο αυτοκίνητο χρειάζεται 25% λιγότερο χάλυβα από ό,τι χρειαζόταν ένα αυτοκίνητο πριν από δυο με τρεις δεκαετίες.

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (αγγλ. grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση.



Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

1) Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (αγγλ. Carbon steels). Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:	2) Κραματωμένοι χάλυβες (αγγλ. Alloy steels), δηλ. κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα
Χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (αγγλ. Mild steels· $C < 0,30\%$ )	Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10 % κ.β., όπως π.χ. οι εργαλειοχάλυβες ( $0,7\% < C < 1,4\%$ , $Mn < 0,3\%$ ),
Χάλυβες μέτριου άνθρακα (αγγλ. Medium carbon steels· $0,30\% < C < 0,60\%$ )	Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης, όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες ( $Cr > 10,5\%$ ), οι ταχυχάλυβες ( $C \sim 0,7\%$ , $Cr \sim 4,0\%$ , $5,0\% < Mo < 10\%$ , $1,5\% < W < 18,0\%$ , $0\% < Co < 8,0\%$ ), κ.λπ.
Χάλυβες υψηλού άνθρακα (αγγλ. High carbon steels· $0,60\% < C < 1,00\%$ )	
Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (αγγλ. ultra-high carbon steels· $1,00\% < C < 2,00\%$ )[3]	

Πίνακας 1 Ταξινόμηση του χάλυβα βάση χημικής σύσταση

Ανάλογα με την περαιτέρω κατεργασία τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

<ul style="list-style-type: none"><li>• χάλυβες διαμόρφωσης, που υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση, κ.λπ.)</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• χυτοχάλυβες, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων («χελωνών») και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Τέλος, συχνά γίνεται λόγος για φερριτικούς, περλιτικούς, μαρτενσιτικούς, μπαινιτικούς κ.λπ. χάλυβες ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους</li></ul>

Πίνακας 2 Ταξινόμηση του χάλυβα βάση της περαιτέρω κατεργασίας του





Η ονοματολογία των χάλυβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ. Συχνά υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο όνομα μιας κατηγορίας χάλυβα και την αντοχή της συγκεκριμένης κατηγορίας χάλυβα σε εφελκυσμό. Για παράδειγμα, το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζει ότι ο χάλυβας Β500C πρέπει να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa (500 N/mm<sup>2</sup>).

### **3.1 Χαλυβουργικά προϊόντα**

Τα χαλυβουργεία παράγουν ημιτελή και τελικά προϊόντα χάλυβα. Τα ημιτελή προϊόντα χάλυβα είναι συνήθως δοκοί τετραγωνικής διατομής («μπιγιέτες») με ακμή περίπου 10 εκ. ή κυκλικής διατομής με διάμετρο περίπου 25 εκ. (κυλινδρικές «μπιγιέτες» ή «κορμοί») και μήκος μερικά μέτρα, ή ακόμα πλατιά πρίσματα (πλάκες ή «σλαμπ») διατομής 10 εκ. x 100 εκ. και με μήκος μερικών μέτρων. Η παραγωγή των ημιτελών προϊόντων γίνεται με συνεχή χύτευση σε μήτρες από χαλκό, που ψύχονται με νερό και με έλαση σε ειδικά έλαστρα. Τα ημιτελή προϊόντα αναθερμαίνονται και υποβάλλονται σε έλαση, διέλαση, ολκή κ.λπ. για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, που μπορεί να είναι πλατέα ή επιμήκη. Τόσο τα πλατέα προϊόντα όσο και τα επιμήκη παράγονται με θερμή ή ψυχρή έλαση. Η θερμή έλαση γίνεται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 925 °C, οπότε οι παραμορφωμένοι κόκκοι του μετάλλου ανακρυσταλλώνονται. Η ψυχρή έλαση ωστόσο επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων με διαστάσεις πολύ πλησιέστερες στις τελικές διαστάσεις που θέλει ο καταναλωτής. Τα πλατέα προϊόντα διακρίνονται σε πλάκες ή χονδρές κατασκευαστικές λαμαρίνες (αγγλ., plates), με πάχος 1 έως 20 εκ. για χρήση στην ναυπηγική, την οικοδομή, κ.ά., και σε λεπτές λαμαρίνες σε ρολά ή επίπεδα φύλλα (αγγλ. strips), με πάχος 0,1 έως 1 εκ. για την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία οικιακών συσκευών, την οικοδομή, κ.ά.

Τα επιμήκη προϊόντα μπορεί να είναι ράβδοι ή χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος (μπετόβεργα· αγγλ., reinforcing bars), ελάσματα ή λάμες (τσέρκι· αγγλ. Narrow strips), μορφοσίδηρος (χάλυβας διαμορφωμένης διατομής, όπως γωνίες, ταυ, κ.λπ.· αγγλ. profiles), κοίλες δοκοί (αγγλ. Hollow sections), σωλήνες με ή χωρίς ραφή (αγγλ. Welded or seamless tubes), κ.ά. Στα επιμήκη προϊόντα συμπεριλαμβάνεται και το σύρμα (αγγλ. wire). Εκτός από τα πλατέα και τα επιμήκη προϊόντα, ο χάλυβας διατίθεται ακόμα στην μορφή χυτής χελώνας (χυτοχάλυβας). Πολλές χαλυβουργίες διαθέτουν φύλλα ή ρολούς επιψευδαργυρωμένου (γαλβανισμένου), επικασιτερωμένου και επιχρωματισμένου χάλυβα.



### 3.2 Χάλυβες σπλισμού σκυροδέματος

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τον σπλισμό σκυροδέματος σε οικοδομικά έργα είναι πολλών ειδών. Συνήθως διακρίνονται ως εξής:

Α) Σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής, σε

- Θερμής έλασης, χωρίς καμία άλλη περαιτέρω θερμική ή θερμομηχανική κατεργασία οποιασδήποτε μορφής (χάλυβες ΘΕ-Χ)
- Θερμής έλασης, που ακολουθείται από μία άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας (χάλυβες ΘΕ-Θ)
- Ψυχρής κατεργασίας, με ολκή ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Ο) ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Σ) ή με συνδυασμό των παραπάνω.

Β) Σύμφωνα με τη μορφή της επιφάνειας της ράβδου σε

- Λείους χάλυβες κυκλικής διατομής
- Χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις, υψηλής συνάφειας
- Χάλυβες με κοιλότητες (έγγλυφες αυλακώσεις).

Γ) Σύμφωνα με την ολκιμότητα, σε

- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας
- Χάλυβες μέσης ολκιμότητας
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας

Δ) Σύμφωνα με τη συγκολλησιμότητα, σε

- Χάλυβες συγκολλησίμους
- Χάλυβες μη συγκολλησίμους ή συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις.

Ε) Σύμφωνα με την αντοχή τους σε διάβρωση σε:

- Κοινούς χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα (Fe-C) και με άλλα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες



- Ανοξειδωτους χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 12%. Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση. Η αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδένιο (Mo), τιτάνιο (Ti) κ.λπ.

### 3.3 Χάλυβας 316-L

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στον ανοξειδωτο χάλυβα 316-L καθώς είναι το υλικό των φολίδων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Ο χάλυβας 316 είναι ωστενιτικός χάλυβας. Κύριο κραματικό του στοιχείο αποτελεί το μολυβδαίνιο το οποίο προσδίδει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και κυρίως μεγάλη αντοχή σε χλωριούχο περιβάλλον. Η ωστενιτική δομή προσδίδει άριστη σκληρότητα ακόμα και σε κρουγενείς θερμοκρασίες. Εν συγκρίσει με τους χρωμιούχους ή τους νικελιούχους ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες ο χάλυβας 316-L εμφανίζει εντονότερο/υψηλότερο ερπυσμό, υψηλότερο όριο διαρροής και αντοχή σε εφελκυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες.[26,27] Ο χάλυβας 316-L αποτελεί μια εκδοχή του χάλυβα 316 με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και είναι απρόσβλητος από την ευαισθητοποίηση (καθίζηση του καρβιδίου στα όρια των κόκκων) , ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε βαρέως τύπου συγκολλήσεις μεταλλικών μερών (πάχος άνω των 6mm). Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται η σύσταση του χάλυβα 316-L και οι κύριες φυσικοχημικές και μηχανικές του ιδιότητες.

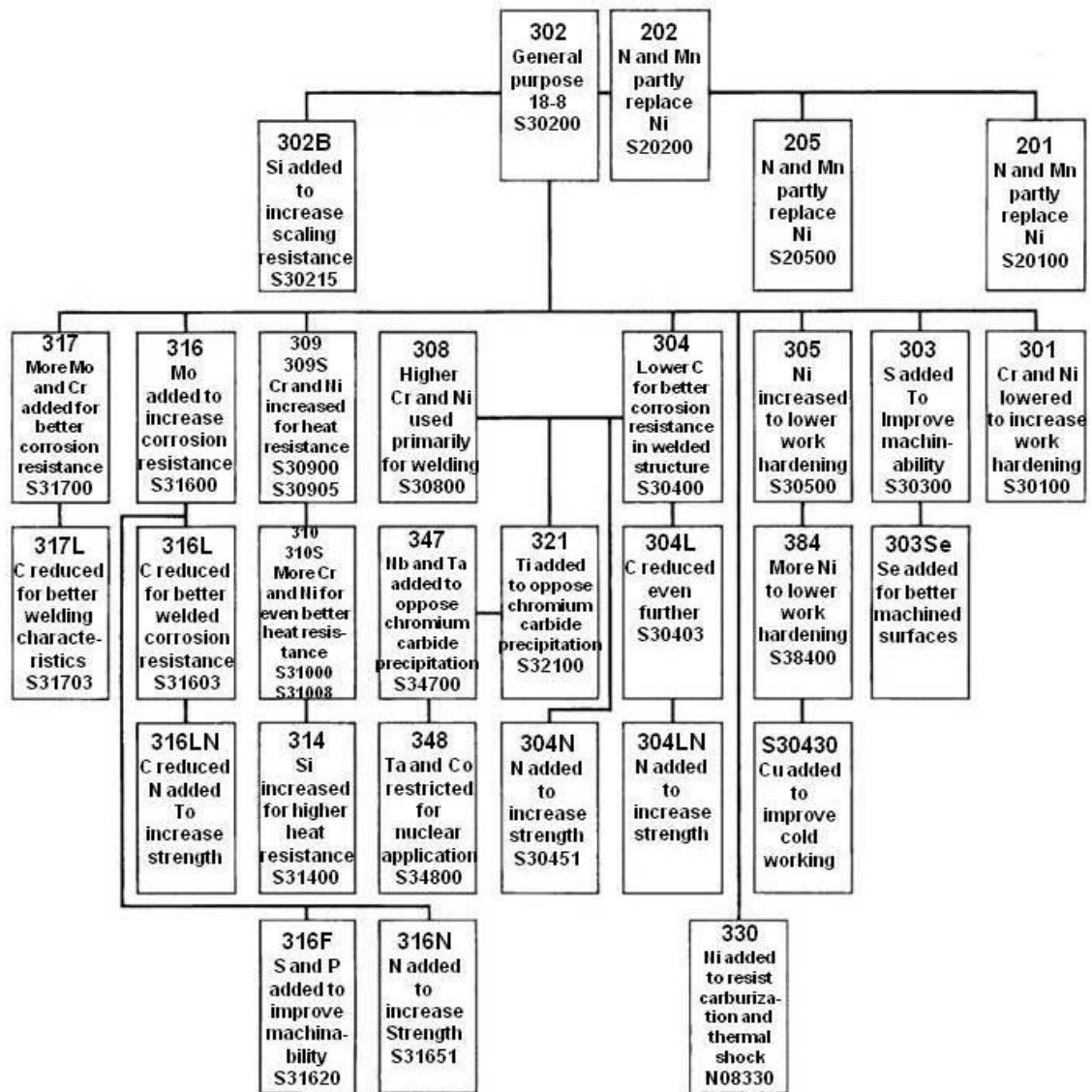


<b>Ιδιότητα</b>	<b>Τιμή</b>
Πυκνότητα	: 8.027 gr/cm <sup>3</sup>
Ηλεκτρική Αντίσταση (20°C)	: 74 microhm-cm
Θερμική αγωγιμότητα (100°C)	: 16.2 W/m•K
Θερμική αγωγιμότητα (500°C)	: 21.4 W/m•K
Μέτρο Ελαστικότητας (σε ένταση)	: 193 x 10 <sup>3</sup> MPa
Μέτρο Ελαστικότητας (σε στρέψη)	: 77 x 10 <sup>3</sup> MPa
Μαγνητική διαπερατότητα	: H = 200 Oersteds
Σημείο τήξης	: 1371 – 1399 °C

Πίνακας 3 Ιδιότητες του χάλυβα 316-L

<b>Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316L</b>	<b>Χημική σύσταση (% κ.β.)</b>
Άνθρακας	: 0.03 max
Μαγγάνιο	: 2.00 max
Φώσφορος	: 0.045 max
Θείο	: 0.03 max
Πυρίτιο	: 0.75 max
Χρώμιο	: 16.00 – 18.00
Νικέλιο	: 10.00 – 14.00
Μολυβδαίνιο	: 2.00 – 3.00
Αζωτο	: 0.10 max

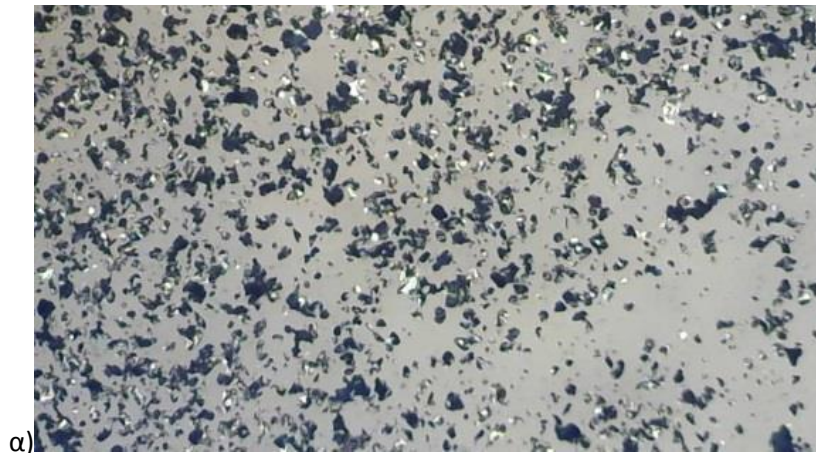
Πίνακας 4 Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316-L



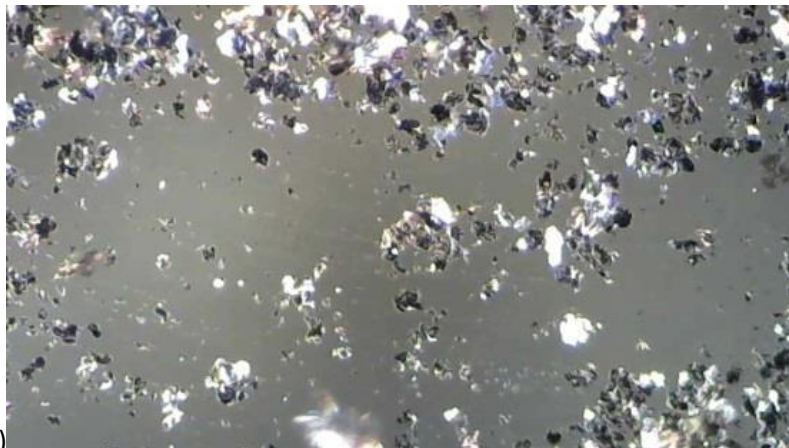
Πίνακας 5 Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

### 3.4 Παρασκευή σκόνης χάλυβα

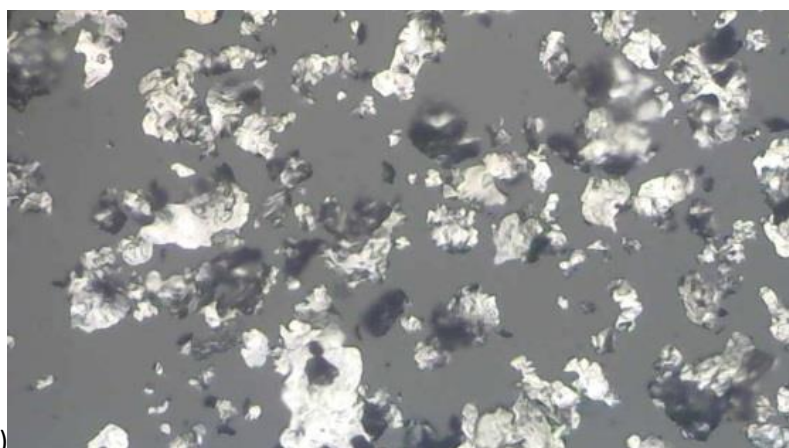
Για την παραγωγή σκόνης χάλυβα χρησιμοποιείται η μέθοδος atomization με δέσμες είτε νερού είτε αέρα. Οι δύο αυτές μέθοδοι περιγράφονται στην παρούσα παράγραφο.



α)

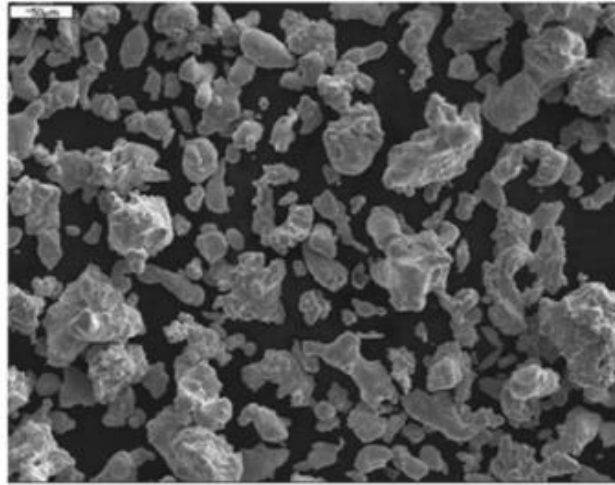


β)



γ)

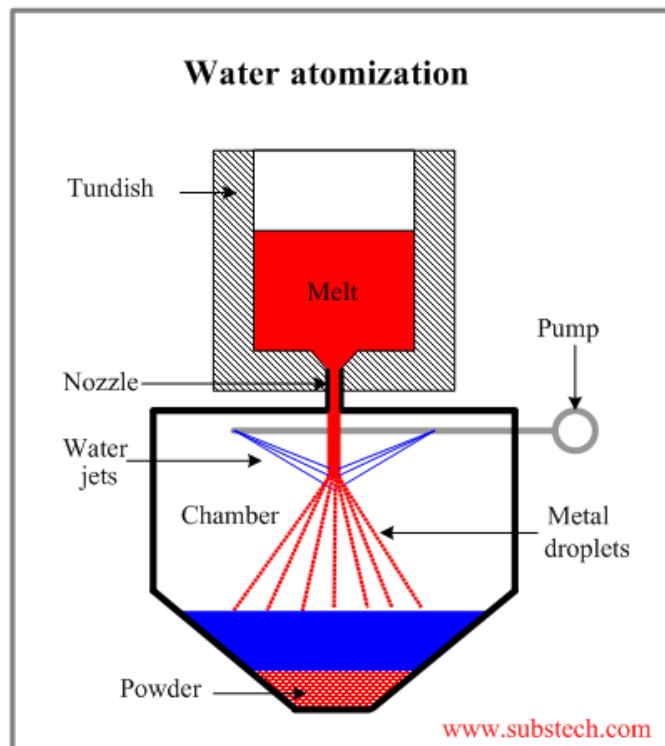
Εικόνα 3.1 Μικροσκοπική απεικόνιση φολιδων χάλυβα (α) φακός x5, (β) φακός x10, (γ) φακός x20



Εικόνα 3.2 Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα

### 3.4.1 Water atomization

Η διάταξη της μεθόδου αυτής (Σχ. 3.3) περιλαμβάνει μία πηγή ισχύος, έναν κλίβανο ρευστοποίησης, μια δεξαμενή atomization κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα, και μια δεξαμενή συγκέντρωσης. Στην περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα, οι φούρνοι υψηλής συχνότητας είναι πιο διαδεδομένοι γιατί επιτρέπουν μέσω εγκατεστημένου συστήματος ανάδευσης την σωστή ανάμιξη των κραματικών στοιχείων που περιέχονται στο χάλυβα.



Σχήμα 3.2 Διάταξη μεθόδου water atomization



Αφού ξεπεραστεί ελαφρώς η θερμοκρασία ρευστοποίησης του μετάλλου (περίπου 500 με 750οC) ο κλίβανος παίρνει κατάλληλη κλίση ώστε το ρευστό μέταλλο να οδηγηθεί διαμέσου μιας αυλάκωσης σε έναν κατανεμητή (μπέκ) ο οποίος αναλαμβάνει την έγχυση του ρευστού με τη μορφή προκαθορισμένου λεπτού στρώματος στην δεξαμενή atomization στην οποία το ρευστό μέταλλο παίρνει κονιώδη μορφή. Η οξείδωση της μεταλλικής σκόνης μειώνεται σημαντικά με μείωση της θερμοκρασίας της έγχυσης ή του atomization (ψεκασμού).[12] Βέβαια, πρέπει να υπολογιστεί ότι μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας, τόσο ώστε να επιστρέψει το ρευστό μέταλλο στη θερμοκρασία τήξης, του μπορεί να οδηγήσει σε στερεοποίηση του μέσα στο ακροφύσιο του κατανεμητή (tundish). Οι παραγωγείς σκόνης χάλυβα δίνουν μεγάλη έμφαση στην επιλογή κατάλληλων κεφαλών atomization ώστε να επιτευχθούν μεγάλης πίεσης δέσμες νερού για αποτελεσματική atomization και μεγάλη παραγωγή σκόνης.

### **3.4.2 Gas atomization**

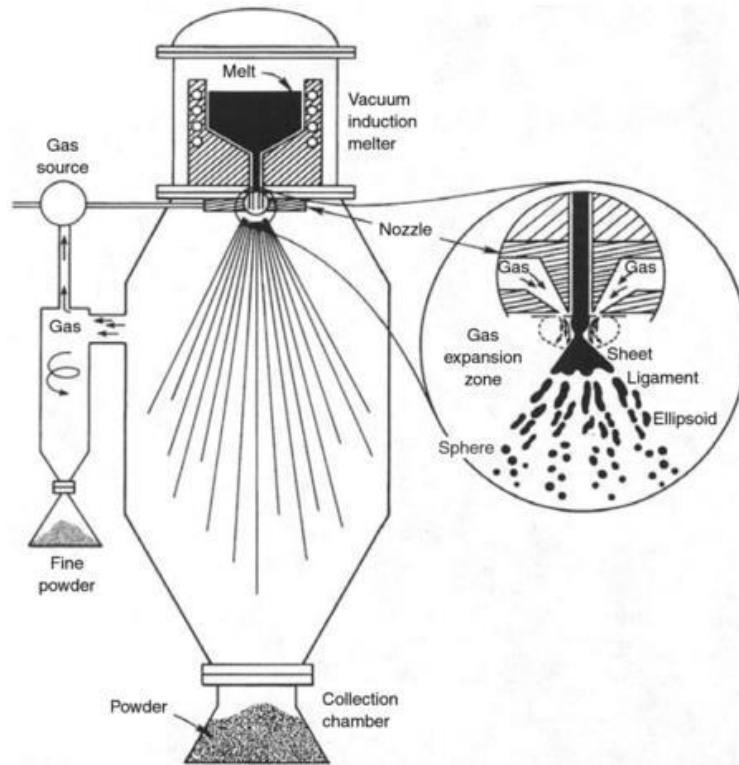
Στη μέθοδο αυτή η ρευστοποίηση του μετάλλου πραγματοποιείται σε προστατευτικό περιβάλλον ή σε κενό αέρος προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση των συστατικών του. Η διάταξη της μεθόδου αυτής (Σχ. 3.4), σχεδιάζεται για συλλογή της σκόνης σε ξηρή μορφή και η δεξαμενή του atomization έχει μεγάλο ύψος (6-10m) για να εξασφαλίζεται η στερεοποίηση των σωματιδίων της σκόνης μέχρι αυτά να φτάσουν στον πυθμένα της.

Εκτός από την κάθετη υπάρχει και η οριζόντια τοποθετημένη διάταξη με οριζόντια τοποθετημένη δεξαμενή atomization όπου επίσης περιορίζεται η οξείδωση. Στη μέθοδο αυτή, η ρευστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ελεύθερη ατμόσφαιρα. Η οριζόντια διατεταγμένη παραγωγή είναι οικονομικότερη της κάθετης.

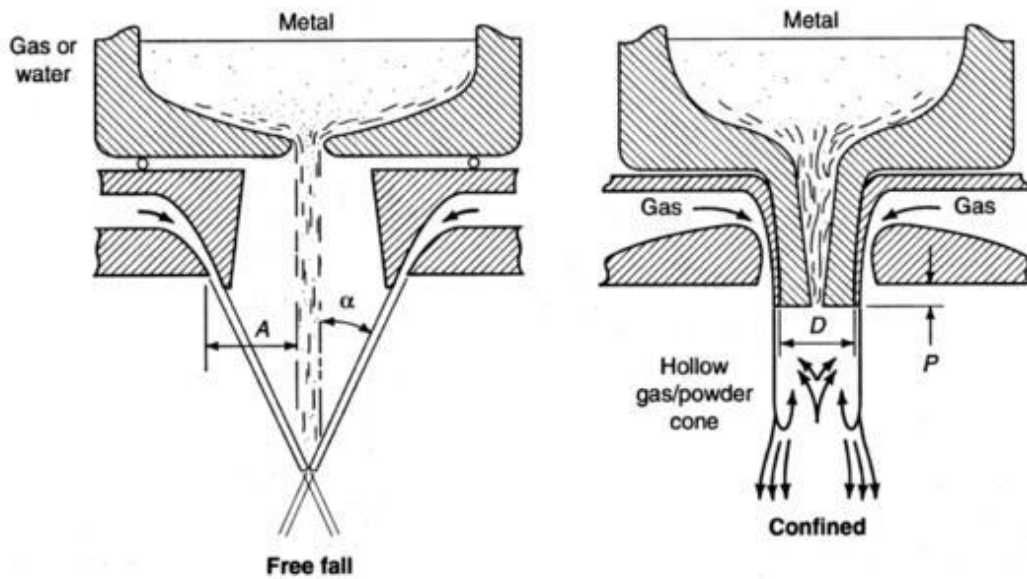
Λόγω της απουσίας οξείδωσης κατά την atomization, πρακτικά η σκόνη έχει διατηρήσει την ίδια χημική σύσταση με το ρευστό μέταλλο. Τα επίπεδα οξειδίων είναι αρκετά χαμηλά δηλαδή της τάξης των 200 ppm (partspermillion).

Οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται στην gas atomization μέθοδο φαίνονται στο Σχήμα 3.5.





Σχήμα 3.3 Διάταξη της Gas atomization



Σχήμα 3.4 Όψη σε τομή κεφαλών gas atomizing



Η σύζευξη των κεφαλών προϋποθέτει την πολύ μικρή απόσταση μεταξύ του υγρού μετάλλου και των κεφαλών εκτόξευσης αέρα υψηλής πίεσης στην κορυφή του ακροφυσίου ώστε να βελτιστοποιηθεί η μεταφορά ενέργειας από τον αέρα στο υγρό μέταλλο με σκοπό την πιο αποτελεσματική atomization. Ένα άλλο όφελος του ανωτέρω σχεδιασμού είναι ότι έτσι παράγονται σωματίδια πιο περιορισμένης κατανομής μεγέθους πράγμα που είναι επικερδές από πολλές απόψεις. Ουσιαστικά, όσο πιο λεπτό είναι το ρεύμα του ρευστού μετάλλου που υπόκειται στην υψηλής πίεσης δέσμη αέρα τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση και τόσο πιο περιορισμένη η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της σκόνης. Οι ομόκεντρα τοποθετημένες gasatomization κεφαλές δημιουργούν ένα κυλινδρικό φιλμ γύρω από το ρευστό μέταλλο. Οι αποκλίσεις της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων αυξάνονται με την αύξηση του ρυθμού ροής του μετάλλου που σημαίνει ότι συνολικά η κατανομή γίνεται πιο μεγάλου εύρους. Αρκετές παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν καθώς υπάρχει και εδώ ο κίνδυνος του παγώματος του ρευστού στο ακροφύσιο. Επίσης και σ' αυτή τη μέθοδο όπως και στο wateratomization το μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πίεση του μέσου ψεκασμού.

Γενικά, με τη μέθοδο του gasatomization δεν μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες σκόνης και αυτό οφείλεται στο αναποτελεσματικό και ανομοιόμορφο atomization όταν αυξάνεται ο ρυθμός έγχυσης του μετάλλου χρησιμοποιώντας μεγαλύτερης διαμέτρου ακροφύσιο. Η τεχνική Wideflow [13] αποτελεί μια λύση του προβλήματος αυτού και βοηθάει την μελλοντική παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σκόνης επιθυμητών προδιαγραφών. Η φιλοσοφία της τεχνικής αυτής έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται μια μικρή γραμμική θυρίδα στην οποία πραγματοποιείται προσβολή υγρού μετάλλου από αέρα υψηλής ενέργειας η οποία εξασφαλίζει μικρής διαμετρου σωματίδια και ταυτόχρονα μεγάλο ρυθμός παραγωγής.

### **3.4.3 Επεξεργασία της σκόνης χάλυβα**

Αφού λάβει χώρα η διαδικασία water atomization η σκόνη αποξηραίνεται και φιλτράρεται. Παρακάτω θα διατυπωθούν αυτές οι διαδικασίες.

#### **Αποξήρανση και φιλτράρισμα**



Μετά την διαδικασία του water atomization τα σωματίδια της σκόνης που βρίσκονταν στο μίγμα σκόνης – νερού στη δεξαμενή απαλλάσσονται από την επιπλέον υγρασία. Αυτό επιτυγχάνεται με φυγοκέντριση, φιλτράρισμα, με διεργασίες υπό κενό αέρος, με θερμική επεξεργασία ή με συνδυασμό κάποιων από τα προηγούμενα. Η ξηρή πλέον σκόνη υποβάλλεται σε μια διαδικασία «κοσκινίσματος» για να διαχωριστούν τα υπερμεγέθη σωματίδια (π.χ. άνω των 149μm) ή για τη δημιουργία σκονών διάφορων μεγεθών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φιλτραρίσματος.

### **Λίπανση**

Τα δύο πιο διαδεδομένα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των σκονών ανοξειδωτού χάλυβα είναι το Stearateλιθίου και AcrawaxC. Τα λιπαντικά χρησιμοποιούνται κυρίως για να μειωθεί η τριβή στα τοιχώματα της μήτρας και η φθορά του εργαλείου κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Για τον περιορισμό φθοράς του εργαλείου το ποσοστό προσθήκης κυμαίνεται μεταξύ 0,75 και 1%. Ωστόσο η λίπανση μπορεί να έχει και άλλες λειτουργίες και οφέλη. Στο σχήμα φαίνεται η επίδραση τριών διαφορετικών λιπαντικών στην πυκνότητα και αντοχή του χάλυβα 316L. Οι παραγωγείς σκόνης πολλές φορές συνδυάζουν τα οφέλη που προσδίδει κάθε λιπαντικό ανάλογα το σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί η σκόνη. Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα για τα «συνδυασμένα» λιπαντικά φαίνεται ότι είναι εφικτή η ενίσχυση της αντοχής χωρίς μείωση της συμπιεστότητας και των απαιτήσεων φορτίου εξόλκευσης [14]. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στις σκόνες ανοξειδωτού άνθρακα απαιτεί προσεκτικό έλεγχο κατά την διεργασία αποκόλλησης ώστε να επιτευχθούν χαμηλά ποσοστά υπολειμματικών συστατικών άνθρακα.

### **Ανόπτηση**

Οι ωστενιτικής δομής σκόνες χάλυβα συνήθως χρησιμοποιούνται στην κατάσταση που έχουν αμέσως μετά το atomization. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (<0,03%) πολλοί χάλυβες (π.χ. 410 L) εμφανίζουν φερριτική μικροδομή και αρκετά καλές ιδιότητες συμπίεσης. Παρόλα αυτά, λόγω της παρουσίας αρκετών εκατοντάδων μερών ανά εκατομμύριο (partspermillion) άνθρακα και αζώτου οι ιδιότητες της σκόνης μπορούν να βελτιωθούν με ανόπτηση. Η ανόπτηση οδηγεί την σκόνη σε μια ελαφριά πυροσυσσώματωση. Με ενός είδους άλεσμα επανέρχεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, ο ρυθμός ροής της σκόνης και η πυκνότητά της.



### 3.4.4 Ιδιότητες σκόνης χάλυβα

Οι σκόνες χάλυβα (όπως και άλλες μεταλλικές σκόνες) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης μπορούν να χαρακτηριστούν από τρεις κατηγορίες ιδιοτήτων:

#### 1) Μεταλλουργικές ιδιότητες

- ❖ Χημική σύσταση και ακαθαρσίες
- ❖ Μικροδομή
- ❖ Μικροσκληρότητα

Καθορίζονται με χημική ανάλυση και μεταλλογραφικές διαδικασίες. Η χημική σύσταση μιας φερριτικής δομής σκόνης έχει μεγάλη επίδραση στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης. Οι μη μεταλλικές ακαθαρσίες έχουν μη επιθυμητή επίδραση στην συμπίεστικότητα και στο χρόνο ζωής των εργαλείων συμπίεσης.

#### 2) Γεωμετρικές ιδιότητες

- ❖ Κατανομή μεγέθους σωματιδίων
- ❖ Εξωτερικό σχήμα σωματιδίων
- ❖ Εσωτερική δομή σωματιδίων (πορώδες)

Πρόκειται ουσιαστικά για την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και το πορώδες τους τα οποία καθορίζουν την ειδική επιφάνεια της σκόνης η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης.

#### 3) Μέγεθος και κατανομή μεγέθους σωματιδίων

- ❖ Ρυθμός ροής
- ❖ Πυκνότητα
- ❖ Συμπίεστικότητα, αντοχή



Καθορίζεται από διαδικασία φιλτραρίσματος αν το μέγεθος των σωματιδίων είναι άνω των 45 $\mu$ m. Πιο λεπτές σκόνες ενυδατώνονται και αναλύονται με διάθλαση δέσμης λειζερ. Το μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται από την πίεση του νερού κατά την atomization. Υψηλές πιέσεις δημιουργούν λεπτές σκόνες και το αντίθετο. Με κατάλληλο συνδυασμό ακροφυσίων (όπως ακροφύσια τύπου V) είναι δυνατή η διαμόρφωση κατάλληλων δεσμών νερού [16] και άρα η παραγωγή ποικίλων κατανομών μεγέθους σωματιδίων. Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων είναι χαρακτηριστικό μεγάλης σημασίας αφού μικρού εύρους κατανομή σωματιδίων δίνει μεγάλη ποσότητα αξιοποιήσιμης σκόνης. Ειδικότερα το ποσοστό των σωματιδίων μικρής κοκκομετρίας δεν πρέπει να ξεπερνά το 35-55% , για σκόνες ανοξειδωτου χάλυβα που προορίζονται για συμπίεση, αφού για μεγαλύτερο ποσοστό επιδεινώνεται η ρευστότητα της σκόνης. Κάποιες παράμετροι όπως οι κεφαλές της atomization που έχουν άμεσο ρόλο στην αλληλεπίδραση της δέσμης νερού ή αέρα με το υγρό μέταλλο μπορούν να καθορίσουν το εύρος της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων[1,22]

#### **Εξωτερικό σχήμα σωματιδίων**

Αναλύεται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Το σχήμα των σωματιδίων της μεταλλουργικής σκόνης έχει πολύ μεγάλη επιρροή στην φαινόμενη πυκνότητα, στις ιδιότητες ροής και στη συμπιεστότητα της σκόνης. Επίσης επιδρά στις ιδιότητες του προϊόντος της πυροσυσσωμάτωσης. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί στατιστικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του σχήματος των σωματιδίων, η πυκνότητα ενός κλάσματος σκόνης μικρού μεγέθους αποτελεί ένα ικανοποιητικό μέγεθος για τον γρήγορο και εύκολο προσδιορισμό του σχήματος των σωματιδίων που μπορεί να συσχετιστεί και με άλλες ιδιότητες της σκόνης. Οι σκόνες που παράγονται με wateratomization έχουν ακανόνιστο σχήμα σωματιδίων παρόλα αυτά μπορεί να παραχθεί ένα μεγάλο εύρος σχήματος σωματιδίων. Ένα τρόπος καθορισμού του σχήματος των σωματιδίων της σκόνης είναι με αλλαγή στη χημική σύσταση αλλά ο φυσικός τρόπος είναι η ανάλογη σχεδίαση των κεφαλών της wateratomization. Πολλές φορές αυτό γίνεται εμπειρικά. Οι καταγεγραμμένοι τύποι κεφαλών μπορούν να προσφέρουν σημαντικό αριθμό ειδικών σχεδιασμών [17,24]. Επίσης υφίσταται και η τεχνική wateratomization σε δύο βήματα δηλαδή συνδυασμό gas και wateratomization. Ο ανεξάρτητος έλεγχος αυτών των δύο μεθόδων μπορεί να βοηθήσει στον προκαθορισμό του σχήματος των σωματιδίων[19].



Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα επιθυμητό σχήμα σωματιδίων είναι το σφαιρικό ή σχεδόν σφαιρικό τόσο γιατί οι σκόνες αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα μετά τη συμπίεση όσο και γιατί η ίδια η συμπίεση γίνεται ευκολότερα και γρηγορότερα λόγω της μεγαλύτερης φαινόμενης πυκνότητας η οποία προσδίδει μεγάλο ρυθμό ροής και μικρότερο απαιτούμενο ύψος πλήρωσης της μήτρας. Η χρησιμοποίηση τέτοιου είδους σκόνης είναι εφικτή και στην συμπίεση σε μεγαλύτερη θερμοκρασία η οποία έχει σημαντική επίδραση στην μηχανική αντοχή. [20]

### **Εσωτερική δομή σωματιδίων**

Αναλύεται με τεχνικές μεταλλογραφίας.

### **Φαινομενική πυκνότητα**

Μετράται σε προκαθορισμένου όγκου δοχείο διαιρώντας τη μάζα της σκόνης με τον όγκο του δοχείου. Η πυκνότητα επίσης επηρεάζεται από το λιπαντικό που έχει προσμιχθεί στη σκόνη. Τέλος, καθορίζει το βάθος πλήρωσης του εργαλείου συμπίεσης.

### **Greenstrength**

Είναι η αντοχή σε κάμψη ενός (συμπιεσμένου, όχι πυροσυσσωματωμένου) δοκιμίου ορθογωνικής διατομής. Το greenstrength αυξάνεται με αύξηση της συμπαγούς πυκνότητας και επηρεάζεται φυσικά και από το ποσοστό και τον τύπο του λιπαντικού που έχει προσμιχθεί στη σκόνη. Απαιτείται συγκεκριμένη τιμή greenstrength ώστε να αποφευχθούν ρωγμές στο δοκίμιο κατά την εξαγωγή από τη μήτρα συμπίεσης αλλά και φθορά του κατά τη μεταφορά του μεταξύ της εργαλειομηχανής συμπίεσης και του κλίβανου πυροσυσσωμάτωσης. Όσο πιο πολύπλοκο και λεπτομερές είναι το σχήμα ενός προϊόντος της όλης διαδικασίας όσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι το greenstrength.

### **Συμπιεστότητα**

Απεικονίζεται από την καμπύλη που προκύπτει από τις τιμές της πυκνότητας μιας σειράς κυλινδρικών δοκιμίων από σκόνη (διαμέτρου 25mm) ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Η συμπαγής πυκνότητα προκύπτει από τη διαίρεση της μάζας ενός δοκιμίου σκόνης με τον όγκο του. Η πυκνότητα, είναι η συμπαγής πυκνότητα ενός δοκιμίου συμπαγούς σκόνης (διαμέτρου 25mm) το οποίο υποβάλλεται σε πίεση συγκεκριμένης τιμής (4,2 t/cm<sup>2</sup> ή 600



N/mm<sup>2</sup>). Η συμπιεστότητα μιας σκόνης καθορίζει την πίεση συμπίεσης που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπαγής πυκνότητα.

### **Ρυθμός ροής**

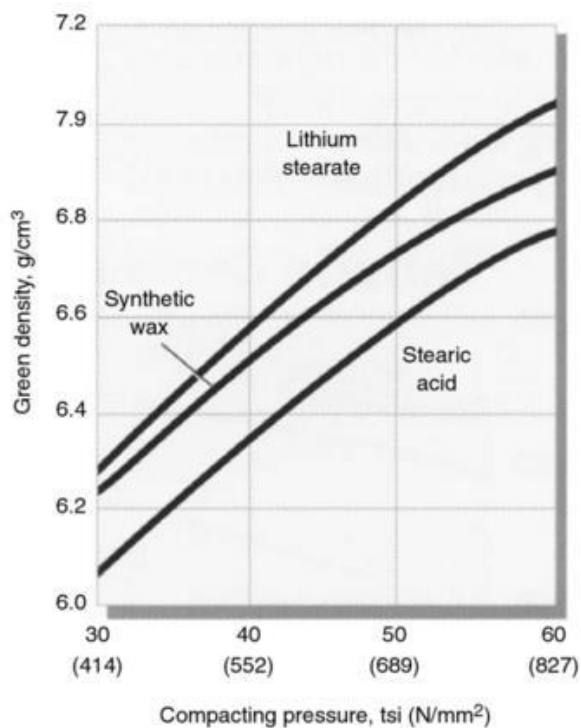
Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να διέλθει ποσότητα 50 γραμμαρίων σκόνης από την οπή χωνιού συγκεκριμένων προδιαγραφών. Ο ρυθμός ροής επηρεάζεται από τον τύπο και την ποσότητα του λιπαντικού που έχει αναμιχθεί με τη σκόνη και καθορίζει την ταχύτητα πλήρωσης του εργαλείου συμπίεσης με σκόνη.

### **Springback**

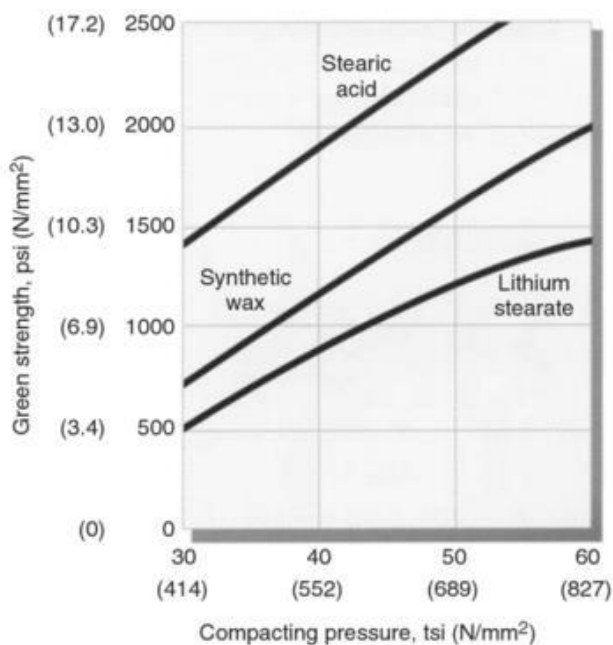
Είναι η ελαστική επιμήκυνση ενός κυλινδρικού δοκιμίου συμπαγούς σκόνης (25mm) μετά από την εξαγωγή του από τη μήτρα συμπίεσης. Το springback αυξάνεται με αύξηση της πίεσης συμπίεσης και επηρεάζεται επίσης από την ποσότητα και το τύπο του λιπαντικού που έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη λίπανση καθώς και από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση. Η τιμή του springback είναι σημαντική για τον υπολογισμό των διαστάσεων του εργαλείου συμπίεσης σε σχέση με τις απαιτούμενες διαστάσεις του συμπαγούς.



α)



β)



Σχήμα 3.5 Διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης τριών λιπαντικών στην πυκνότητα (α) και την green strength (β) της σκόνης χάλυβα [15]





# 2ο ΜΕΡΟΣ

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 4 Παρασκευή δοκιμών

### 4.1 Διέλαση και ομογενοποίηση πολυαιθυλενίου



Εικόνα 4.1 Ο extruder του εργαστηρίου όπου έγινε η Διέλαση του πολυαιθυλενίου

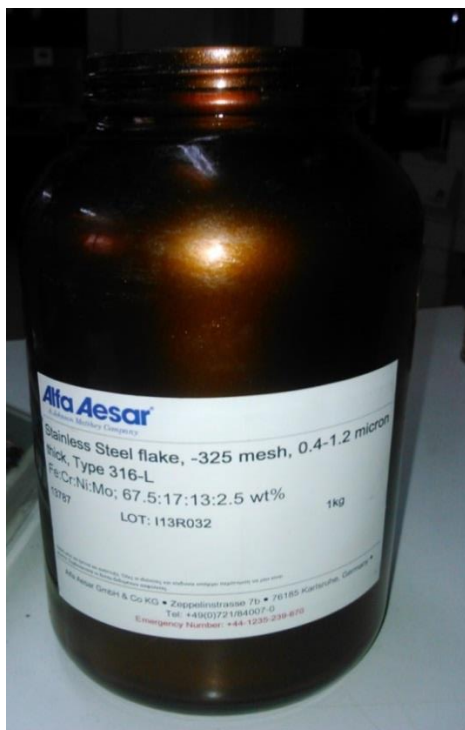
#### 4.1.1 Υλικά και εξοπλισμός

Η Διέλαση του πολυαιθυλενίου ,πραγματοποιήθηκε στο κτίριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν κόκκοι πολυαιθυλενίου της Sabic και φολίδες χάλυβα (stainless steel flakes- 316L). Αναλυτικότερα τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για την όλη διαδικασία του πειράματος πριν και μετά την χύτευση παρατίθενται παρακάτω:

- Πολυαιθυλένιο
- Φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα
- Extruder (Johnson Plastics Machinery)
- Μήτρα στρογγυλής διατομής
- Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 4.2 Το πολυαιθυλένιο που χρησιμοποιήσαμε ως πρώτη υλη



Εικόνα 4.3 Οι φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν



Οι φολίδες χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη Διέλαση έχουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Χαρακτηριστικά φολίδων Ανοξείδωτου χάλυβα</b>	
<b>Stainless Steel flakes properties</b>	
Mesh	-325
Mesh (μm)	44
Mesh (inches)	0,0017
Χημική σύσταση ( % κ.β.)	Fe:Cr:Ni:Mo ; 67,5:17:13:2,5
Πάχος (μm)	0,4-1,2
Τύπος χάλυβα	316-L

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα



Εικόνα 4.4 Το σημείο του extruder όπου υπάρχουν οι αντιστάσεις θέρμανσης του πολυμερούς και ο κοχλίας



Εικόνα 4.5 Η μήτρα μορφοποίησης του πολυμερούς



Εικόνα 4.6 Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας



#### 4.1.2 Διαδικασία διέλασης πολυαιθυλενίου

Προπαρασκευαστικό στάδιο της διαδικασίας της χύτευσης αποτελεί η ανάμειξη των φολίδων χάλυβα στους κόκκους του πολυαιθυλενίου με ακριβή αναλογία βάρους των δυο προσμείξεων. Στη συνέχεια και ενώ έχουμε ενεργοποιήσει τον extruder μια ώρα πριν ώστε να ζεσταθεί, εισάγουμε το μείγμα πολυαιθυλενίου-φολίδων χάλυβα στη χοάνη τροφοδοσίας. Όταν αρχίσει να σταθεροποιείται το χρώμα του εξαγόμενου τήγματος από τη μήτρα τότε αρχίζουμε να διαμορφώνουμε το τήγμα σε ράβδους μήκους περίπου 1 μέτρου, με τη βοήθεια ενός προφίλ αλουμινίου διατομής (Π). Έπειτα επάνω σε μεταλλικό πάγκο και όσο είναι ακόμη εύκαμπτη η ράβδος τη διαμορφώνουμε σε σχήμα πετάλου και την συμπιέζουμε με μια μεταλλική πλάκα βάρους 30 κιλών. Με αυτό τον τρόπο η διατομή από στρογγυλή γίνεται πλατιά και λεπτή ώστε να δημιουργήσουμε σε επόμενη φάση τα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης. Επιπρόσθετα για κάθε διαφορετική περιεκτικότητα φολίδων χάλυβα στο πολυαιθυλένιο εξάγουμε και μια ράβδο στρογγυλής διατομής έτσι ακριβώς όπως βγαίνει από τον extruder ώστε να γίνουν πειράματα συμπίεσης, σκληρομέτρησης αλλά και μικροσκοπική μελέτη. Τα παραχθέντα τμήματα πολυαιθυλενίου αφού στερεοποιηθούν έπειτα από 15 με 20 λεπτά τοποθετούνται σε επίπεδο πάγκο με κάποια μικρά βαρίδια σε όλο το μήκος τους ώστε να μην υπάρξουν λυγισμοί κατά τη συρρίκνωση του πολυμερούς.



Εικόνα 4.7 Ζύγισμα φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα



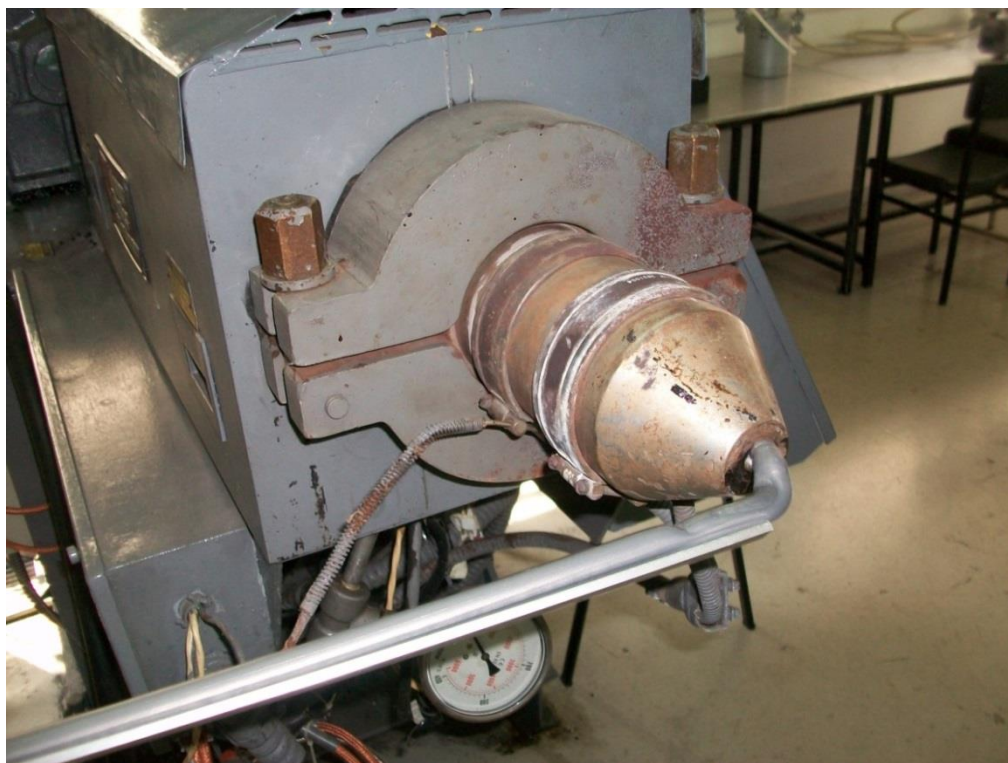
Εικόνα 4.8 Κόκκοι πολυαιθυλενίου



Εικόνα 4.9 Κόκκοι πολυαιθυλενίου μετά την ανάμειξη με φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα



Εικόνα 4.10 Προφίλ αλουμινίου σχήματος (Π)



Εικόνα 4.11 Στήριξη του εξαγόμενου τμήματος από τη μήτρα, στο προφίλ αλουμινίου





Εικόνα 4.12 Μεταλλική πλάκα συμπίεσης 40Kg



Εικόνα 4.13 Αποφυγή λυγισμών με μικρά βαρίδια



Εικόνα 4.14 Σύνθετο υλικό HDPE/SSF μετά από συμπίεση από όπου θα προκύψουν τα τελικά δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης τριών σημείων



Εικόνα 4.15 Στήριξη για στερεοποίηση ράβδου πολυαιθυλενίου που θα χρησιμοποιηθεί για τεστ συμπίεσης και μεταλλογραφίας



Εικόνα 4.16 Όλες οι ράβδοι διαφορετικών περιεκτικότητων σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα

#### 4.1.3 Παραχθέντα δοκίμια

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της διέλασης παρήχθησαν επτά ομάδες δοκιμίων. Η κοπή των οποίων έγινε με δισκοτόμο struers και χειροκίνητο διατμητικό κόφτη οι οποίοι υπάρχουν στο εργαστήριο.



ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ		
Πλήθος	Περιεκτικότητα σε φολίδες χάλυβα	Διαστάσεις (χιλ.)
Δώδεκα (12)	0 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	1 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	2 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	3 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	4 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	5 % κ.β	100X21X6
Δώδεκα (12)	10 % κ.β	100X21X6
Έξι (6)	0 % κ.β	R6.35X25.4
Έξι (6)	1 % κ.β	R6.35X25.4
Έξι (6)	2 % κ.β	R6.35X25.4 R6.35X25.4
Έξι (6)	3 % κ.β	R6.35X25.4
Έξι (6)	4 % κ.β	R6.35X25.4
Έξι (6)	5 % κ.β	R6.35X25.4
Έξι (6)	10 % κ.β	R6.35X25.4
Ένα (1)	0 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	1 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	2 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	3 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	4 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	5 % κ.β	R5 X20
Ένα (1)	10 % κ.β	R5 X20

Πίνακας 7 Παραχθέντα Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας

Από τις παραπάνω ομάδες δοκιμίων πέντε δοκίμια (100X30X4.5) από κάθε ομάδα υποβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (Tensile Strength Test), πέντε σε δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (Three Point Bending), και δυο δοκίμια κάθε ομάδας χρησιμοποιήθηκαν για μελέτη μεταλλογραφίας. Δυο δοκίμια (R5 X9) για κάθε περιεκτικότητα σε χάλυβα υποβλήθησαν σε τεστ συμπίεσης και ένα για μεταλλογραφικό έλεγχο. Τέλος τα κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων R5 X20 διχοτομήθηκαν κατά τον διαμήκη άξονα έτσι ώστε να γίνει μεταλλογραφικός έλεγχος και στον διαμήκη άξονα.



Εικόνα 4.17 Χειροκίνητος διατμητικός κόφτης



Εικόνα 4.18 Δισκοτόμος struers



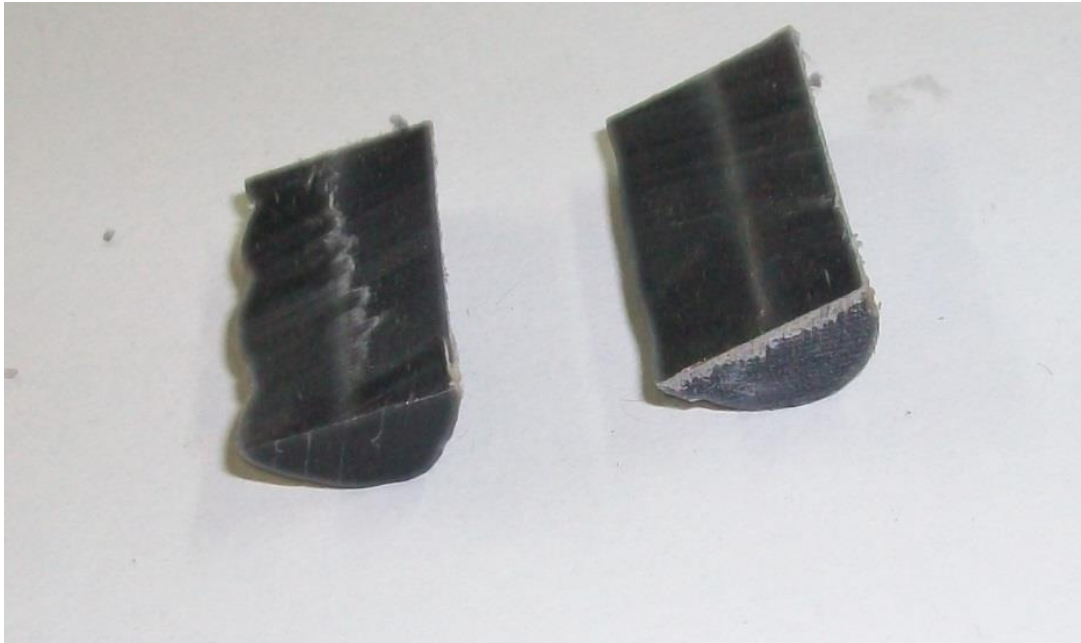
Εικόνα 4.19 Δοκίμιο καθαρού πολυαιθυλενίου διαστάσεων : 100X30x6



Εικόνα 4.20 Δοκίμια διαφορετικών περιεκτικότητων σε φολίδες χάλυβα, για τα τεστ συμπίεσης



Εικόνα 4.21 Δοκίμια διαφορετικών περιεκτικότητων σε φολίδες χάλυβα, για την μικροσκοπική απεικόνιση



Εικόνα 4.22 Διχοτόμηση δοκιμίου για μικροσκοπικό έλεγχο



Εικόνα 4.23 Δοκίμια πολυαιθυλενίου με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5,10 % αντίστοιχα σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα





## 4.2 Έγχυση ρητίνης για κατασκευή μήτρας με ενίσχυση φολίδων χάλυβα

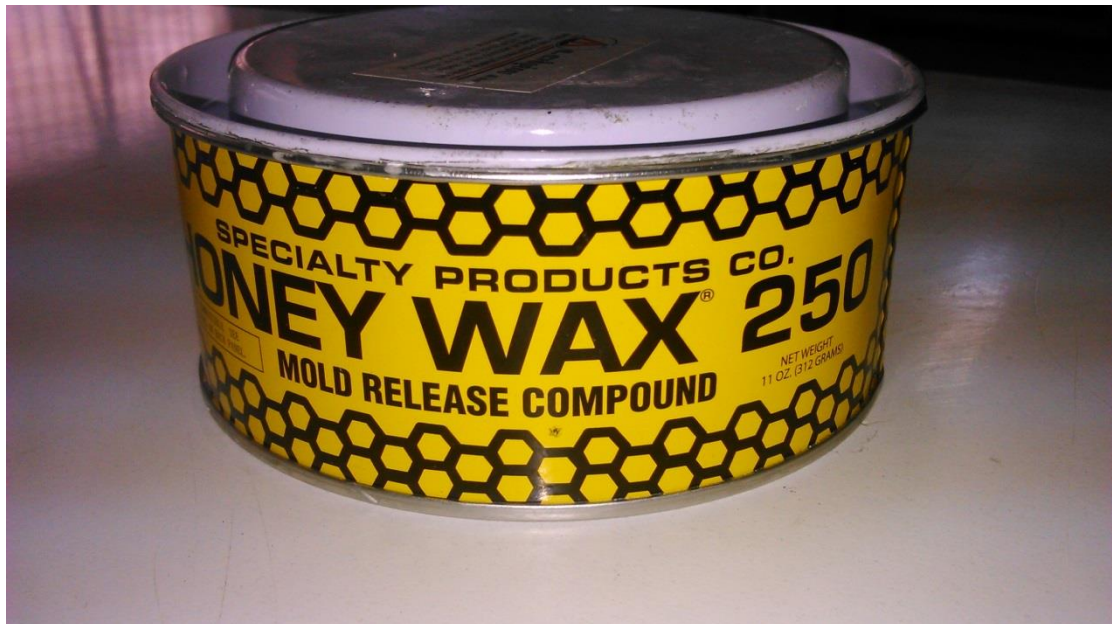
### 4.2.1 Υλικά και εξοπλισμός

Η έγχυση της ρητίνης πραγματοποιήθηκε στο κτίριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών τύπου ES-35A, μεθυλακρλική ρητίνη DEGADUR 332 και φολίδες χάλυβα (stainless steel flake- 316L).

Αναλυτικότερα τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για την όλη διαδικασία του πειράματος πριν και μετά την χύτευση παρατίθενται παρακάτω:



Εικόνα 4.24 Ζυγός ακριβείας



Εικόνα 4.25 Κερί αποκόλλησης καλουπιών(honey wax 250)



Εικόνα 4.26 Εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών(ES-35A)



Εικόνα 4.27 Μεθακρυλική ρητίνη (DEGADUR 332)



Εικόνα 4.28 Καταλύτης μεθακρυλικής ρητίνης σε σκόνη



#### Typical properties

Property	Value	Unit	Method
Form supplied	Slightly turbid liquid		
Viscosity at 23 °C	669 - 1,003	mPas	DIN 53 018, Brookfield DV-II, sp. 2/12 rpm
Density at 20 °C	0.98	g/cm <sup>3</sup>	DIN 51757
T <sub>max</sub> at 23 °C	16 - 23 min / 85 - 125 °C		20.0 g DEGADUR® 332 + 0.4 g BPO 50%
Flash point	10	°C	MMA, DIN 51755

#### General remarks

Customs tariff no.	3208 2010 900
Activator	DEGADUR® 332 is preactivated for temperatures from 5 °C to 30 °C.
Initiator/Hardener	BPO-Hardener (50 %), depending on temperature
Shelf life	minimum 6 months in original containers / from date of delivery
Storage	Store at ≤ 25 °C. Protect against direct sunlight. At temperatures below 15 °C the paraffin dissolved in the binder may precipitate. The material must be stirred thoroughly before use.
Packaging	Steel drum, 200 kg net
More accounts	see technical data sheet DEGADUR® 332

Εικόνα 4.29 Χαρακτηριστικά στοιχεία μεθακρυλικής ρητίνης DEGADUR 332



Εικόνα 4.30 Πλαστικός ορθογώνιος δίσκος ως καλούπι έγχυσης



Εικόνα 4.31 Πλαστικό κυλινδρικό καλούπι

#### 4.2.2 Μέτρα προστασίας κατά την έγχυση ρητίνης

Οι κυριότεροι κίνδυνοι κατά τη διαδικασία της έγχυσης ήταν η εισπνοή των πτητικών αερίων της ρητίνης και της σκόνης χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, λόγω της πολύ μικρής κοκκομετρίας της. Γι' αυτό το λόγο πέρα από τον διαρκή εξαερισμό του χώρου χρησιμοποιήθηκαν ειδικές μάσκες προστασίας. Συγκεντρωτικά τα μέτρα προστασίας που ελήφθησαν είναι τα εξής:

- Προστατευτικά γάντια (Εικ. 4.2) προκειμένου να γίνονται οι χειρισμοί χωρίς κίνδυνο επαφής με τη ρητίνη ή τις φολίδες χάλυβα.
- Διαφανή προστατευτικά γυαλιά (Εικ. 4.2). Η χρησιμότητά τους είναι πολύ μεγάλη καθώς προστατεύουν τα μάτια από αναθυμιάσεις και σκόνη κατά τη διαδικασία της ανάμειξης και έγχυσης.
- Ειδική αναπνευστική μάσκα τύπου FFP3 (4.2). Επειδή η διάμετρος των σωματιδίων της σκόνης χάλυβα είναι πολύ μικρή (44 μm) αυτά δεν φιλτράρονται από τον

ανθρώπινο οργανισμό. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η χρήση μάσκας επιπέδου προστασίας FFP3, ώστε να αποφευχθεί η εισπνοή τους.

Βέβαια, τα μέτρα προστασίας όσο αυστηρά κι αν είναι δεν υποκαθιστούν τον ανθρώπινο παράγοντα. Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε μόνο από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό.



Εικόνα 4.32 Μέτρα προστασίας: Γυαλιά-μάσκα-γάντια

#### 4.2.3 Διαδικασία έγχυσης ρητίνης

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας έγινε ελεύθερη έγχυση ρητινικής μήτρας με διάχυτα σωματίδια( φολίδες χάλυβα). Προπαρασκευαστικό στάδιο της διαδικασίας είναι το να υπολογιστεί το ποσοστό κατά βάρος :

- α) του καταλύτη και
- β) επί του συνολικού βάρους , το βάρος των φολίδων χάλυβα που θα αναμειχτούν στη ρητίνη.

Έπειτα σειρά παίρνει η ανάδευση των διαφορετικών υλικών με σκοπό τη βέλτιστη ενσωμάτωση και την ομοιόμορφη διασπορά των Φολίδων χάλυβα στη ρητίνη. Για την προετοιμασία της μήτρας των δοκιμών με φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα , αφού έγινε η ανάμειξη του μονομερούς του εποξικού συστήματος με τις φολίδες χάλυβα σε γυάλινο δοχείο, τοποθετήθηκε μέσα στο υγρό μίγμα ποσότητα σκληρηνή που αντιστοιχεί στην



επιθυμητή κατά βάρος σύσταση του εποξικού . Προτού αναμειχτεί με το σκληρηντή το μίγμα μονομερούς με φολίδες χάλυβα περιστράφηκε με αναδευτήρα στις 2000 rpm για 2 ώρες (light stirring). Επισημαίνεται, πως η ανάδευση των φολίδων χάλυβα με τα συστατικά του εποξικού συστήματος πραγματοποιήθηκε σε γυάλινο δοχείο, γιατί σε πλαστικά δοχεία αναπτύσσονται μαγνητικά φαινόμενα και η σκόνη του χάλυβα κολλάει στα τοιχώματα του δοχείου. Η ανάδευση του μίγματος έγινε πάλι για 2 ώρες στις 400 rpm.

Η έγχυση έγινε σε :

- πλαστικούς ορθογώνιους δίσκους με διαστάσεις 160X140X4.5 χιλ.
- πλαστικά εργαστηριακά κυλινδρικά καλούπια διαμέτρου 30χιλ. και ύψους 25 χιλ.

Τα παραπάνω καλούπια πριν γίνει η έγχυση αλείφτηκαν με κεριά αποκόλλησης καλουπιών(honey wax 250).



Εικόνα 4.33 Καθαρή εποξειδική ρητίνη πριν την κοπή για κατασκευή δοκιμίων



Εικόνα 4.34 Κυλινδρικά δοκίμια εποξειδικής ρητίνης πριν εξαχθούν από το καλούπι

#### 4.2.4 Παραθέντα δοκίμια

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της έγχυσης, παρήχθησαν επτά ομάδες δοκιμών για την εποξειδική ρητίνη και έξι ομάδες δοκιμών για τη μεθακρυλική ρητίνη. Η κοπή των οποίων έγινε με εργαστηριακό δισκοτόμο (struers) ο οποίος υπάρχει στο εργαστήριο.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ		
Πλήθος	Περιεκτικότητα σε φολίδες χάλυβα	Διαστάσεις (χιλ.)
Δέκα (10)	0 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	1 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	2 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	3 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	4 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	5 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	10 % κ.β.	127X12.7X3.2
Πέντε (5)	0 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	1 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	2 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	3 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	4 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	5 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	10 % κ.β.	25.4X12.7X12.7

Πίνακας 8 Περιγραφή όλων των δοκιμών εποξικής ρητίνης



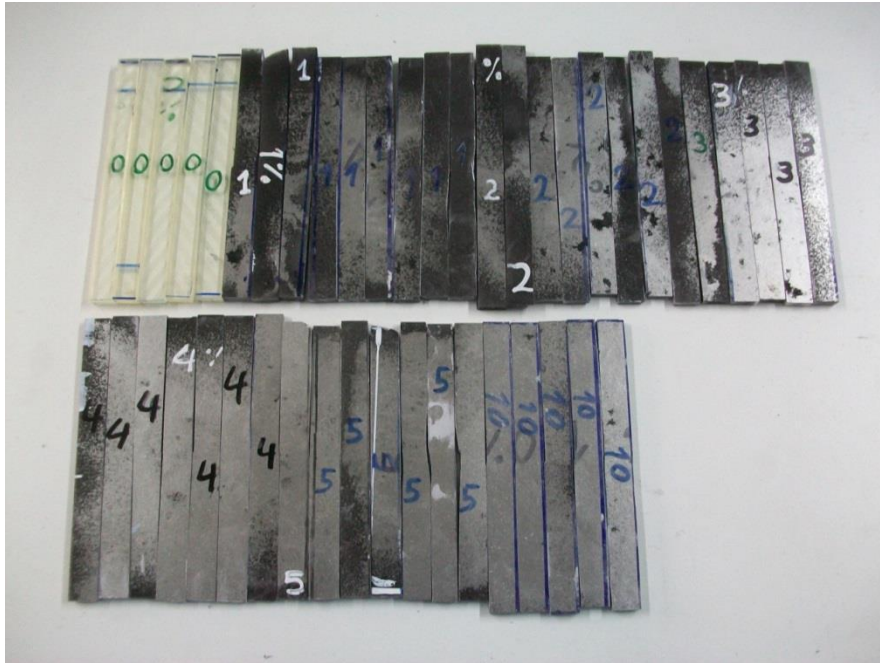


ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕΘΥΑΚΡΙΛΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ		
Πλήθος	Περιεκτικότητα φολίδες χάλυβα	σε Διαστάσεις (χιλ.)
Δέκα (10)	0 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	1 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	2 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	3 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	4 % κ.β.	127X12.7X3.2
Δέκα (10)	5 % κ.β.	127X12.7X3.2
Πέντε (5)	0 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	1 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	2 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	3 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	4 % κ.β.	25.4X12.7X12.7
Πέντε (5)	5 % κ.β.	25.4X12.7X12.7

Πίνακας 9 Περιγραφή όλων των δοκιμών μεθακρυλικής ρητίνης

Από τις παραπάνω ομάδες δοκιμών διαστάσεων:130X13X3.2,τέσσερα δοκίμια από κάθε ομάδα υποβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (Tensile Strength Test), τέσσερα σε δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (Three Point Bending), και ένα δοκίμιο κάθε ομάδας χρησιμοποιήθηκε για μελέτη μεταλλογραφίας. Τα κυλινδρικά δοκίμια κοπήκαν με τη βοήθεια του δισκοτόμου σε διαστάσεις 25.4X12.7X12.7 τα οποία υποβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής σε συμπίεση.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί η επιλογή μας να μην κατασκευάσουμε δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης με ποσοστό φολίδων χάλυβα 10%(wt). Αυτό έγινε διότι το ποσοστό των συσσωματωμάτων χάλυβα μέσα στη μήτρα αυξανόταν πολύ με αποτέλεσμα την αστοχία των δοκιμών.



Εικόνα 4.35 Δοκίμα εποξειδικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10%



Εικόνα 4.36 Δοκίμα μεθακρυλικής ρητίνης με φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4 και 5%



Εικόνα 4.37 Κυλινδρικά δοκίμια εποξειδικής ρητίνης με φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10%



Εικόνα 4.38 Δοκίμια εποξειδικής ρητίνης που μετασηματίστηκαν από κυλινδρικά σε 25.4X12.7X12.7 για τα τεστ συμπίεσης κατά πρότυπο ASTM



Εικόνα 4.39 Κυλινδρικά δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης με φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα σε περιεκτικότητες 0,1,2,3,4 και 5%



Εικόνα 4.40 Δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης που μετασχηματίστηκαν από κυλινδρικά σε 25.4X12.7X12.7 για τα τεστ συμπίεσης κατά πρότυπο ASTM



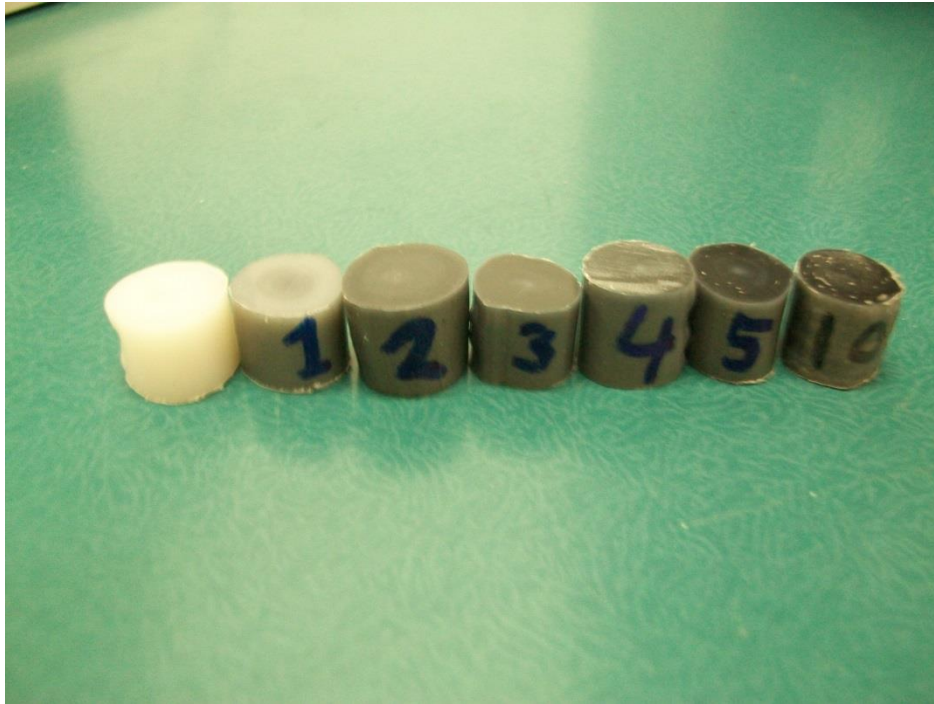
#### 4.2.5 Λείανση των δοκιμίων

Προκειμένου να μελετηθεί η επιφάνεια των δοκιμίων σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, τα δοκίμια αφού κόπηκαν σε κατάλληλο μέγεθος με χρήση δισκοτόμου, λειάνθηκαν ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Για να λειανθούν οι πολυμερικές επιφάνειες χρησιμοποιήθηκε ο αυτόματος περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος του εργαστηρίου στον οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια με κατάλληλα λειαντικά φύλλα καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Η λείανση έγινε σε αρκετά επιμέρους βήματα, δηλαδή τα λειαντικά χαρτιά χρησιμοποιήθηκαν με μειούμενο βαθμό τραχύτητας (grid). Συγκεκριμένα, οι βαθμοί τραχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν προοδευτικά οι εξής: 500, 800, 1200, 2400, 4000. Τα δοκίμια έμειναν σε επαφή με το κάθε λειαντικό φύλλο έως ότου αποκτήσουν ομοιόμορφη επιφάνεια.



Εικόνα 4.41 Αυτόματος περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος struers



Εικόνα 4.42 Λειασμένα κυλινδρικά δοκίμια πολυαιθυλενίου



Εικόνα 4.43 Λειασμένα διχοτομημένα δοκίμια πολυαιθυλενίου



Εικόνα 4.44 Λειασμένα δοκίμια εποξειδικής ρητίνης

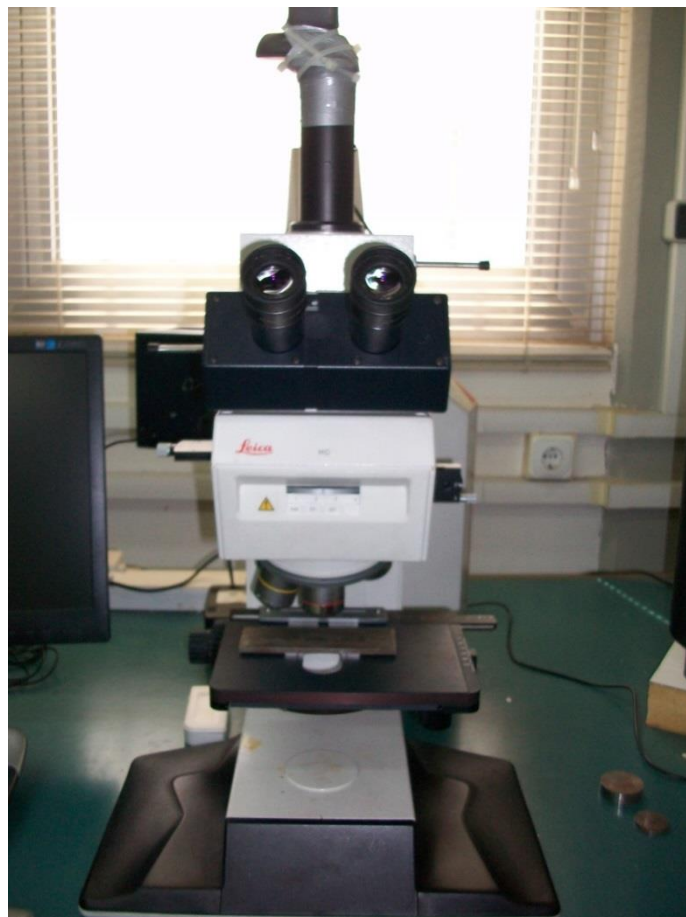


Εικόνα 4.45 Λειασμένα δοκίμια μεθυλακρυλικής ρητίνης



## 5 Αποτελέσματα δοκιμών

### 5.1 Μελέτη Μικροδομής



Εικόνα 5.1 Οπτικό μικροσκόπιο Leica DMR

#### 5.1.1 Αποτελέσματα Μελέτης Μικροδομής

Με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, τα δοκίμια παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope), όπου ελήφθησαν αντιπροσωπευτικές εικόνες για κάθε ένα. Στη συνέχεια παρατίθενται οι μικροσκοπικές απεικονίσεις των δοκιμών και ο σχολιασμός τους.





- **Πορώδες**

Με χαμηλή ακόμη μεγέθυνση (x5) αποκαλύπτεται η ύπαρξη πορώδους κατά τη διατομή του υλικού. Το πορώδες αυτό οφείλεται τόσο σε εγκλείσματα αέρα που εγκλωβίστηκαν κατά την ανάδευση του υλικού της μήτρας ή κατά την παρασκευή του συνθέτου υλικού. Η ύπαρξη πορώδους οδηγεί σε υποβάθμιση της αντοχής του υλικού, καθώς σε εκείνα τα σημεία προκαλείται συγκέντρωση τάσεων και ταυτόχρονα μειώνεται η ενεργός διατομή του υλικού.

- **Συσσωματώματα χάλυβα (aggregates)**

Παρουσιάζονται χαρακτηριστικές όψεις συσσωματωμάτων φολίδων χάλυβα εντός του υλικού της μήτρας. Αξίζει να αναφερθεί, πως η δημιουργία συσσωματωμάτων είναι ελάττωμα, καθώς δεν γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της μεγάλης επιφάνειας των εγκλεισμάτων (SSF) και δημιουργούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

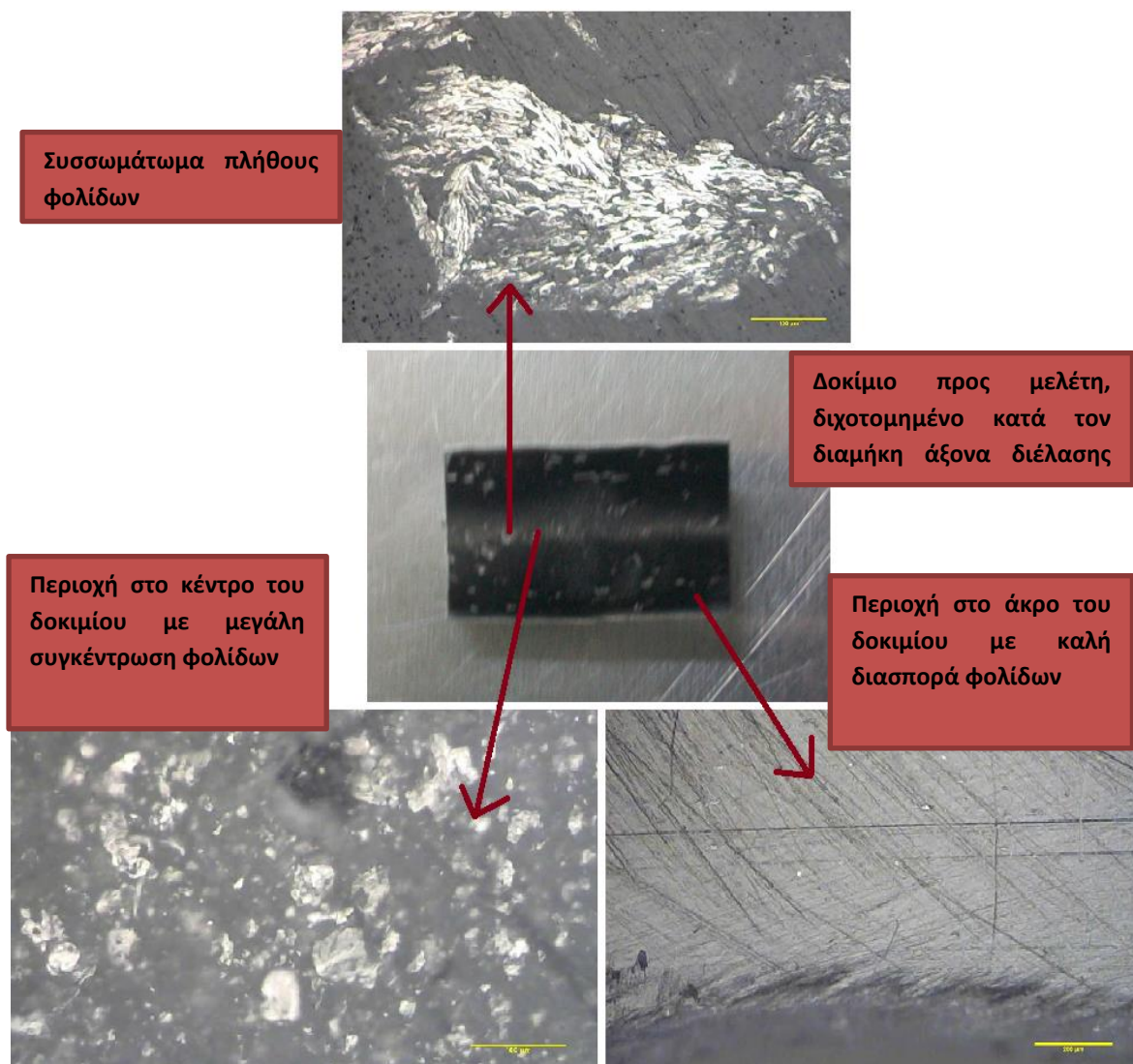
- **Διασπορά εγκλεισμάτων**

Πέρα από την ποιότητα εμποτισμού, άλλη μια ιδιαίτερη παράμετρος στα σύνθετα υλικά με εγκλείσματα αφορά τη διασπορά των εγκλεισμάτων, καθώς και την τάση τους, να δημιουργούν συσσωματώματα μέσα στο υλικό της μήτρας. Παρακάτω τονίζονται τα εγκλείσματα, καθώς και η θέση τους στο περιβάλλον της μήτρας.

- **Χαρακτηριστικά αστοχίας**

Ένας από τους συνήθεις μηχανισμούς αστοχίας συνθέτων υλικών ενισχυμένων με σωματίδια είναι η αποκόλληση της μήτρας σε σημεία μεγάλης συγκέντρωσης συσσωματωμάτων των εγκλεισμάτων.

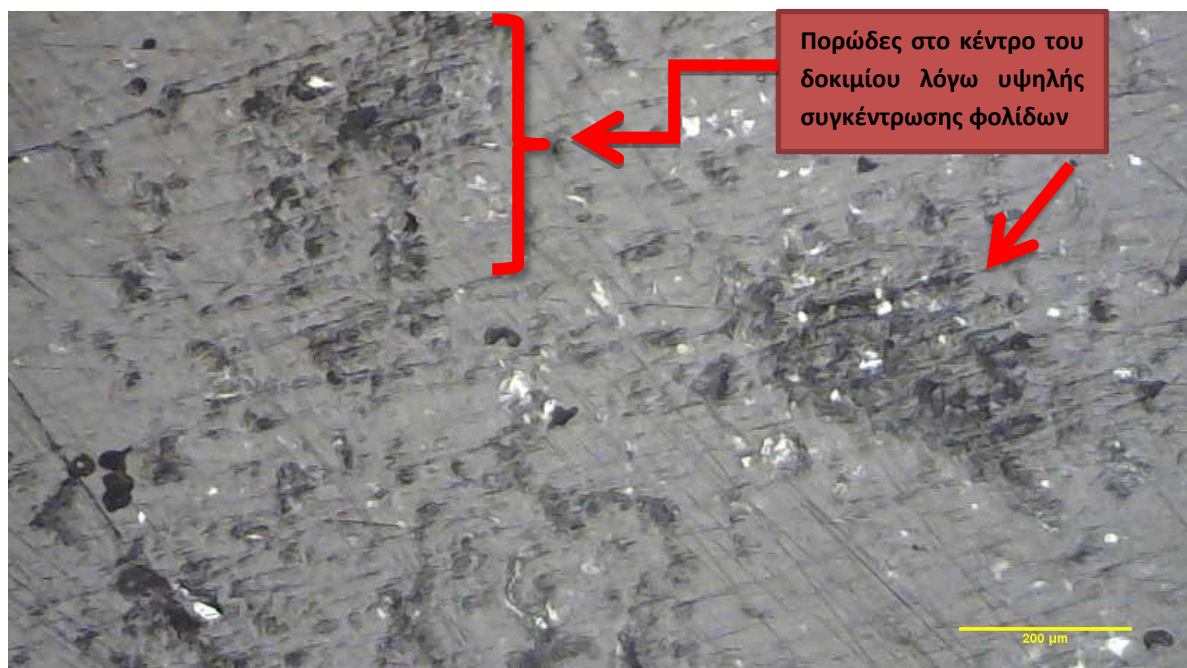
### 5.1.1.1 Μελέτη μικροδομής πολυαιθυλενικής μήτρας



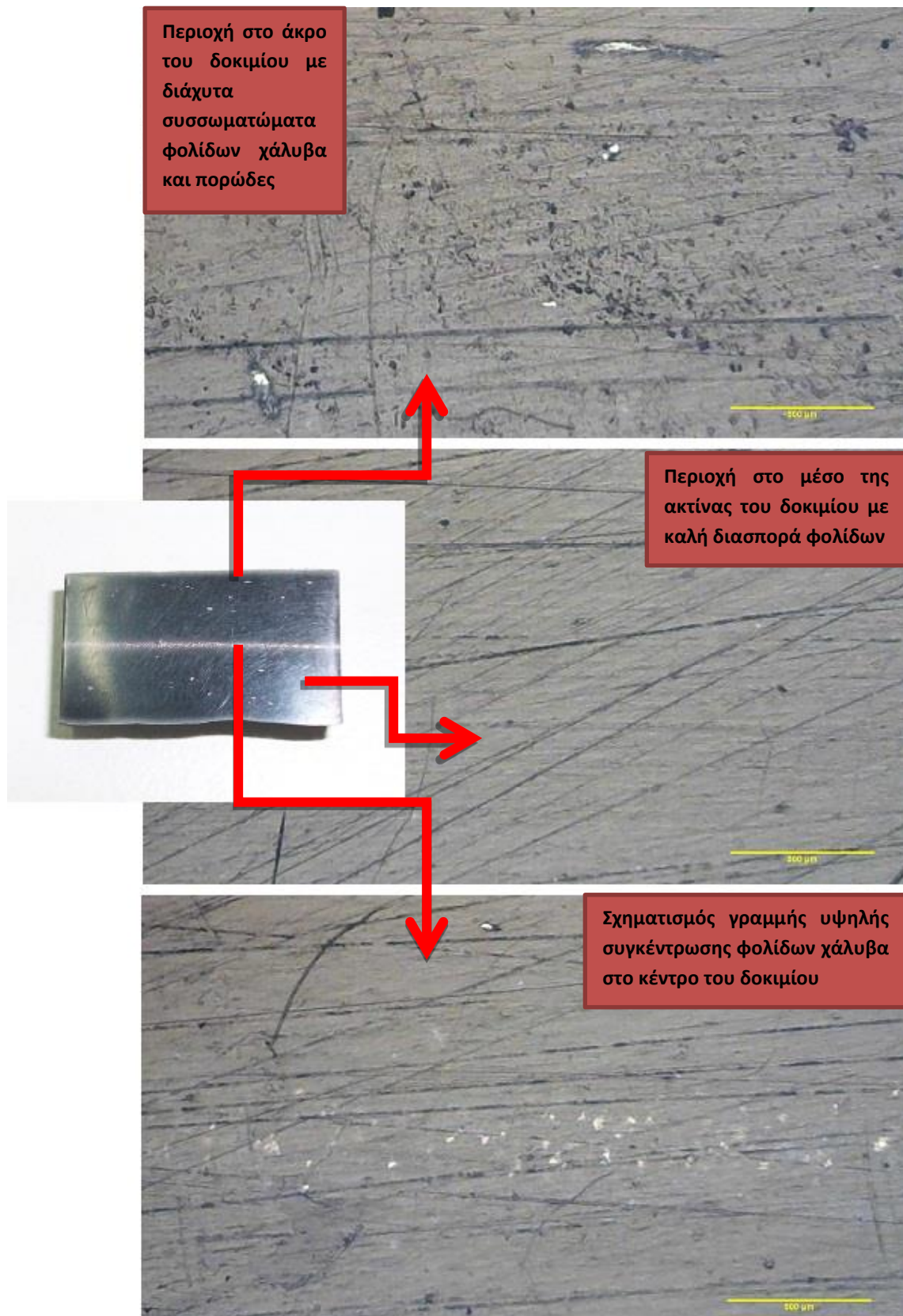
Εικόνα 5.2 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) τριών διαφορετικών σημείων σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.3 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα

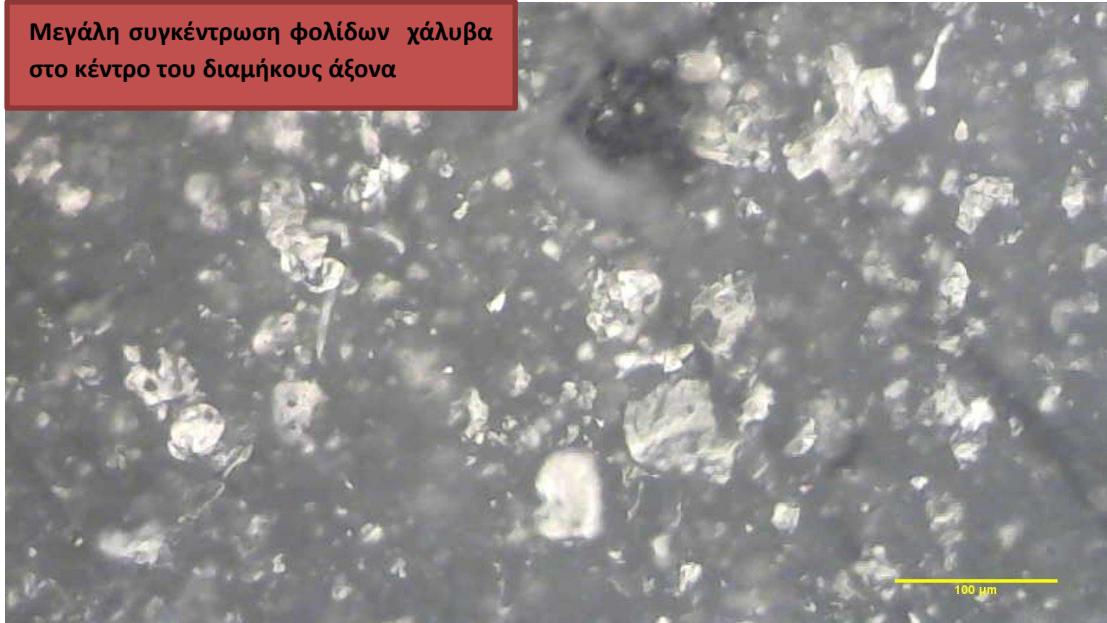


Εικόνα 5.4 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.5 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) τριών διαφορετικών σημείων σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα

Μεγάλη συγκέντρωση φολίδων χάλυβα  
στο κέντρο του διαμήκους άξονα

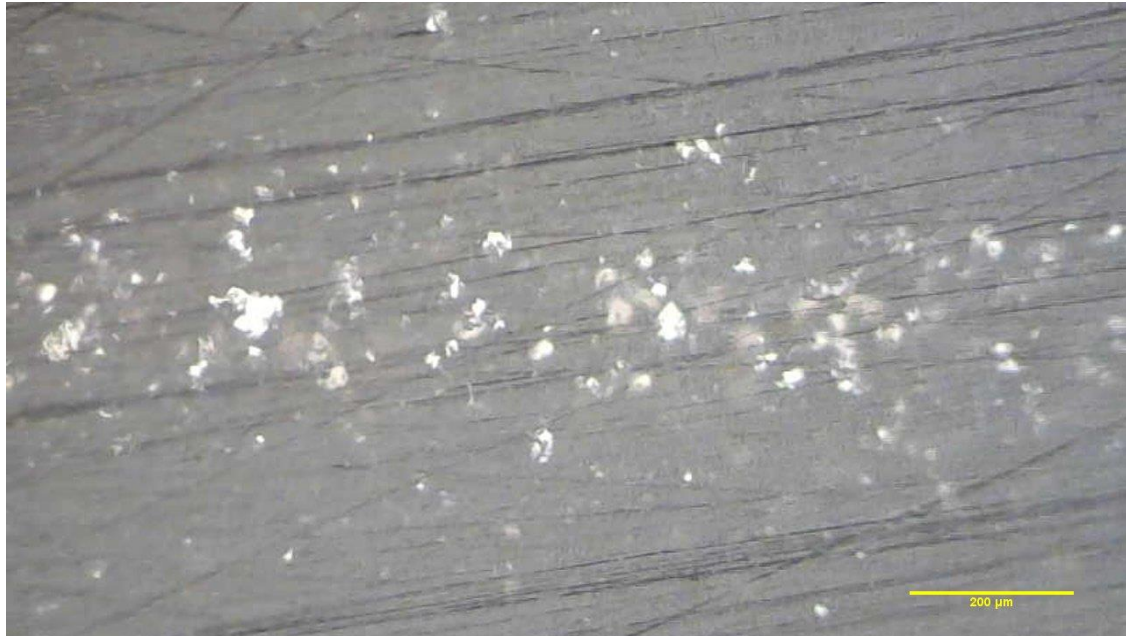


Εικόνα 5.6 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα

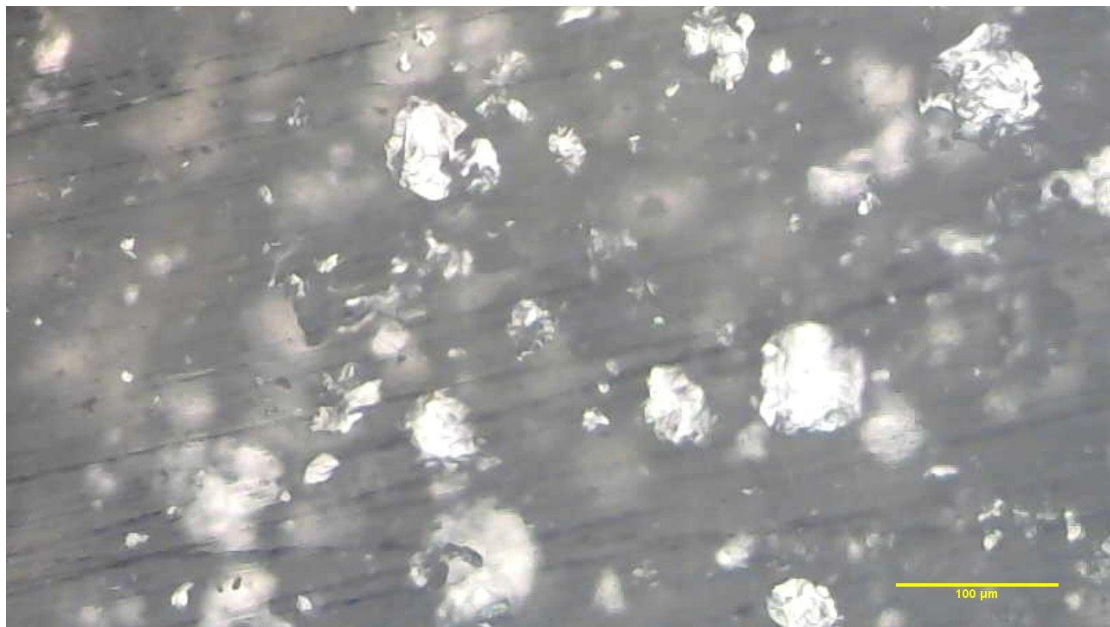
Συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα



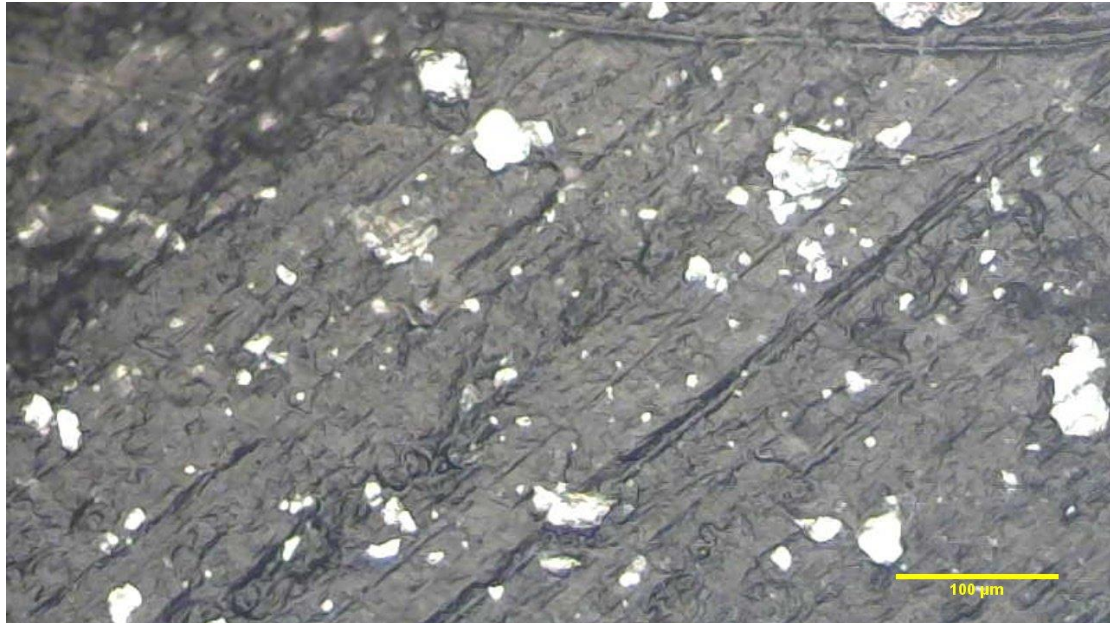
Εικόνα 5.7 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.8 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση φολίδων στο κέντρο του δοκιμίου.



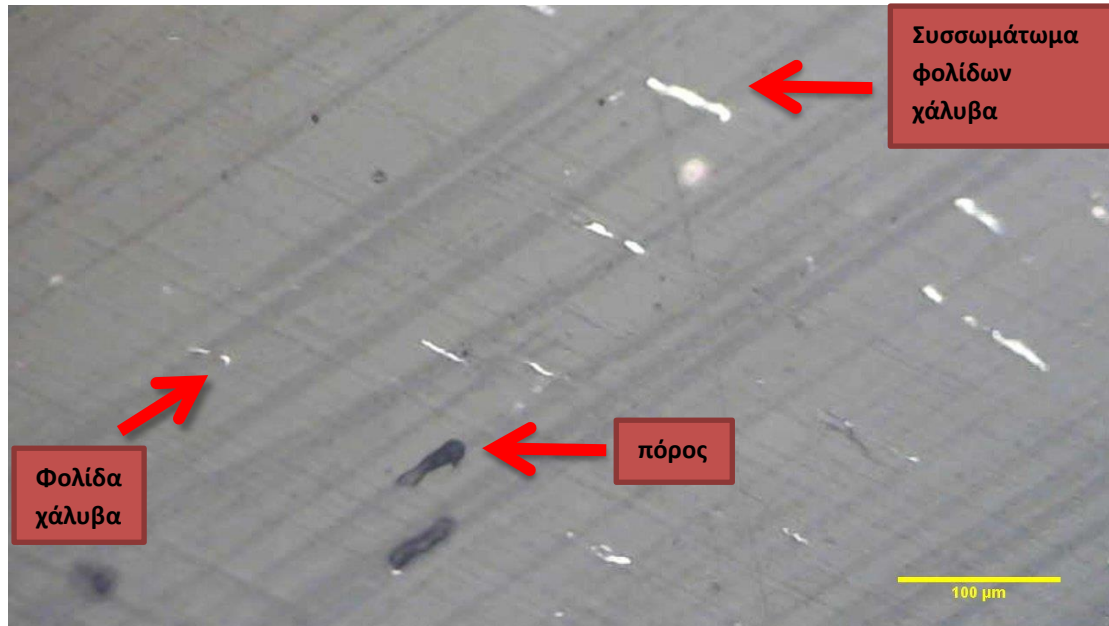
Εικόνα 5.9 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα



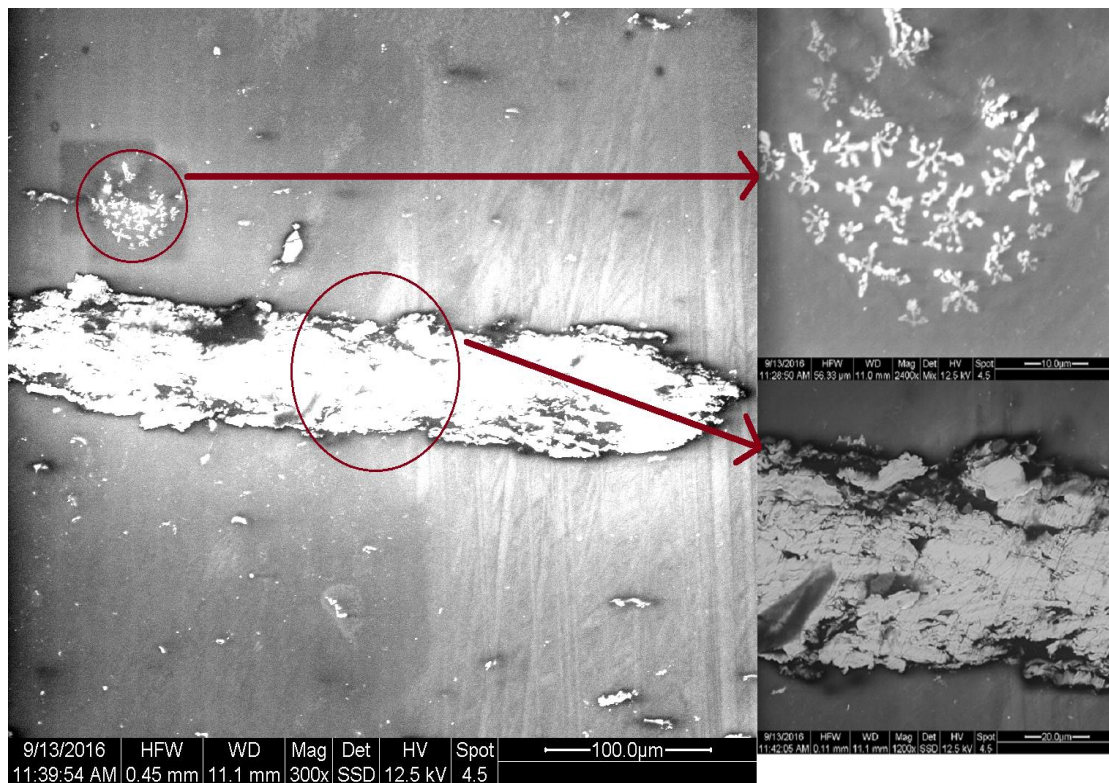
Εικόνα 5.10 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.11 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, παρατηρείται συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα

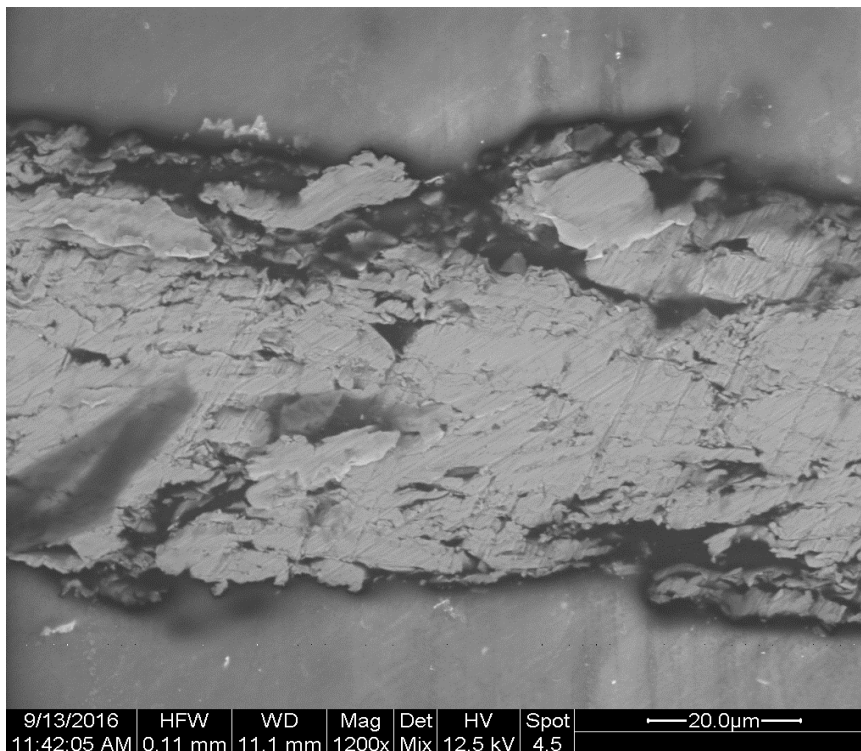


Εικόνα 5.12 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα

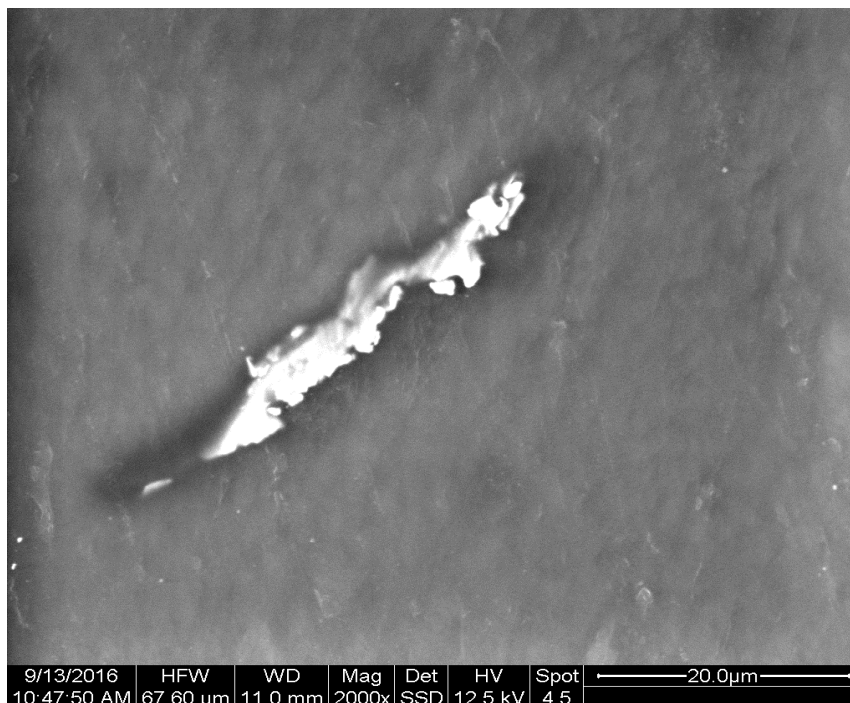


Εικόνα 5.13 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x300) που δείχνει λεπτομέρειες από ομοιόμορφη διασπορά φολίδων και από συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα αλλά και υπεροξειδία (πάνω βέλος) (περιεκτικότητα 5% wt SSF) σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου

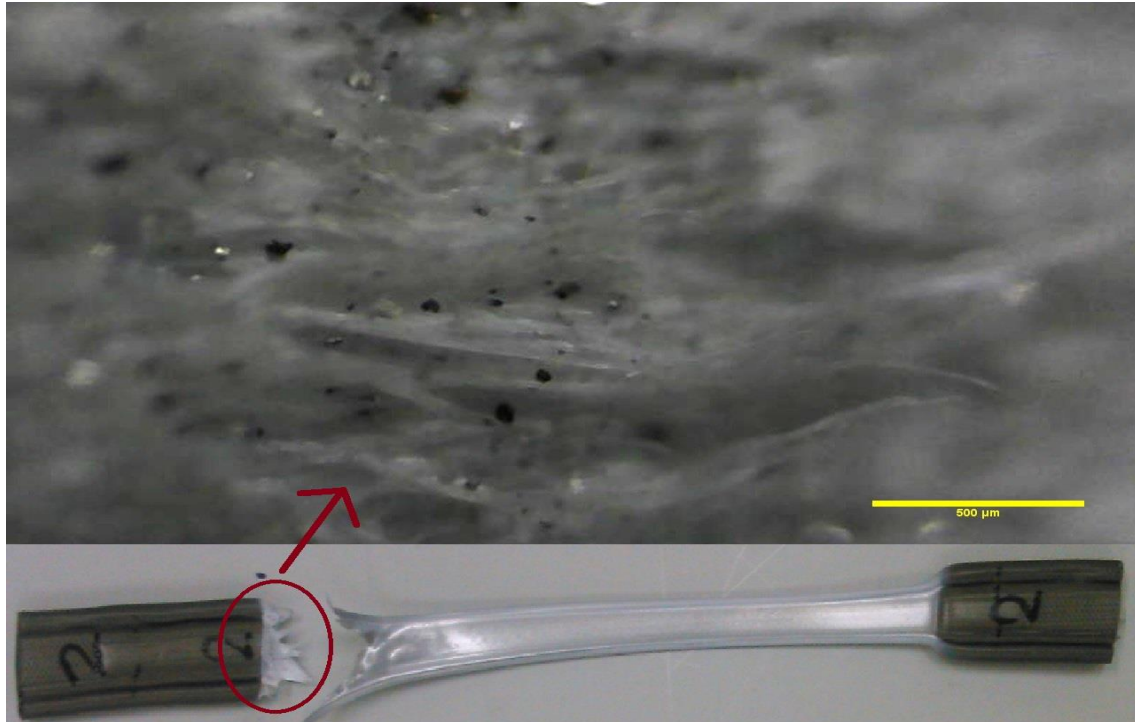




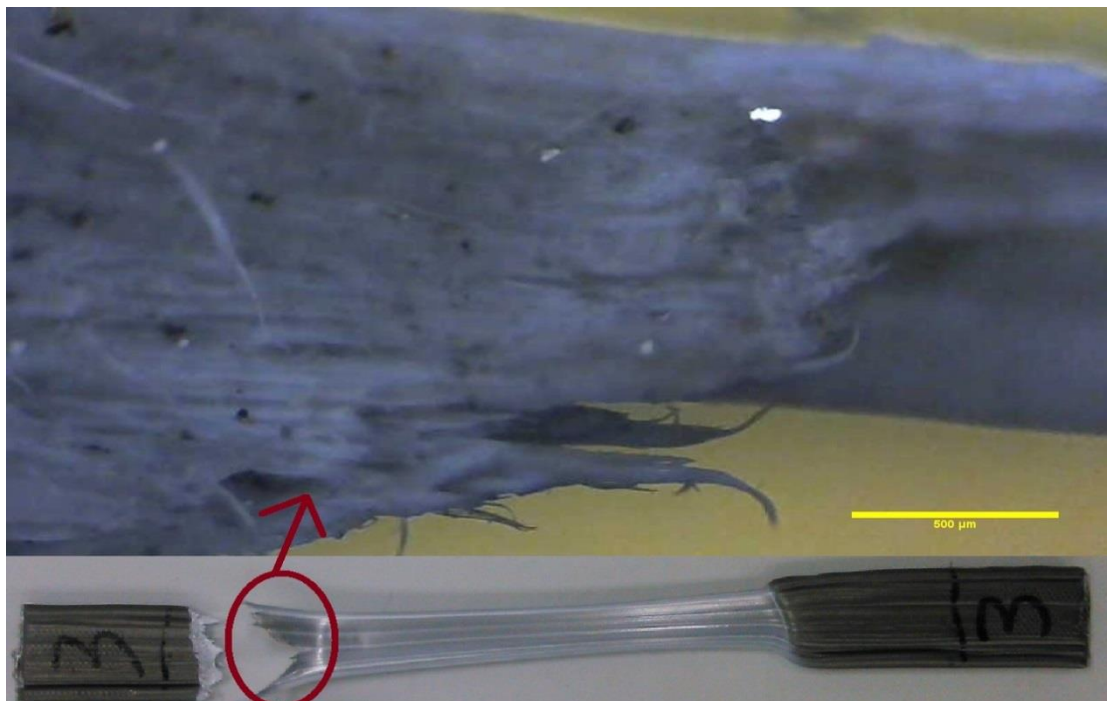
Εικόνα 5.14 Αποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x2000) που δείχνει συσσωμάτωμα φολίδων χάλυβα από την πλάγια όψη της σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου (περιεκτικότητα 5%)



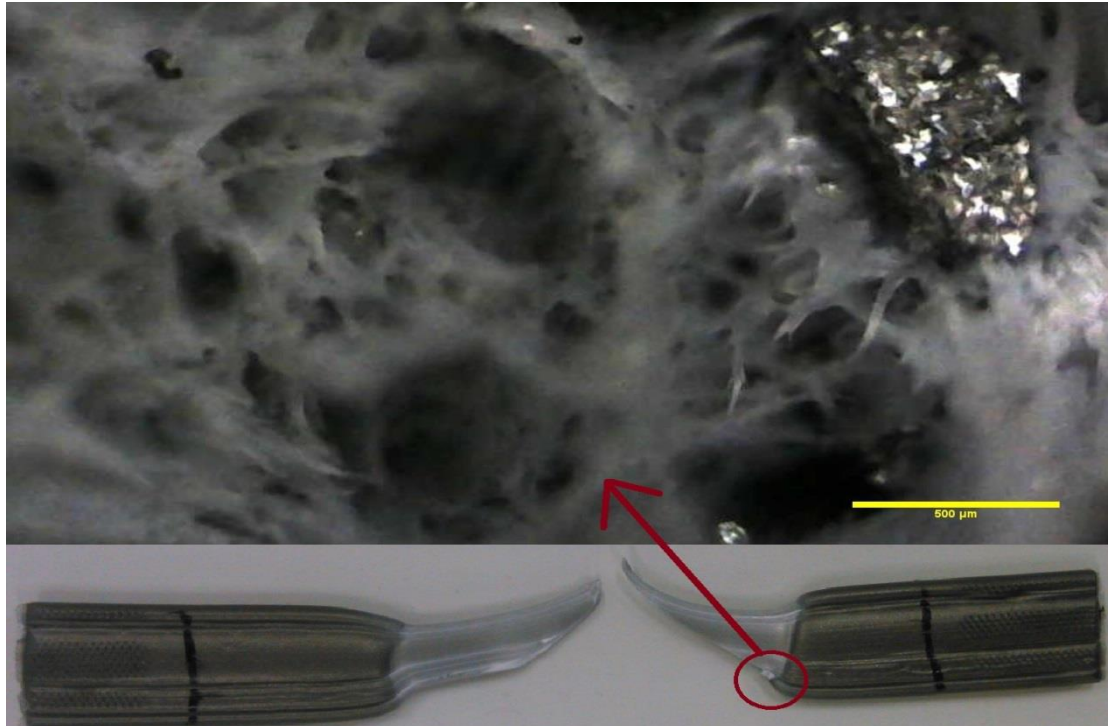
Εικόνα 5.15 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x2000) που δείχνει φολίδα χάλυβα από την πλάγια όψη της σε δοκίμιο πολυαιθυλενίου (περιεκτικότητα 5%)



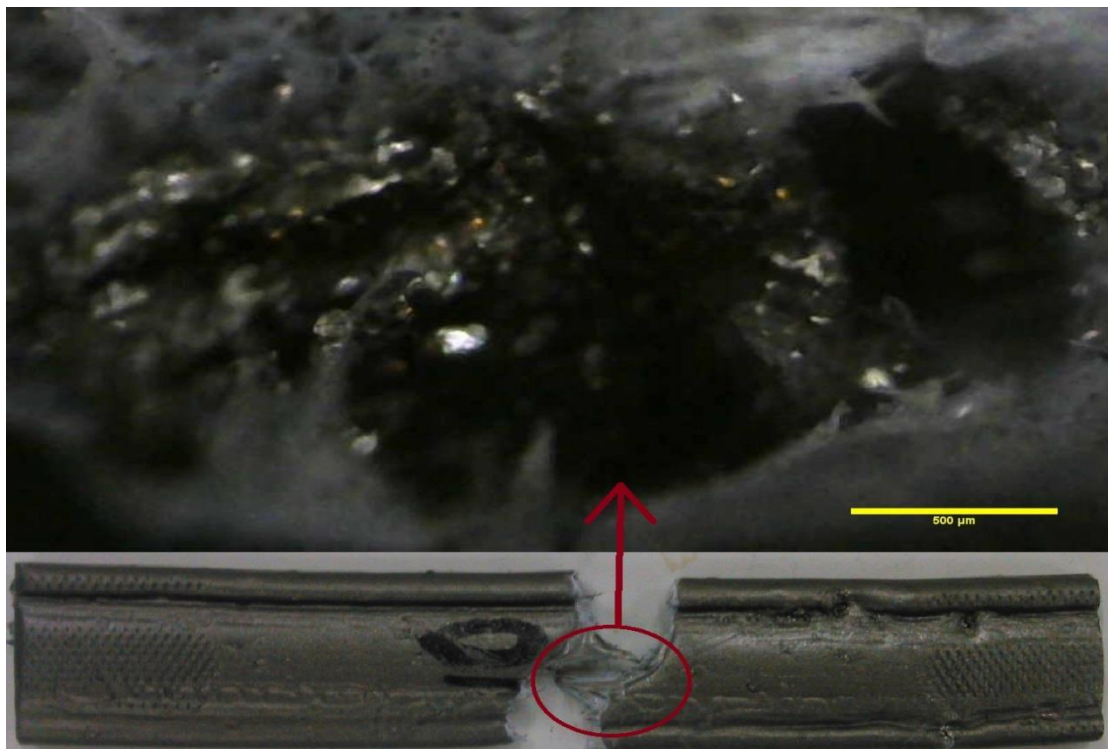
Εικόνα 5.16 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η δομή της περιοχής θραύσης.



Εικόνα 5.17 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η δομή της περιοχής θραύσης.

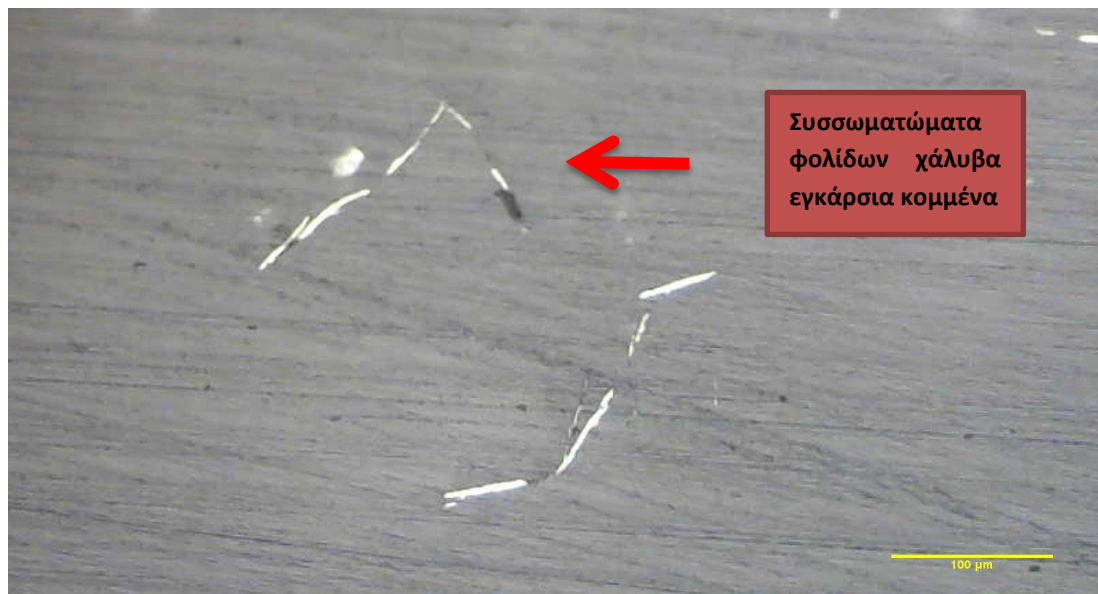


Εικόνα 5.18 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται θραύση στο σημείο που υπήρχαν συσσωματώματα.



Εικόνα 5.19 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται θραύση στο σημείο που υπήρχαν συσσωματώματα.

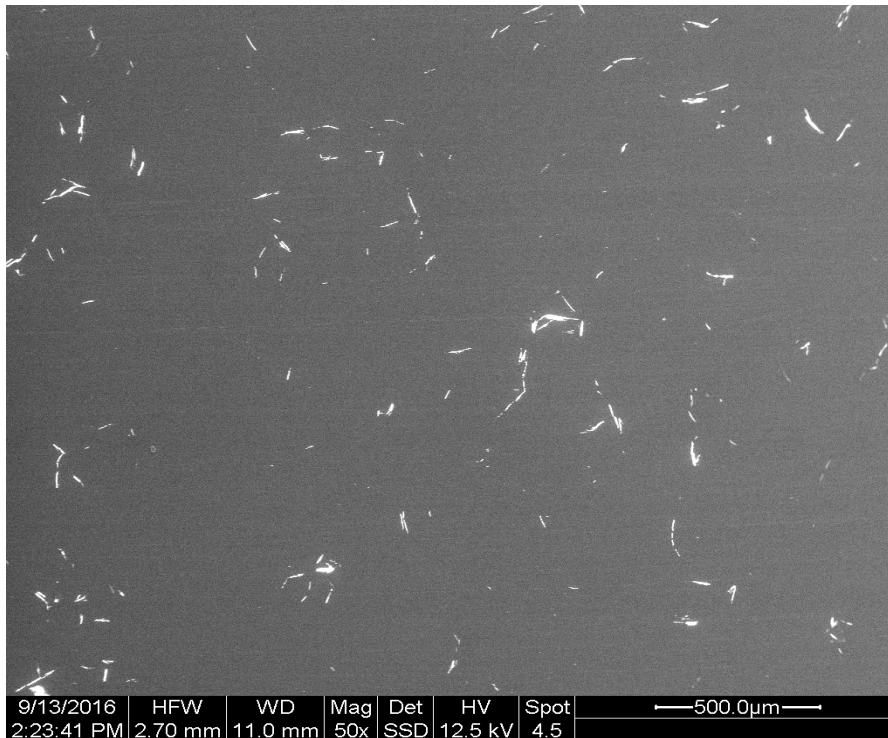
### 5.1.1.2 Μελέτη μικροδομής εποξειδικής μήτρας



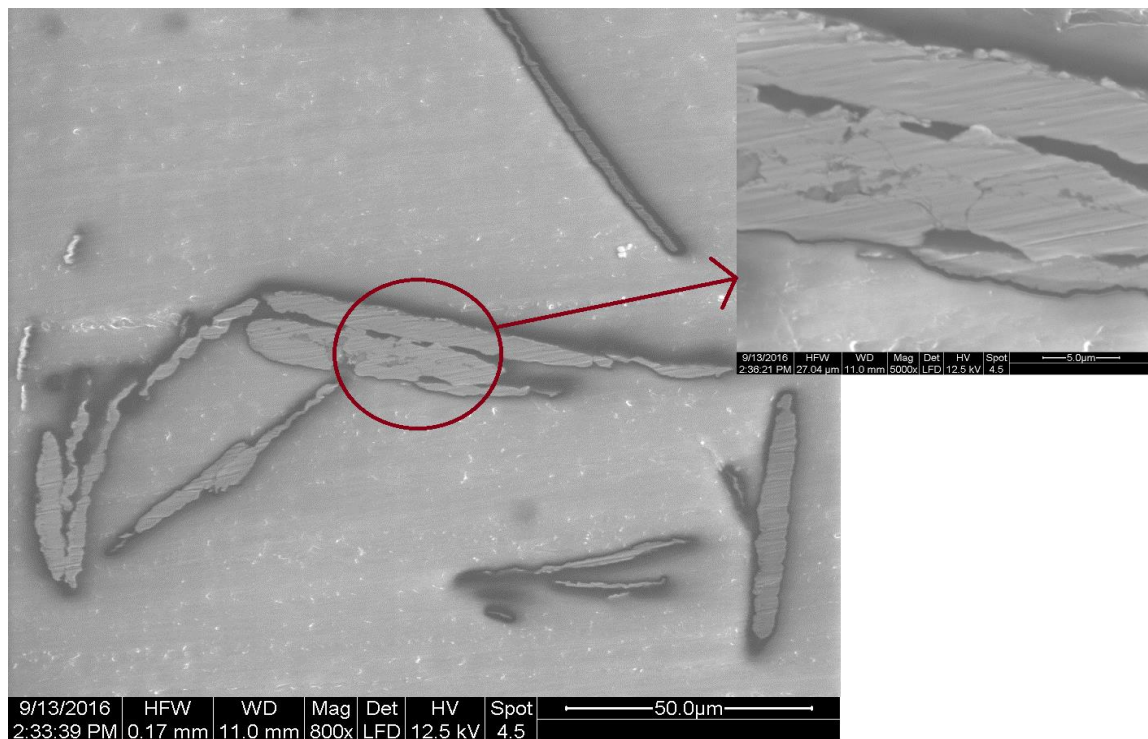
Εικόνα 5.20 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) εγκάρσιας τομής δοκιμίου εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα



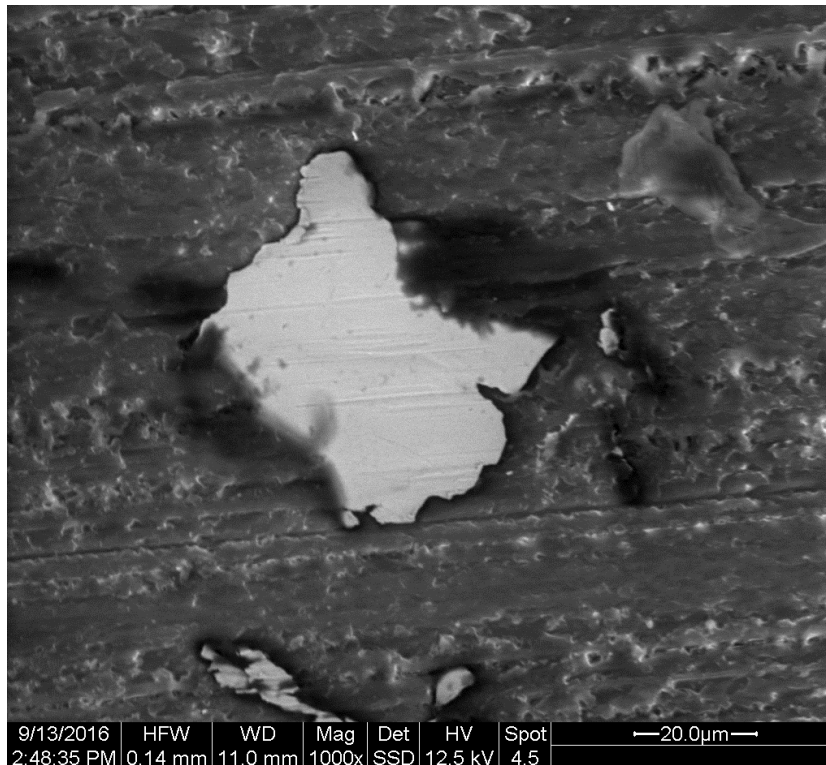
Εικόνα 5.21 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) εγκάρσιας τομής δοκιμίου εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα



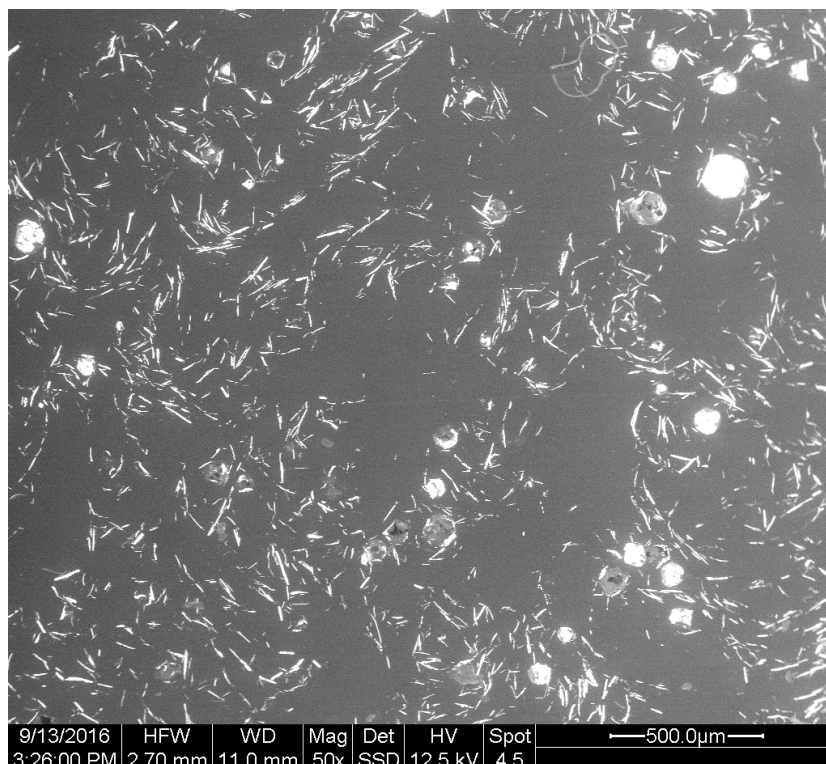
Εικόνα 5.22 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x50) που δείχνει την διασπορά των φολιδων χάλυβα (περιεκτικότητα 1%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης



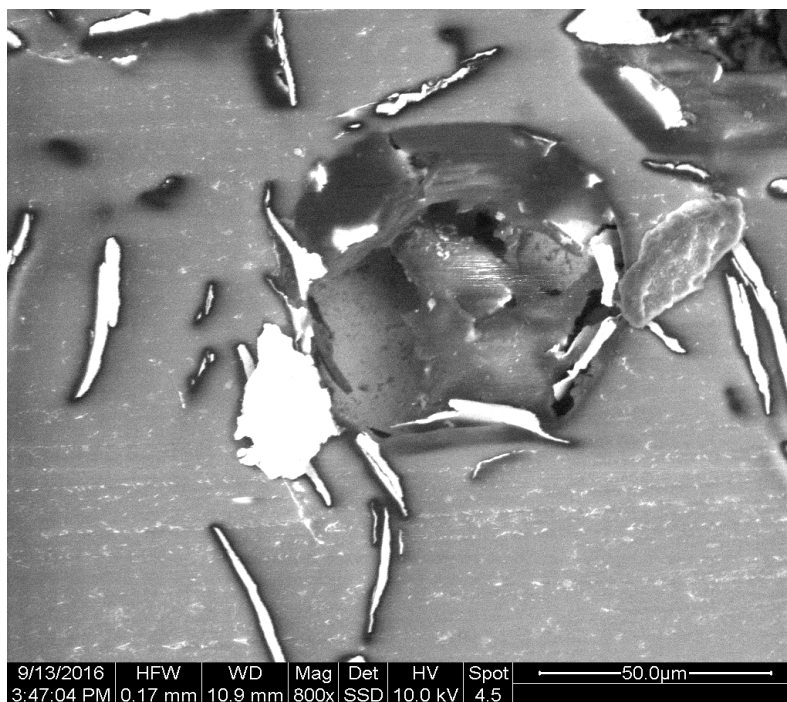
Εικόνα 5.23 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x800) που δείχνει συσσωματώματα φολιδων χάλυβα και λεπτομέρεια αυτών σε μεγαλύτερη εστίαση( x5000) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης (περιεκτικότητα 1%)



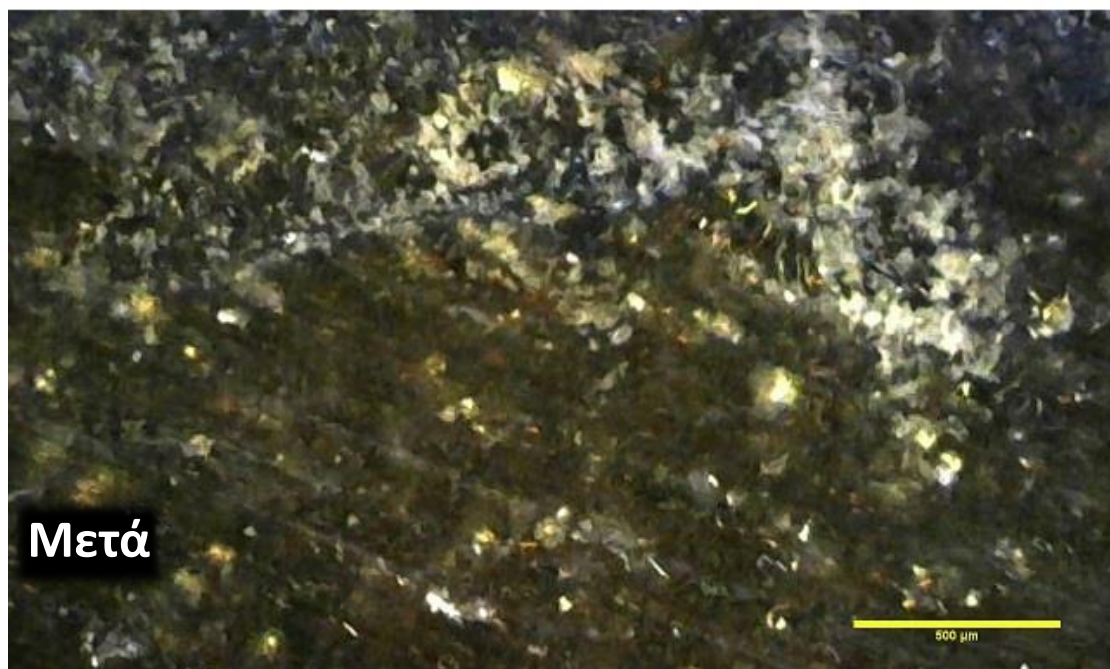
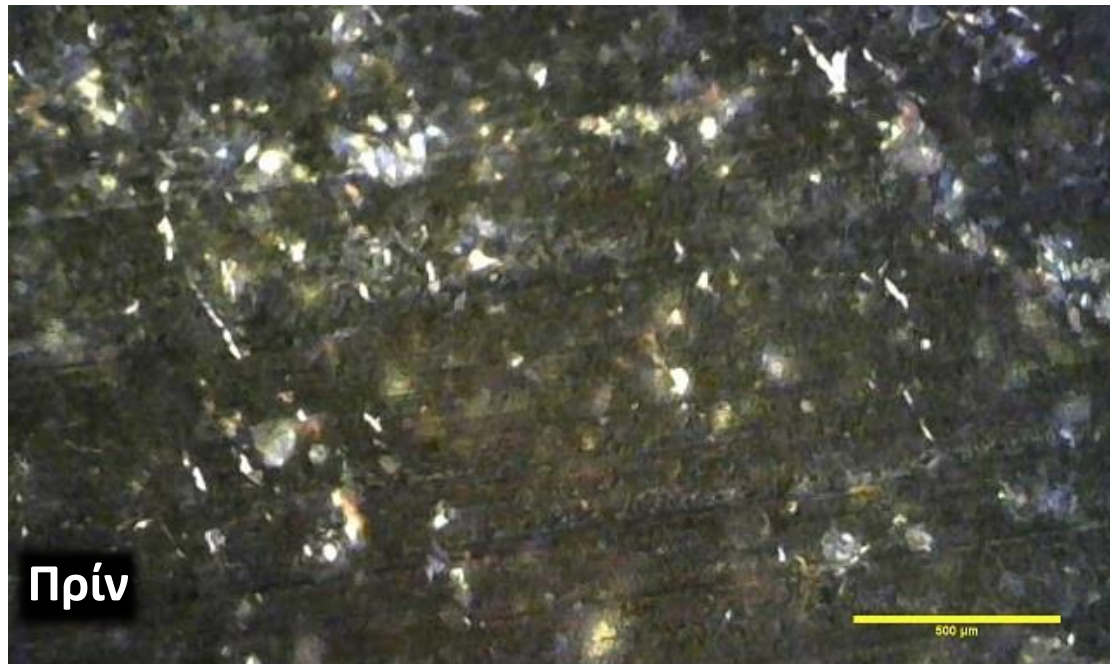
Εικόνα 5.24 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x1000) που δείχνει φολίδα χάλυβα (in plane επίπεδο) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης (περιεκτικότητα 1%)



Εικόνα 5.25 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x50) που δείχνει την ενσωμάτωση των φολίδων χάλυβα και τη δημιουργία πορώδους (περιεκτικότητα 10%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης

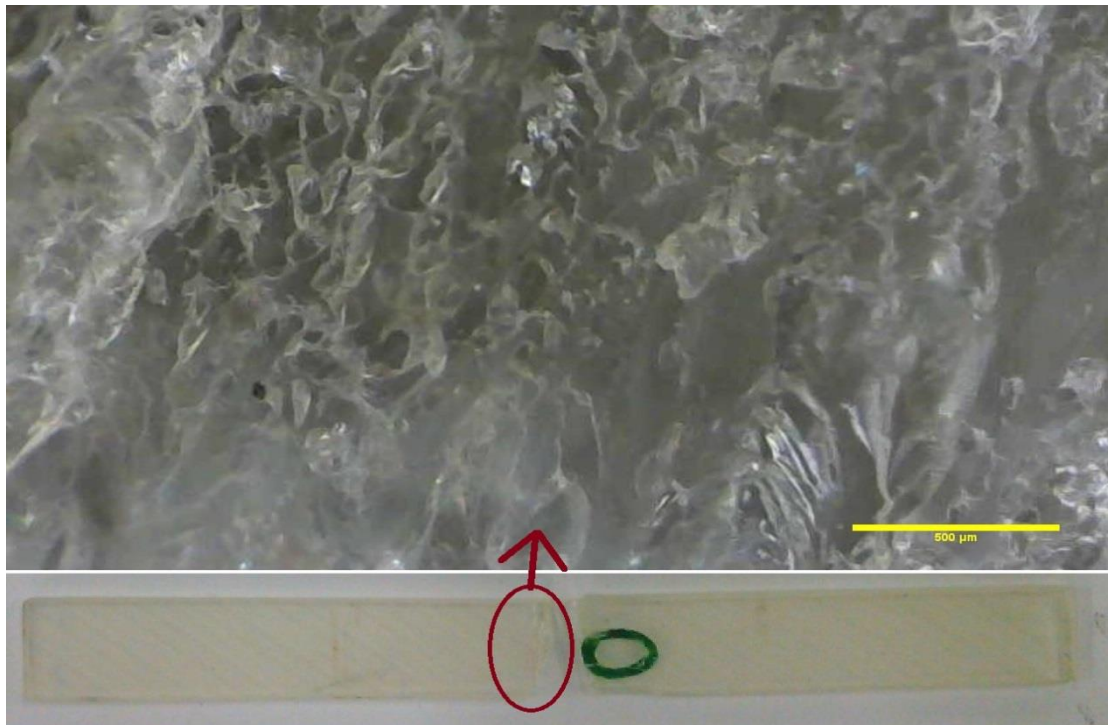


Εικόνα 5.26 Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (μεγέθυνση x800) που δείχνει τη δημιουργία πόρου ανάμεσα σε συσσωματώματα φολίδων χάλυβα (περιεκτικότητα 10%) σε δοκίμιο εποξικής ρητίνης

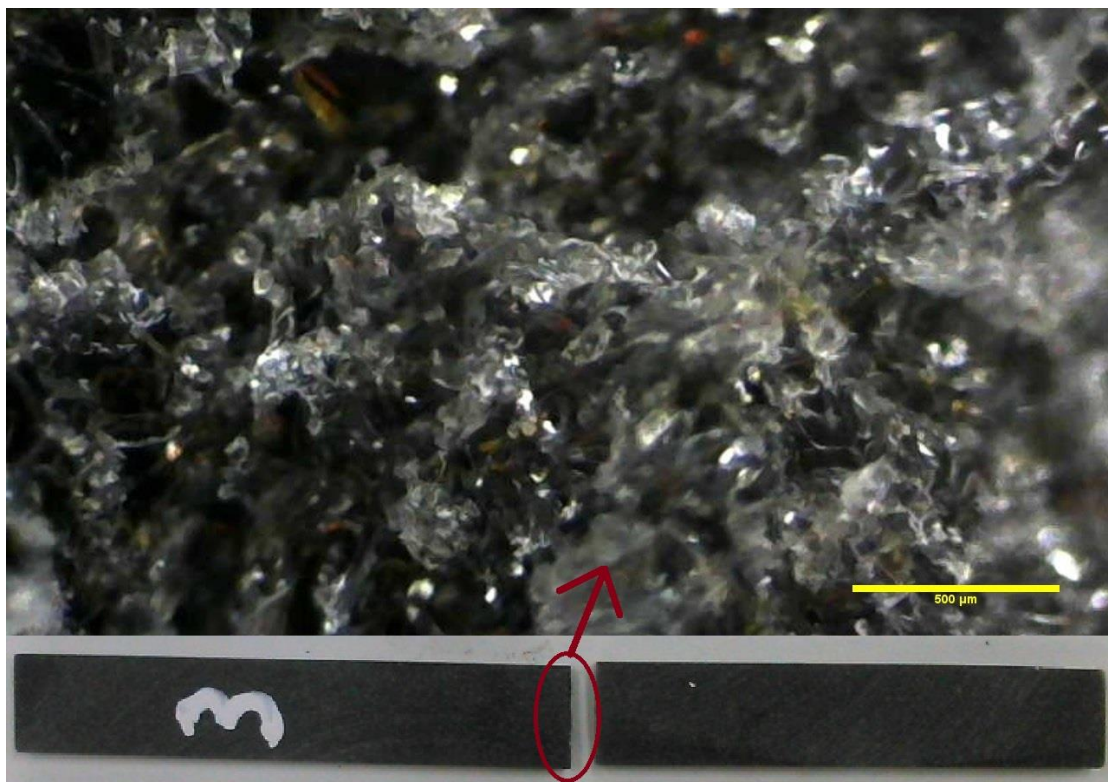


Εικόνα 5.27 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα, πριν και μετά από εφελκυστική καταπόνηση. Παρατηρείται σημείο κοντά στη θραύση .

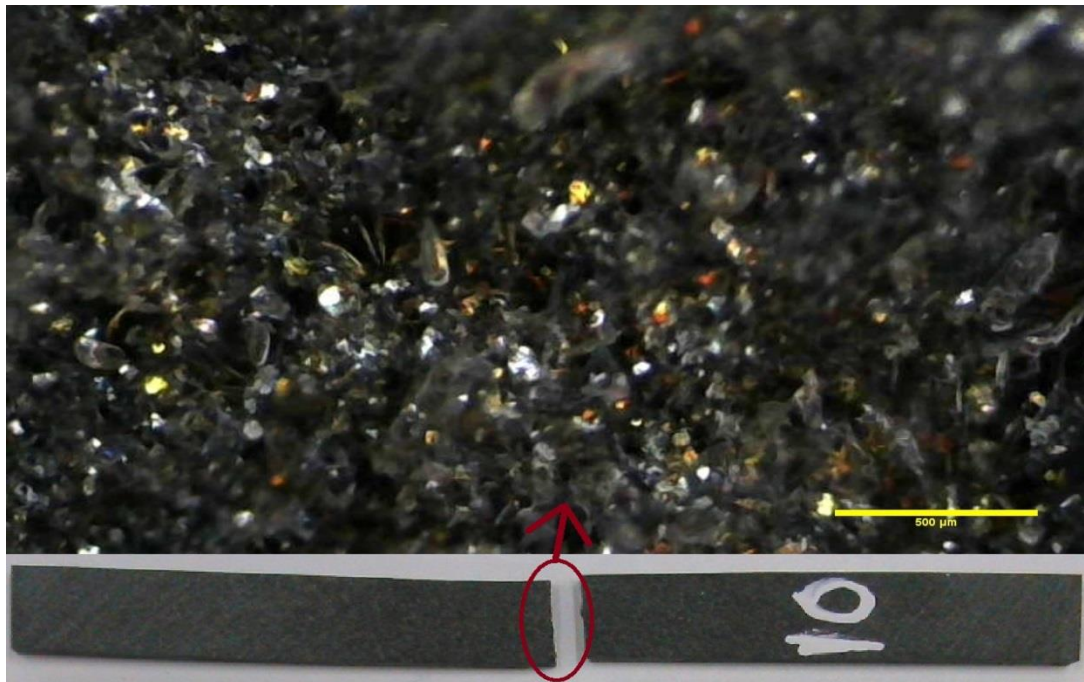




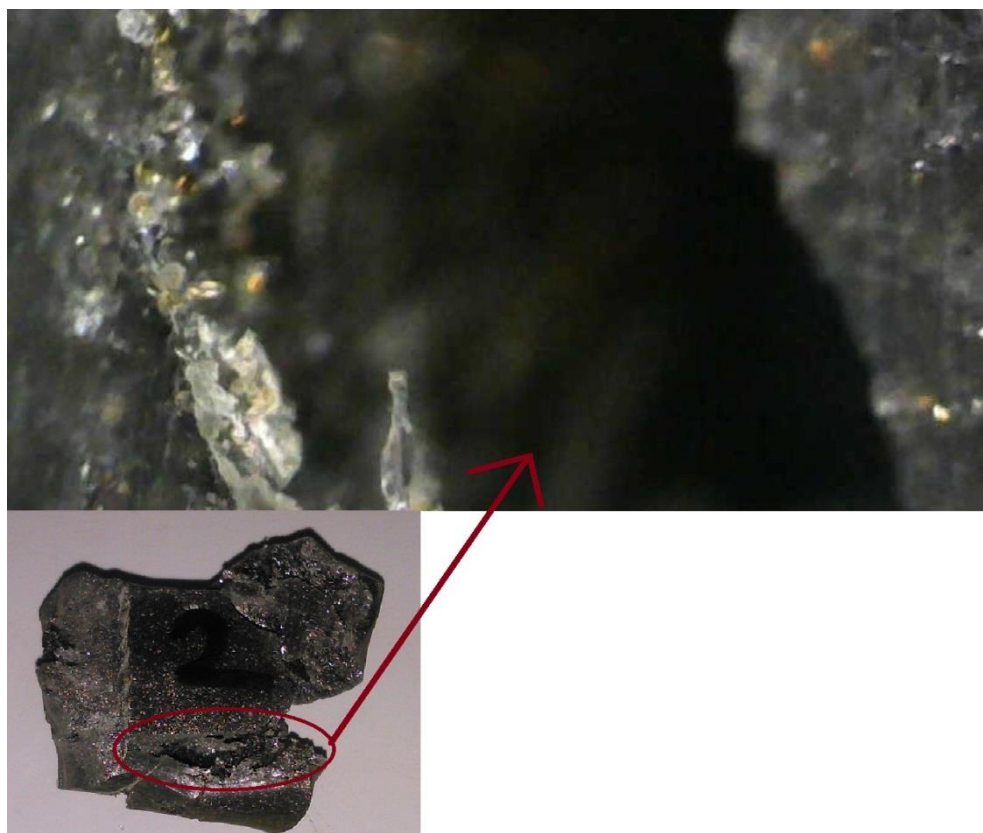
Εικόνα 5.28 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου καθαρής εποξικής ρητίνης (μήτρα), κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης.



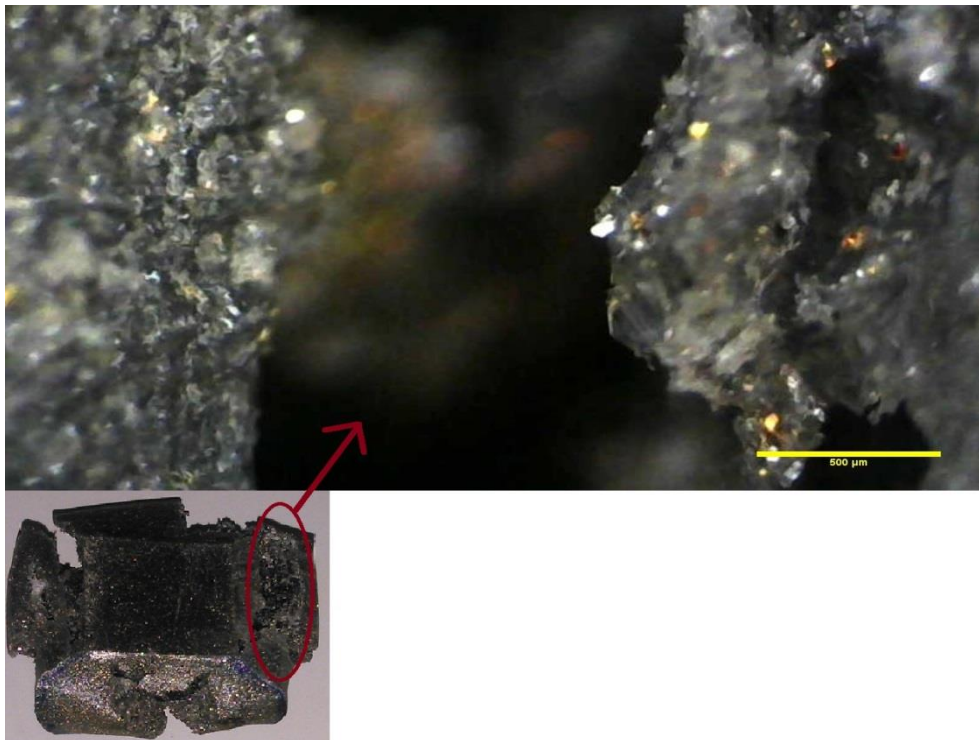
Εικόνα 5.29 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης.



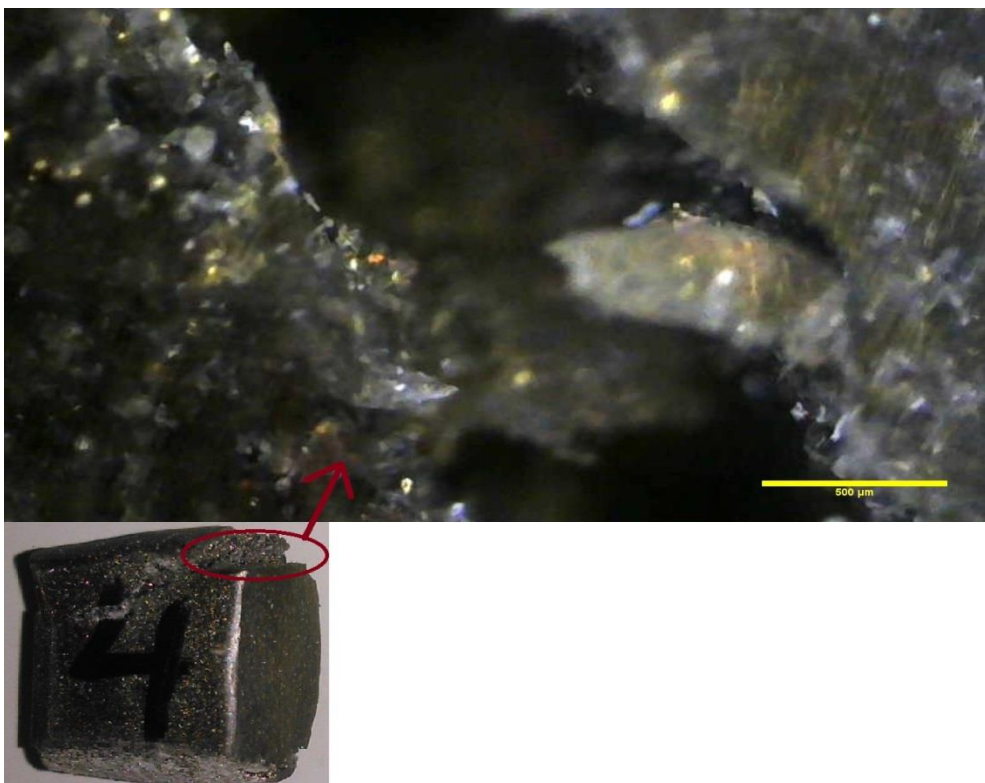
Εικόνα 5.30 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται η επιφάνεια της θραύσης.



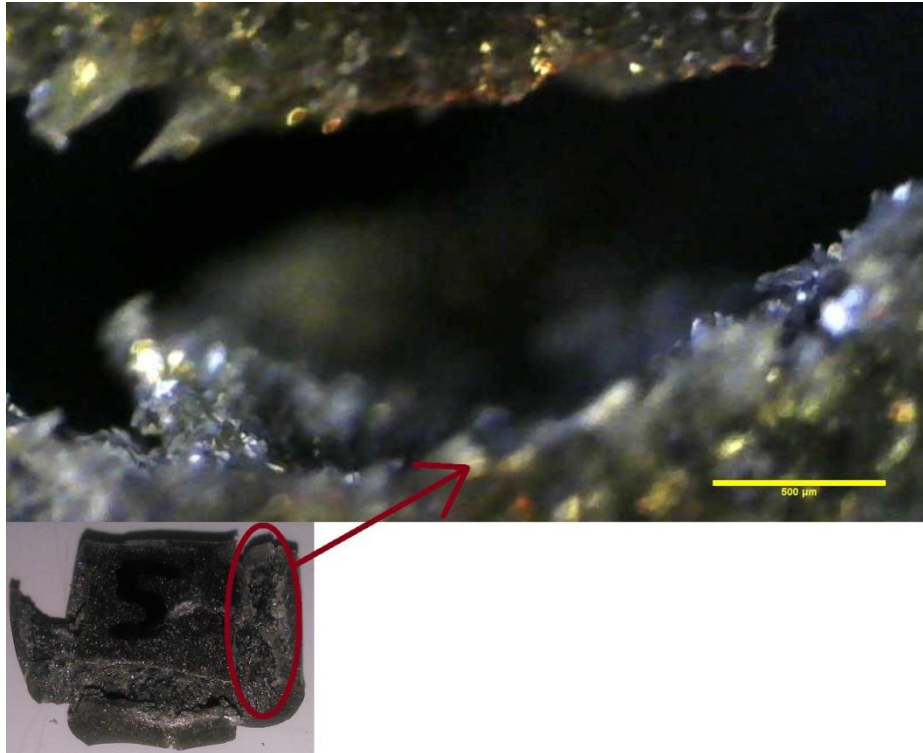
Εικόνα 5.31 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης. Παρατηρείται ρηγμάτωση.



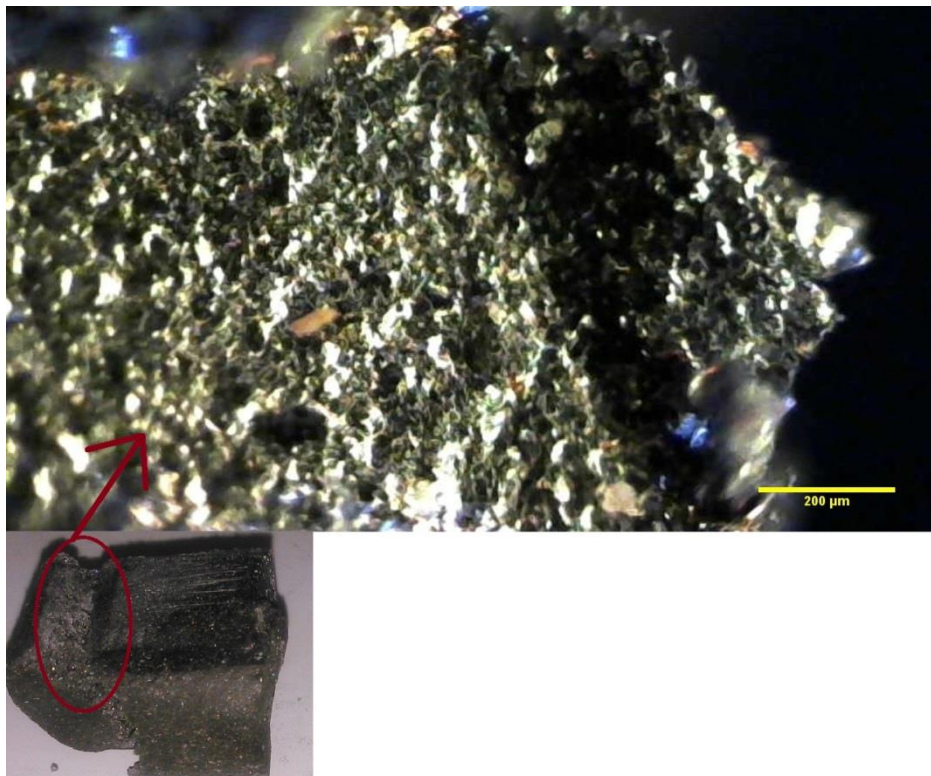
Εικόνα 5.32 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση.



Εικόνα 5.33 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση.



Εικόνα 5.34 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση.

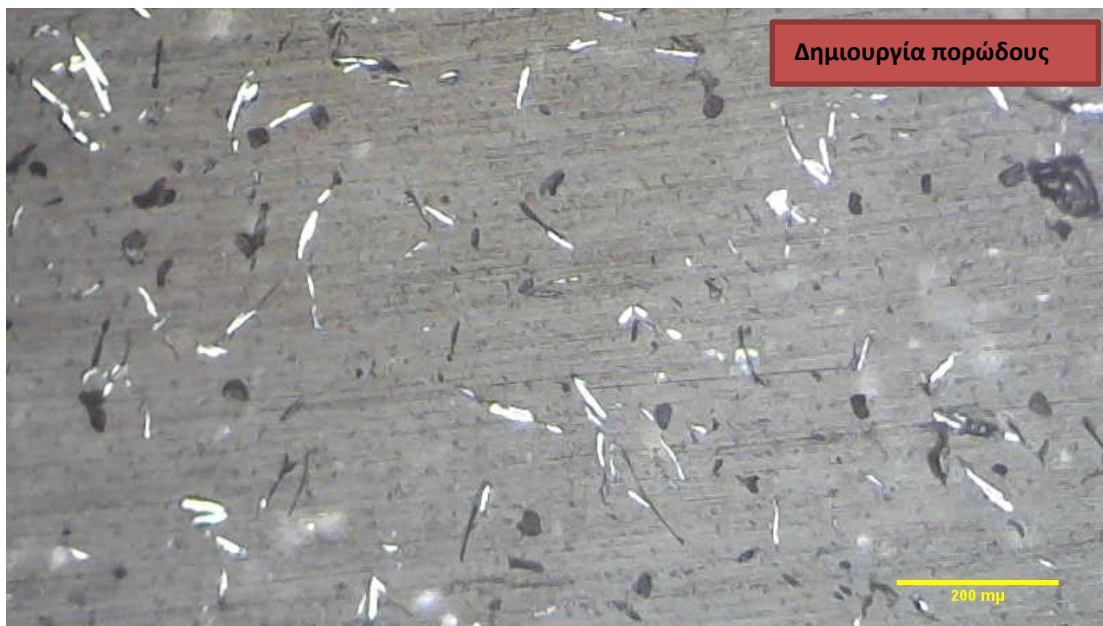


Εικόνα 5.35 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγμάτωση.

### 5.1.1.3 Μελέτη μικροδομής μεθακρυλικής μήτρας



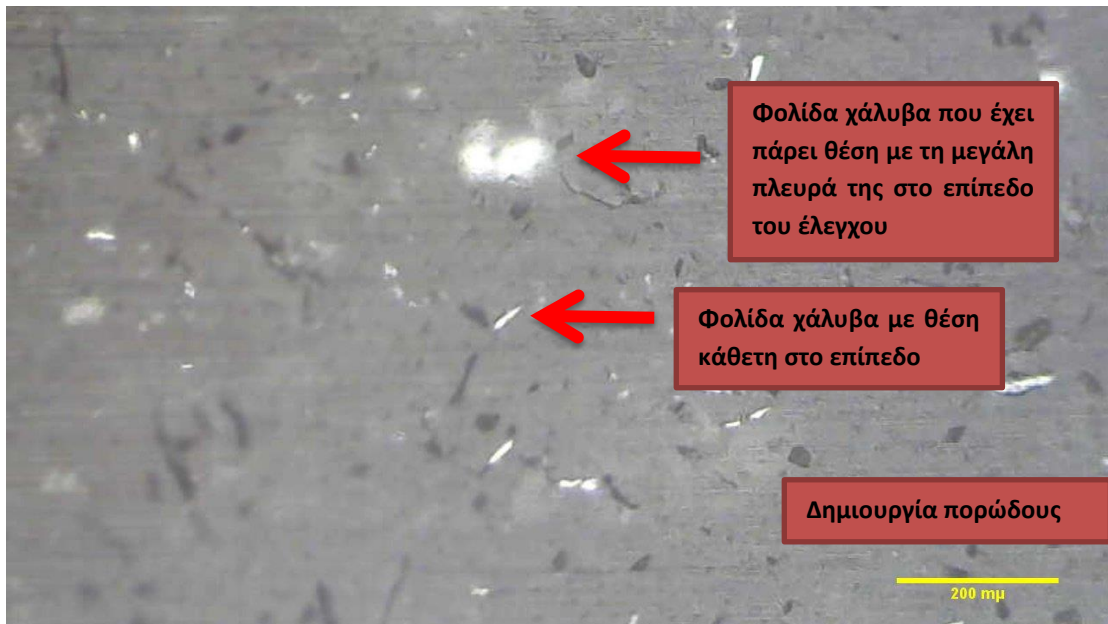
Εικόνα 5.36 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.37 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα



Εικόνα 5.38 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 3% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα



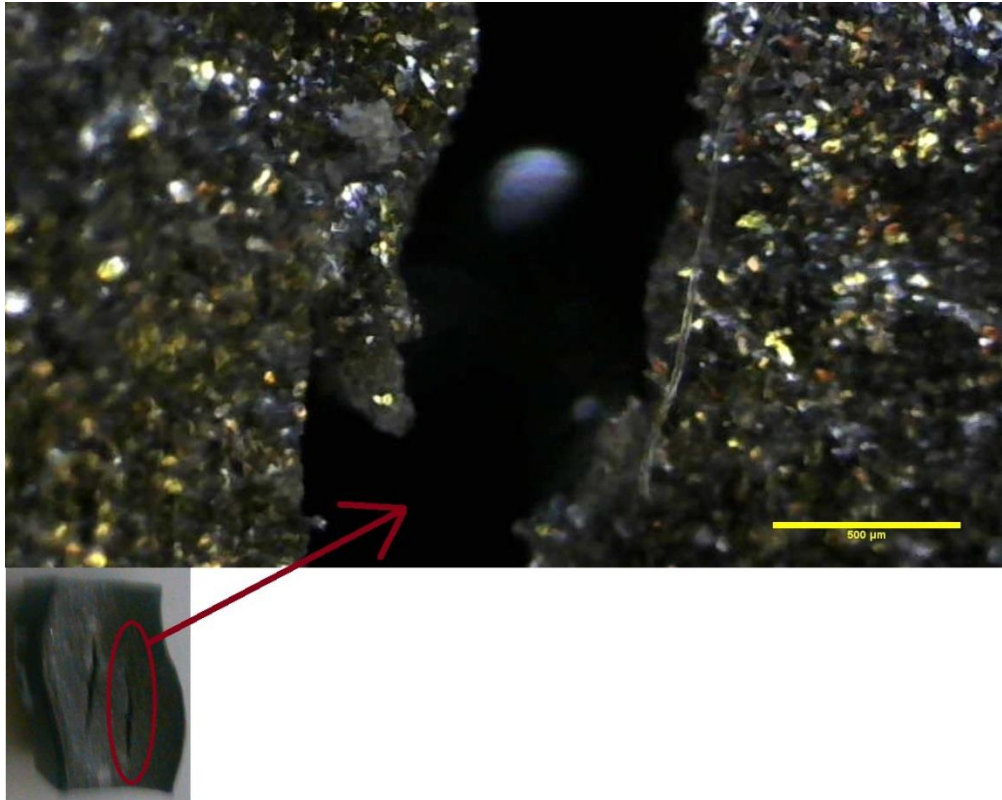
Εικόνα 5.39 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) εγκάρσιας τομής δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα



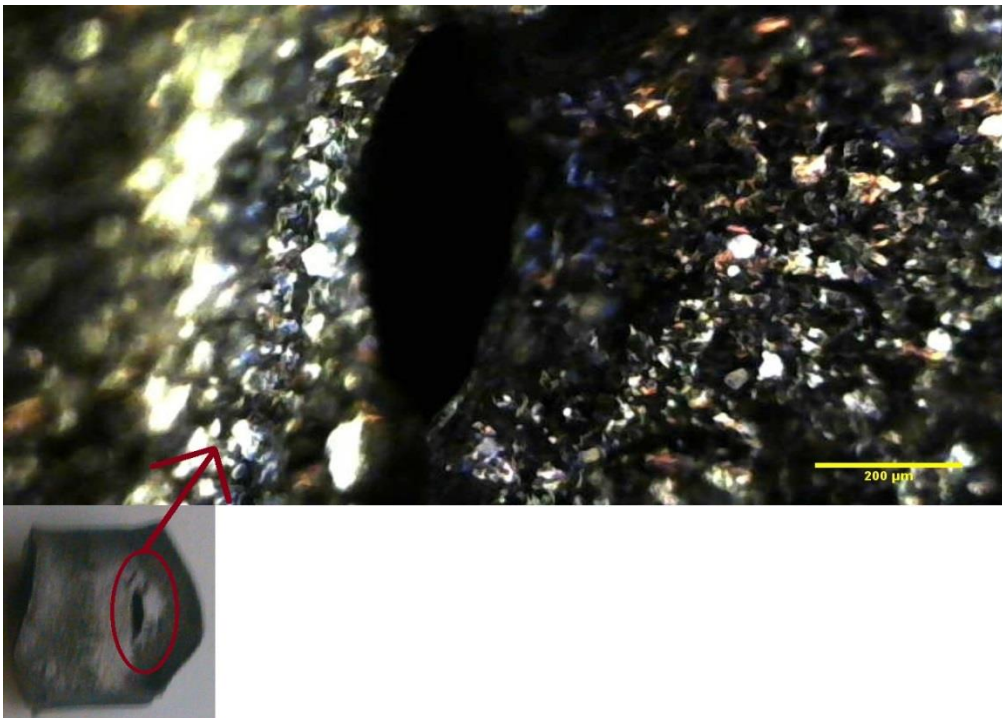
Εικόνα 5.40 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα



Εικόνα 5.41 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) δοκιμίου καθαρής μεθακρυλικής ρητίνης



Εικόνα 5.42 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 5% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγματώση.

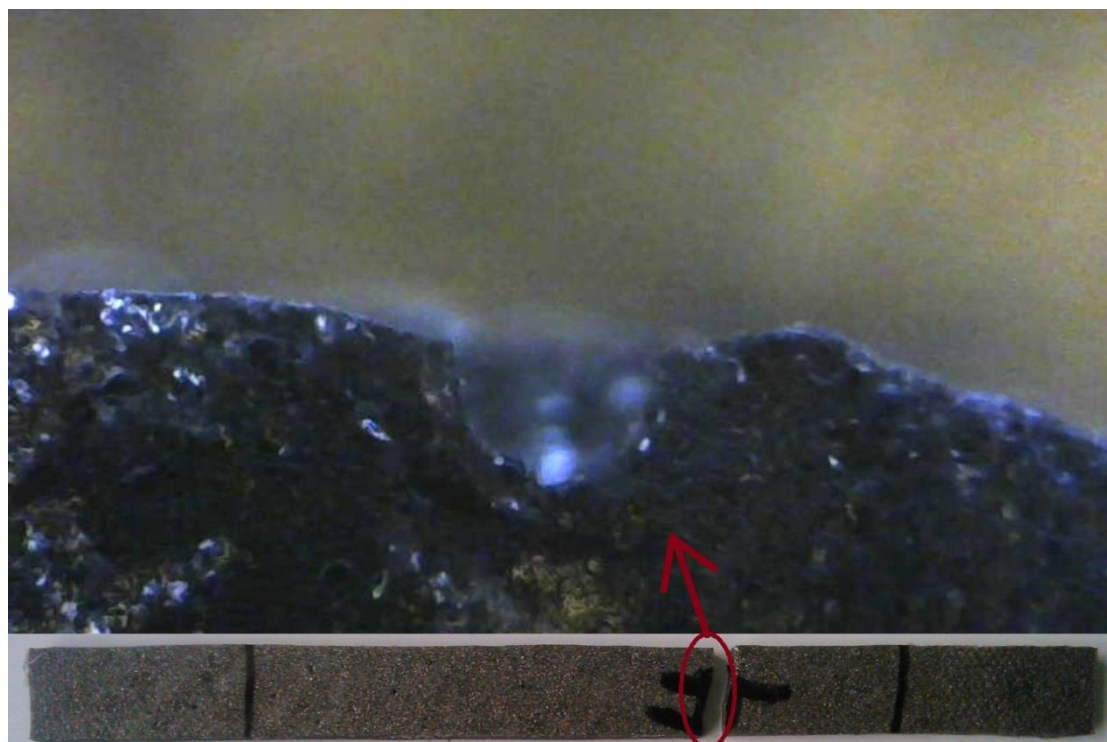


Εικόνα 5.43 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν θλιπτικής καταπόνησης . Παρατηρείται ρηγματώση.





Εικόνα 5.44 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται διάδοση ρωγμών από πόρο του υλικού.



Εικόνα 5.45 Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) δοκιμίου μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα, κατόπιν εφελκυστικής καταπόνησης. Παρατηρείται θραύση σε σημείο όπου αρχικά υπήρχε πόρος.



## 5.2 Σκληρομέτρηση

Προκειμένου να προσδιοριστεί η σκληρότητα του κάθε δοκιμίου, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σκληρομέτρηση κατά Vickers με βάρος διείδυσης 5 kp και χρόνο διείδυσης 15 sec. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε διάφορα σημεία της επιφάνειας κάθε δοκιμίου προκειμένου να προσδιοριστεί η μέση σκληρότητά του. Σε κάθε σκληρομέτρηση, μετρήθηκε η μέση διάμετρος του αποτυπώματος του διειδυτή. Με την μέση διάμετρο και την τυποποίηση κατά Vickers προσδιορίζεται τελικά η σκληρότητα του υλικού. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που έγιναν παρουσιάζονται, για κάθε υλικό, στους παρακάτω πίνακες. Ακολουθούν οι πίνακες των αποτελεσμάτων σκληρομέτρησης για δοκίμια πολυαιθυλενίου και εποξειδικής ρητίνης. Για την μεθακρυλική ρητίνη δεν έγιναν δοκιμές λόγω της πολύ ελαστικής συμπεριφοράς της σε οποιοδήποτε φορτίο.

	HDPE με πρόσμιξη φολίδων χάλυβα						
Περιεκτικότητα σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα	0%	1%	2%	3%	4%	5%	10%
Σκληρότητα( shore A)	85	90	90	92.9	95	96	98

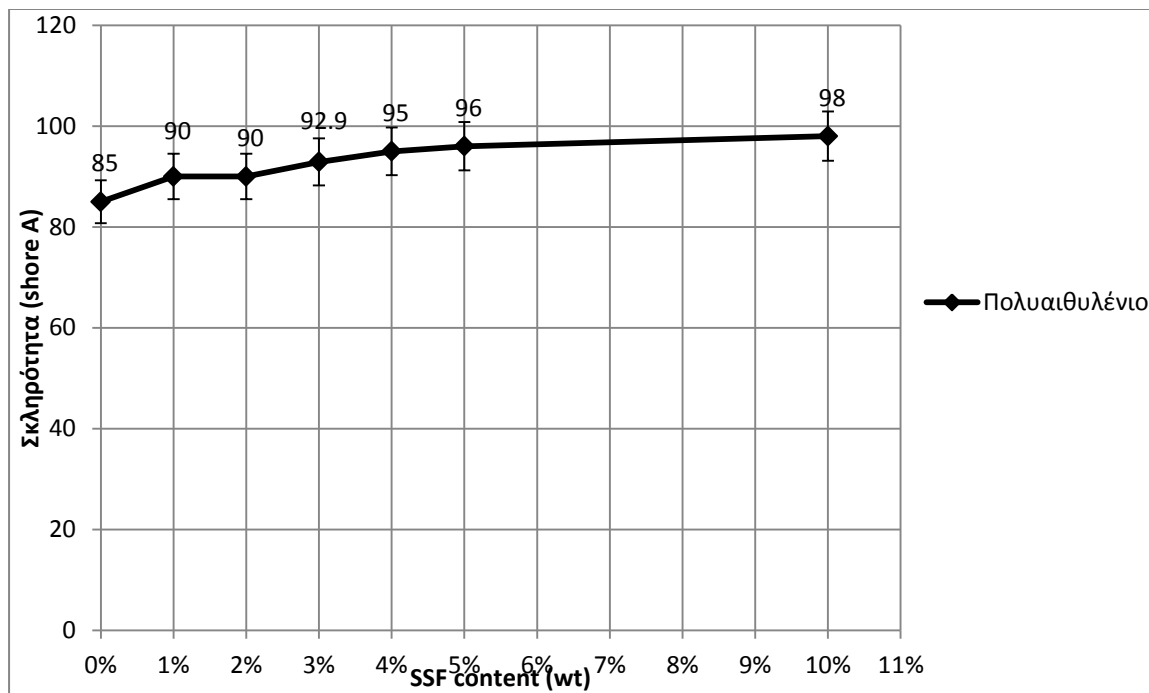
Πίνακας 10 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμών πολυαιθυλενίου με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα

	Εποξειδική ρητίνη με πρόσμιξη φολίδων χάλυβα						
Περιεκτικότητα σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα	0%	1%	2%	3%	4%	5%	10%
Σκληρότητα( shore A)	90	95	95	96	96.5	98	100

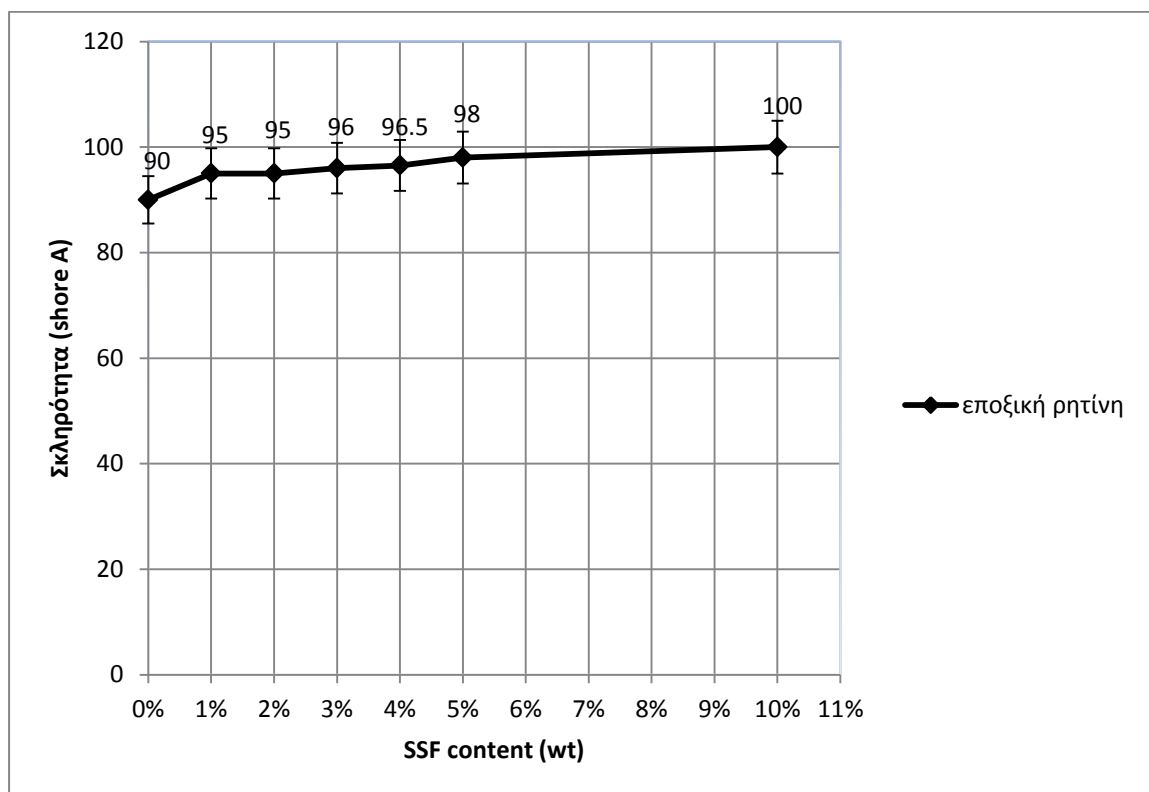
Πίνακας 11 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμών εποξειδικής ρητίνης με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα

	Μεθακρυλική ρητίνη με πρόσμιξη φολίδων χάλυβα					
Περιεκτικότητα σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα	0%	1%	2%	3%	4%	5%
Σκληρότητα( shore A)	70	70	75	80	56	80

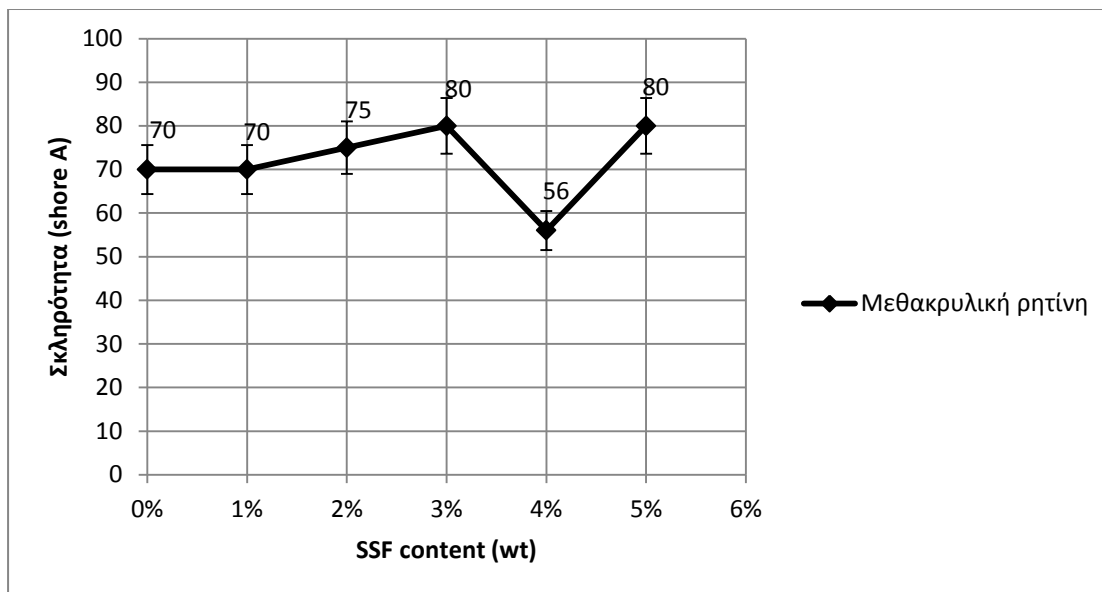
Πίνακας 12 Αποτελέσματα σκληρομέτρησης δοκιμών μεθακρυλικής ρητίνης με πρόσμιξη φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα



Σχήμα 5.1 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας



Σχήμα 5.2 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια εποξικής μήτρας



Σχήμα 5.3 Τιμές σκληρομέτρησης βάσει περιεκτικότητας SSF (% wt) για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας

## 5.3 Πρότυπα δοκιμών

### 5.3.1 Πρότυπο εφελκυσμού ASTM D882-02

- **Αντικείμενο**

Το συγκεκριμένο πρότυπο μετρήσεων καθορίζει τις ιδιότητες εφελκυσμού πάνω στο επίπεδο φύλλων πολυμερικής μήτρας. Στην περίπτωση μας, το πρότυπο αφορά σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων.

- **Σύνοψη της μεθόδου δοκιμής**

Μια λεπτή λωρίδα σταθερής ορθογωνικής διατομής τοποθετείται στις βάσεις συγκράτησης μιας μηχανής μετρήσεων και το δοκίμιο καταπονείται σε εφελκυσμό ενώ καταγράφονται συνεχώς το φορτίο και η επιμήκυνση. Η απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό (ultimate tensile strength – UTS) καθορίζεται από το μέγιστο φορτίο προτού επακολουθήσει θραύση του δοκιμίου. Εφόσον, η μηχανή μετρήσεων διαθέτει κατάλληλο μετατροπέα, εξάγεται και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, από την οποία υπολογίζονται η μέγιστη παραμόρφωση εφελκυσμού, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson και η ελαστική παραμόρφωση.



- **Δοκίμια και προφίλ μετρήσεων**

Το πρότυπο ορίζει να μετρηθούν οι επιδόσεις τουλάχιστον πέντε δοκιμίων, εκτός κι αν μπορούν να αποκτηθούν αξιόπιστα αποτελέσματα με λιγότερα δοκίμια. Όσον αφορά τη γεωμετρία των προς έλεγχο δοκιμίων, αυτά πρέπει να έχουν σταθερή ορθογωνική διατομή, το ελάχιστο μήκος πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις σταθερής συγκράτησης του δοκιμίου επαυξημένο με τουλάχιστον 50 χιλ. . Το πλάτος επιλέγεται κατά βούληση ώστε να επιτρέπει αξιόπιστες μετρήσεις. Η ανοχή του πλάτους του δοκιμίου καθορίζεται στο  $\pm 1\%$  του πλάτους, ενώ η ανοχή του πάχους του δοκιμίου έχει ανοχή  $\pm 4\%$  της τιμής του πάχους. Επιπλέον φύλλα στις περιοχές συγκράτησης (tabs) τοποθετούνται μόνο εφόσον η αρχική συγκράτηση των βάσεων δεν αποδειχθεί επαρκής. Εκτός κι αν ορίζεται διαφορετικά από το σχεδιασμό του πειράματος, τα δοκίμια, σύμφωνα με τη μέθοδο δοκιμών **D882-02**, φυλάσσονται και στη συνέχεια καταπονούνται σε σταθερές εργαστηριακές συνθήκες με θερμοκρασία περιβάλλοντος  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  και σχετική υγρασία αέρα  $50 \pm 10\%$ . Προτού τοποθετηθεί το δοκίμιο στην πρέσα μετρήσεων, μετράται η διατομή του σε τρία σημεία (Διατομή = πλάτος x πάχος) και τα στοιχεία εισάγονται στο λογισμικό της πρέσας μετρήσεων για να μπορούν να αναχθούν τα φορτία και οι επιμηκύνσεις σε τάσεις και παραμορφώσεις. Τέλος, το δοκίμιο καταπονείται με εφελκυσμό υπό σταθερή ταχύτητα της κινητής κεφαλής της πρέσας, η οποία ορίζεται βάσει του προτύπου στα 2mm/min. Οι ακριβείς διαστάσεις των τελικών δοκιμίων όπως ορίζονται από το πρότυπο παρουσιάζονται παρακάτω.

### 5.3.2 Πρότυπο κάμψης τριών σημείων ASTM D790-03

- **Αντικείμενο**

Μέσω του συγκεκριμένου προτύπου καθορίζονται οι καμπτικές ιδιότητες ενισχυμένων πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των συνθέτων υλικών υψηλής αντοχής.

- **Σύνοψη της μεθόδου δοκιμής**

Το δοκίμιο σε μορφή μπάρας ορθογωνικής διατομής τοποθετείται πάνω σε δύο κυλινδρικές στηρίξεις και φορτίζεται σε κάμψη ακριβώς στο κέντρο του. Το δοκίμιο παραμορφώνεται έως ότου επέλθει η θραύση του στην εξωτερική του επιφάνεια είτε έως ότου η μέγιστη



παραμόρφωση φτάσει το 5%. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μια μετρητική μηχανή, η οποία έχει τη δυνατότητα κίνησης της σταθερής κεφαλής με σταθερή ταχύτητα.

- **Δοκίμια και προφίλ μετρήσεων**

Οι στηρίξεις και η ράβδος άσκησης φορτίου καθορίζονται από το πρότυπο ως κυλινδρικής μορφής και προκειμένου να αποφευχθούν διείσδυση και συγκέντρωση τάσεων στο σημείο επαφής με τη ράβδο άσκησης φορτίου, οι ακτίνες καμπυλότητας των στηρίξεων και της ράβδου άσκησης φορτίου πρέπει να ισούνται με  $5.0 \pm 0.1 \text{ mm}$ , εκτός κι αν έχει σχεδιαστεί διαφορετικά το πείραμα. Μετράται πάλι η επιφάνεια της ορθογωνικής διατομής του δοκιμίου. Ο αριθμός των ελάχιστων απαραίτητων δοκιμών ανέρχεται πάλι σε πέντε, ενώ αυτά φυλάσσονται σε εργαστηριακές συνθήκες (όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω), στις οποίες εκτελείται επιπλέον και το πείραμα. Τα δοκίμια πρέπει να έχουν πάχος  $> 1.6 \text{ χιλ.}$  και η απόσταση μεταξύ των δυο στηρίξεων πρέπει να είναι 16 φορές το πάχος του δοκιμίου. Με βάση τα παραπάνω το πρότυπο που προτείνεται είναι δοκίμιο διάστασης  $3,2 \times 12,7 \times 127 \text{ χιλ.}$  Η απόσταση μεταξύ στηρίξεων ορίζεται στα  $51,2 \text{ χιλ.}$  Η ταχύτητα της κίνησης κεφαλής, όπου εδράζεται η ράβδος άσκησης φορτίου, καθορίζεται στα  $2 \text{ mm/min}$ . [29]

### 5.3.3 Πρότυπο συμπίεσης ASTM D695-02a

- **Αντικείμενο**

Μέσω του συγκεκριμένου προτύπου καθορίζονται οι ιδιότητες των πλαστικών σε συμπίεση, συμπεριλαμβανομένων των συνθέτων υλικών υψηλής αντοχής.

- **Σύνοψη της μεθόδου δοκιμής**

Το δοκίμιο σε μορφή ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου ή κυλίνδρου τοποθετείται πάνω σε μια μεταλλική πλάκα και φορτίζεται σε συμπίεση από μια άλλη ίδια πλάκα στο άνω μέρος. Το δοκίμιο παραμορφώνεται έως ότου επέλθει η θραύση του στην εξωτερική του επιφάνεια. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μια μετρητική μηχανή, η οποία έχει τη δυνατότητα κίνησης της σταθερής κεφαλής με σταθερή ταχύτητα.



- **Δοκίμια και προφίλ μετρήσεων**

Μετράται πάλι η επιφάνεια της ορθογωνικής η κυλινδρικής διατομής του δοκιμίου. Ο αριθμός των ελάχιστων απαραίτητων δοκιμών ανέρχεται πάλι σε πέντε, ενώ αυτά φυλάσσονται σε εργαστηριακές συνθήκες (όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω), στις οποίες εκτελείται επιπλέον και το πείραμα. Με βάση τα παραπάνω, το πρότυπο που προτείνεται είναι δοκίμιο διάστασης 12,7X12,7X25,4 χιλ. η κυλινδρικό δοκίμιο R6,35X25,4 χιλ. . Η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής, όπου εδράζεται η ράβδος άσκησης φορτίου, καθορίζεται στα 2 mm/min.

### **5.3.4 Πρέσα μετρήσεων Instron 4482**

Για την πραγματοποίηση όλων των πειραματικών τεστ αντοχής σε εφελκυσμό, κάμψη και συμπίεση χρησιμοποιήθηκε μηχανή μετρήσεων INSTRON 4482, η οποία πληροί τις προδιαγραφές μετρητικής διάταξης των παραπάνω προτύπων. Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η μηχανή, πραγματοποιήθηκε η αυτόματη καταγραφή των μετρήσεων.

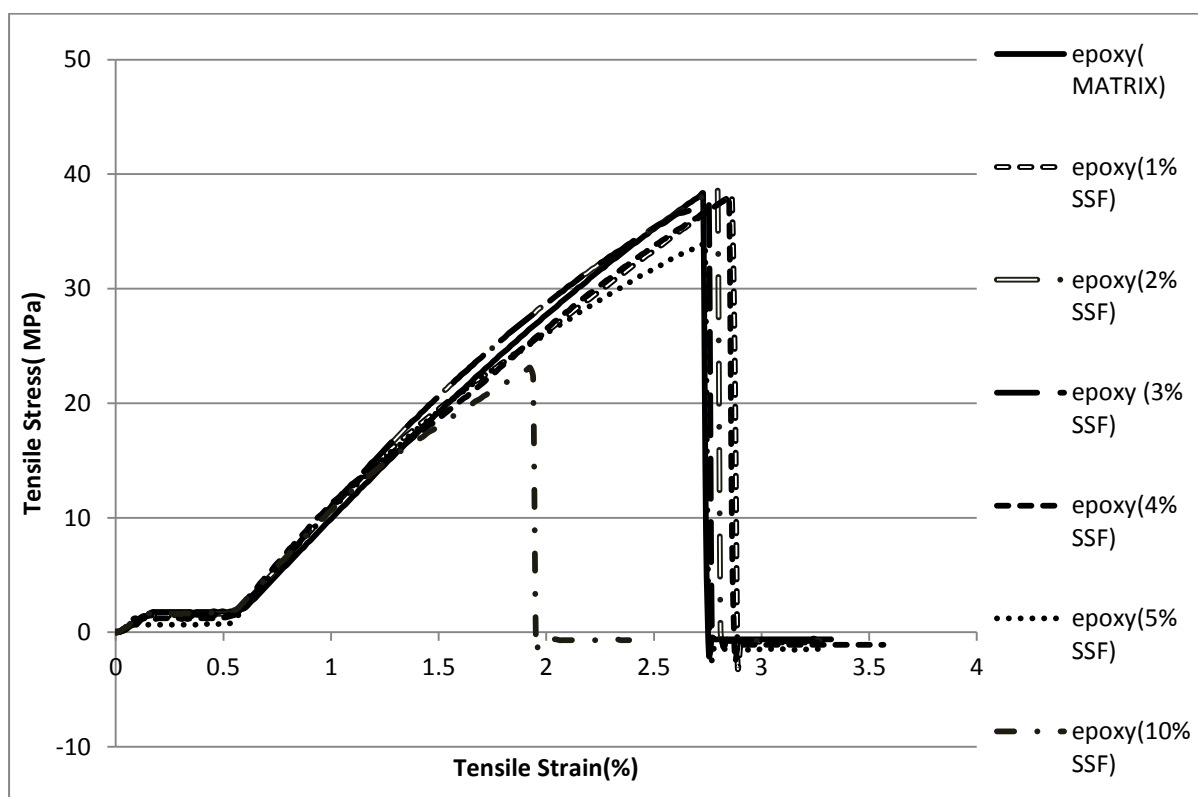
## **5.4 Δοκιμή αντοχής σε Εφελκυσμό (Tensile Strength Test)**

Σε πείραμα εφελκυσμού κατά ASTM D882-02 υποβλήθηκαν δοκίμια εποξικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%,4%, 5% και 10%, (w.t.), δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%, 4% και 5%,(w.t.), καθώς και δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%,4%, 5% και 10%, (w.t.). Αφότου εκτελέστηκε επαρκής αριθμός πειραμάτων εφελκυσμού στα δοκίμια κάθε περιεκτικότητας (πεντε δοκίμια από κάθε διαφορετική σύνθεση), εκλέχθηκε από κάθε τύπο δοκιμίου (μήτρας και περιεκτικότητας ) εκείνο με την πιο αντιπροσωπευτική και επαναλήψιμη για τον τύπο απόδοση και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μεταξύ των διάφορων περιεκτικότητων σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (SSF). Τέλος, υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών που παρασκευάστηκαν.

#### 5.4.1 Δοκίμια εποξικής μήτρας

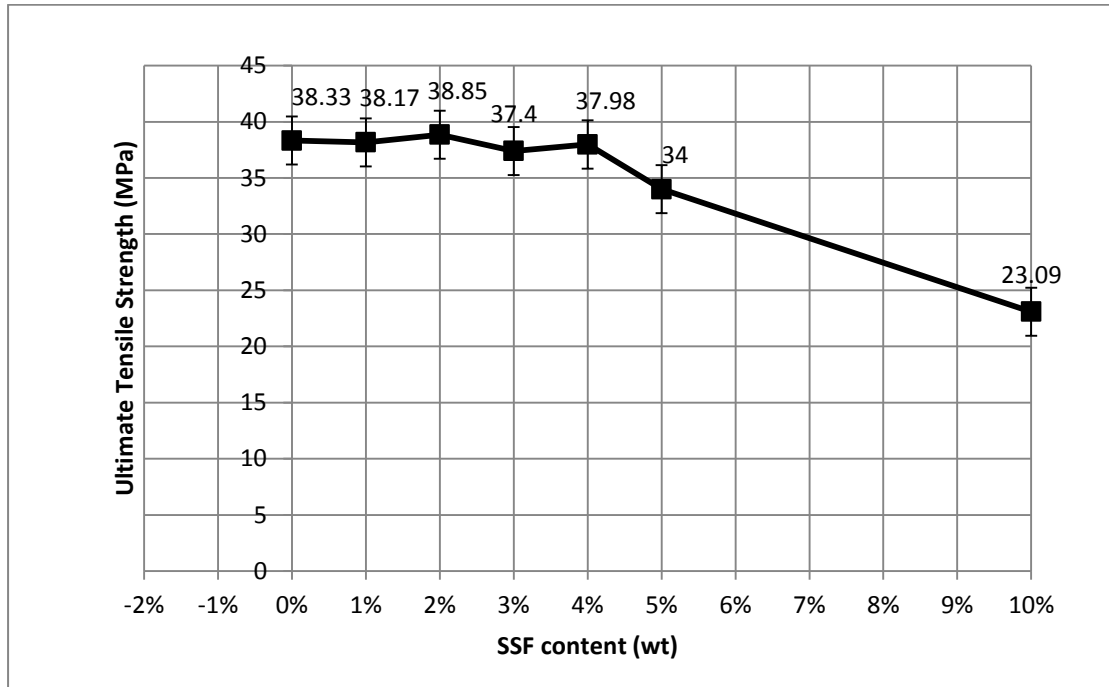
Στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για τα δοκίμια εποξικής μήτρας με περιεκτικότητες σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα (wt) παρατηρούνται τα εξής σε σχέση με το δοκίμιο καθαρής μήτρας, το οποίο αστοχεί στα 38.33 MPa.

- ✓ Τα σωματίδια χάλυβα, σε όλα τα ποσοστά πρόσμειξης στη μήτρα του συνθέτου έως 5% wt SSF, αυξάνουν ελάχιστα την παραμόρφωση θραύσης. Εξαιρέση αποτελεί το ποσοστό πρόσμειξης 10% wt SSF που η παραμόρφωση θραύσης είναι 35% μικρότερη του δοκιμίου αναφοράς.
- ✓ Για τα ποσοστά 1,2,3 και 4% SSF (wt) η τάση θραύσης διαφοροποιείται ελάχιστα από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Συγκεκριμένα μειώνεται ελάχιστα σε όλες τις παραπάνω περιεκτικότητες πλην του 2% που αυξάνεται αμυδρά. Για τα ποσοστά 5% και 10% SSF (wt) η τάση θραύσης μειώνεται στα 34 και 23.09 MPa αντίστοιχα.

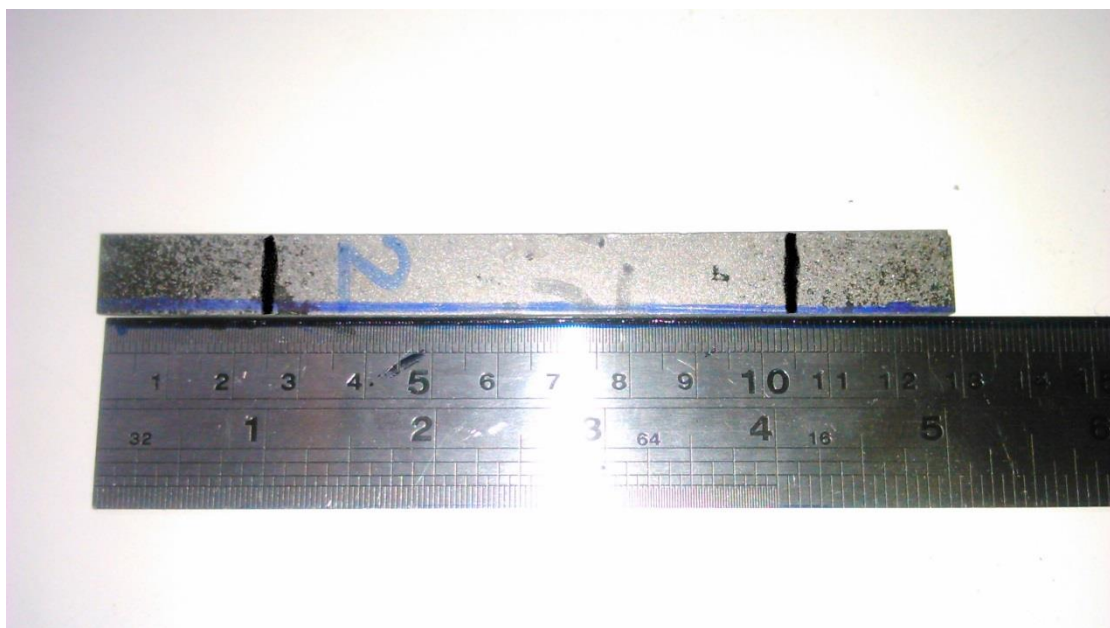


Σχήμα 5.4 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμίων εποξικής ρητίνης με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα





Σχήμα 5.5 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Εικόνα 5.46 Δοκίμο εποξικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02



Εικόνα 5.47 Δοκίμιο εποξικής ρητίνης κατά την αστοχία σε δοκιμή εφελκυσμού

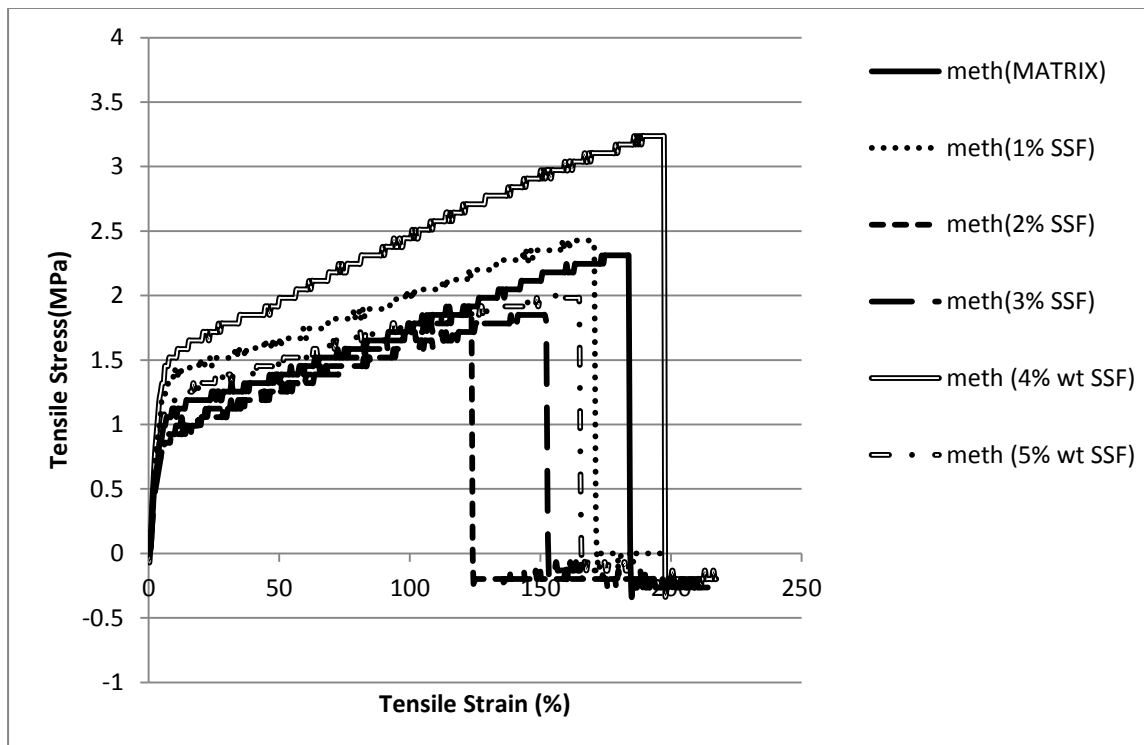


Εικόνα 5.48 Δοκίμια εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2,3 και 4 % σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό

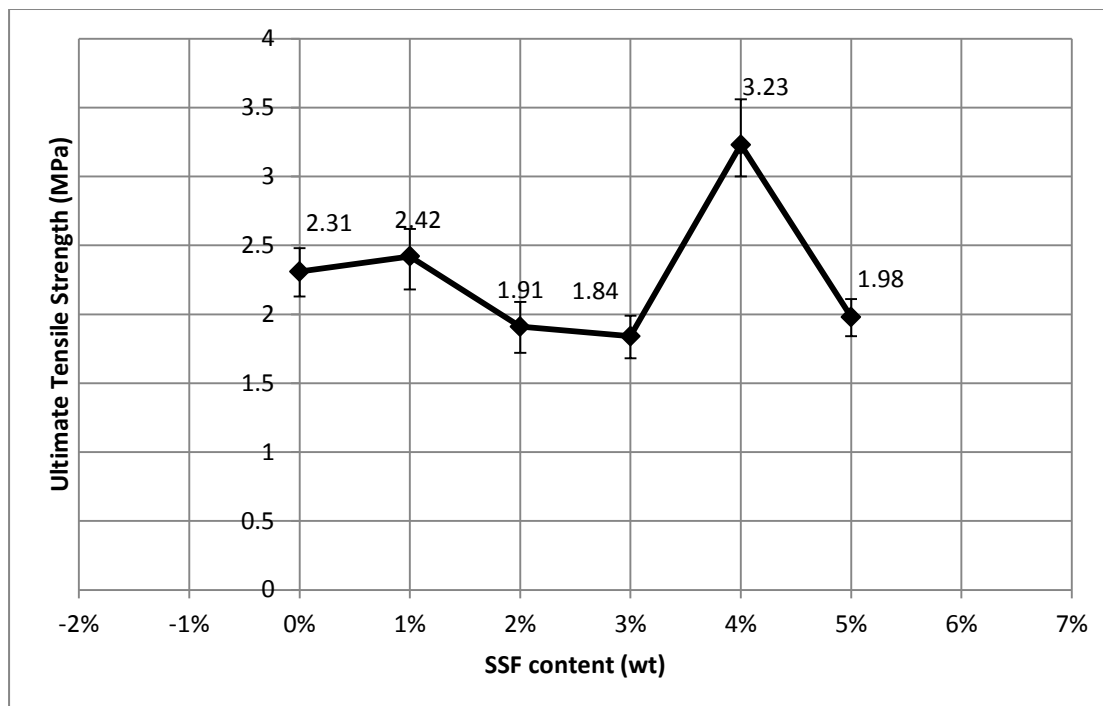
## 5.4.2 Δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας

Στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για τα δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας με περιεκτικότητες σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (wt) παρατηρούνται τα εξής σε σχέση με το δοκίμιο καθαρής μήτρας, το οποίο εμφανίζει όριο θραύσης στα 2.31 MPa.

- ✓ Τα σωματίδια χάλυβα, για τα ποσοστά πρόσμειξης στη μήτρα του συνθέτου, 1% και 4% wt SSF, αυξάνουν στα 2.42 MPa και 3.23 MPa το όριο θραύσης αντίστοιχα. Για ποσοστά 2%, 3% και 5% SSF (wt) το όριο θραύσης είναι αρκετά μικρότερο αυτού του δοκιμίου αναφοράς.
- ✓ Η παραμόρφωση θραύσης αυξάνει μόνο στην περίπτωση του δοκιμίου με πρόσμειξη 4% φολίδων χάλυβα και φτάνει τα 191% σε σχέση του 172% για το δοκίμιο αναφοράς (μήτρας)



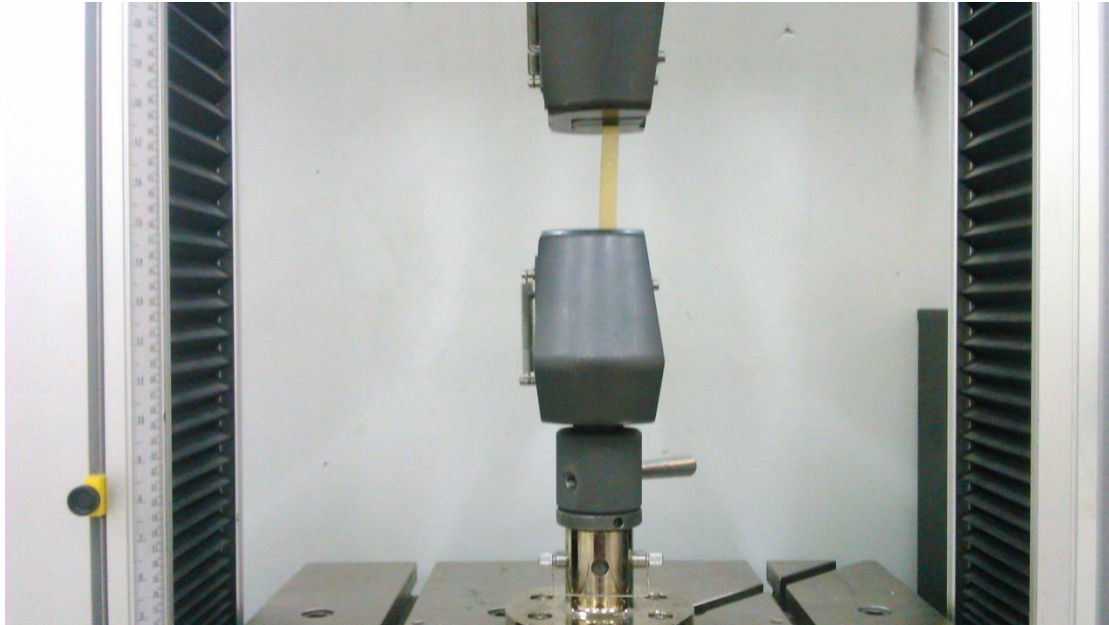
Σχήμα 5.6 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμίων μεθακρυλικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα



Σχήμα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών μεθακρυλικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Εικόνα 5.49 Δοκίμιο μεθακρυλικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02



Εικόνα 5.50 Δοκίμιο μεθακρυλικής ρητίνης κατά την δοκιμή εφελκυσμού



Εικόνα 5.51 Δοκίμιο μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 4% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό (μπορεί να παρατηρηθεί η εμφάνιση πόρων μετά το πέρας του εφελκυσμού)



Εικόνα 5.52 Δοκίμια μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2 και 3 % σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό

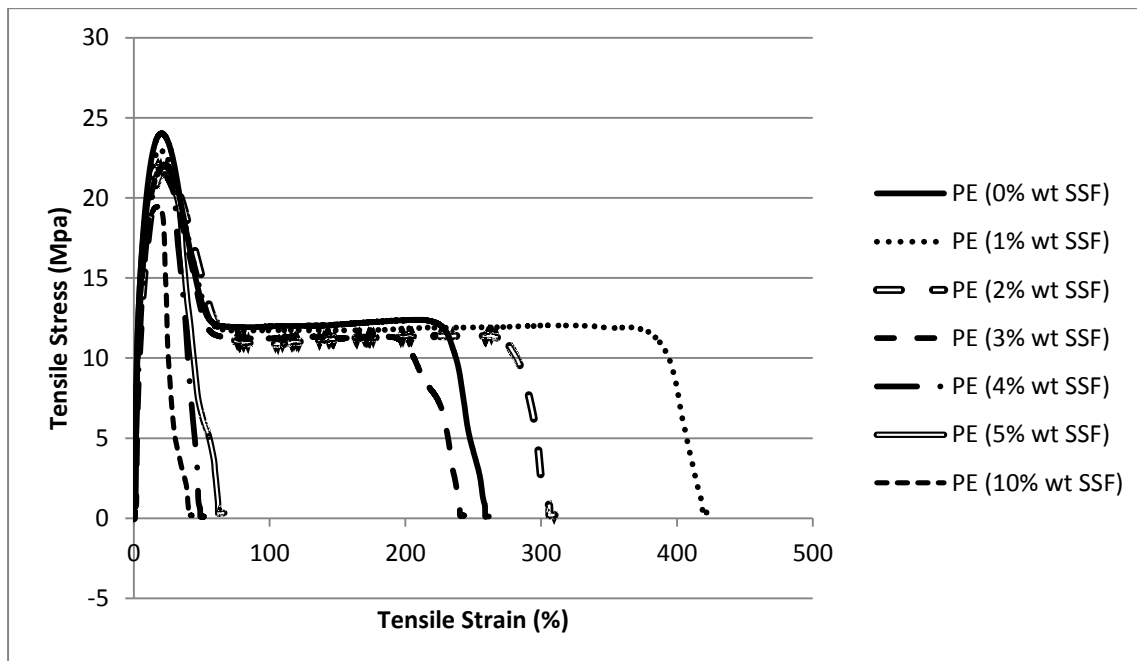
### 5.4.3 Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας

Στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για τα δοκίμια πολυαιθυλενίου με περιεκτικότητες σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (wt) παρατηρούνται τα εξής σε σχέση με το δοκίμιο καθαρής μήτρας, το οποίο εμφανίζει όριο διαρροής στα 24.03 MPa.

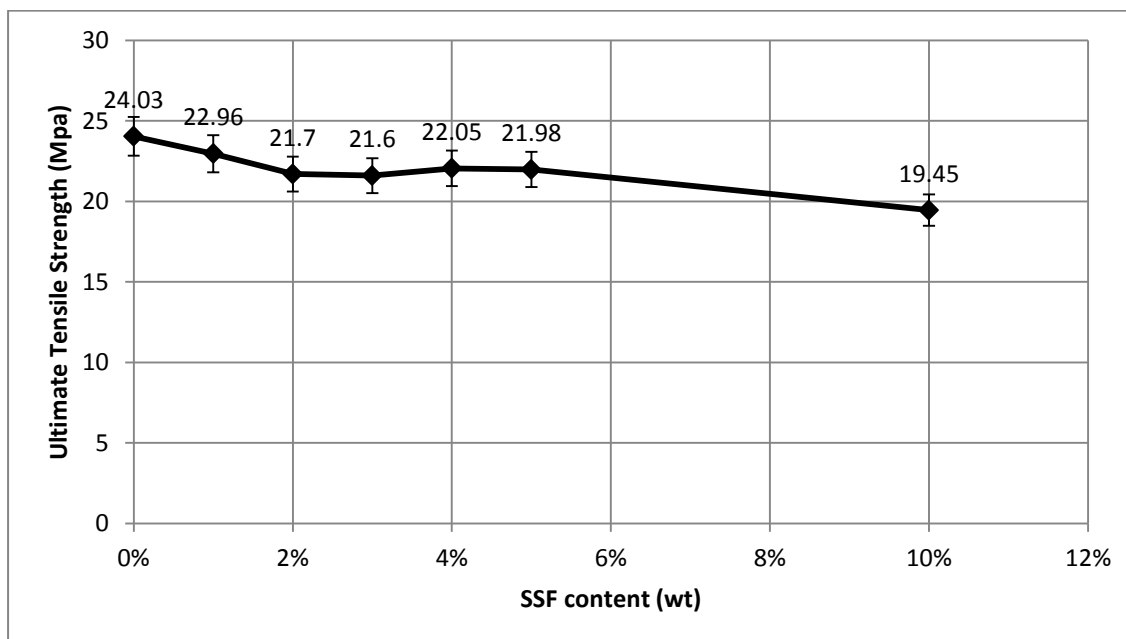
- ✓ Τα σωματίδια χάλυβα, για τα ποσοστά πρόσμιξης στη μήτρα του συνθέτου 1% και 2% wt SSF, αυξάνουν 17% και 62% την παραμόρφωση θραύσης αντίστοιχα. Ακολούθως για ποσοστό 3% SSF (wt) η παραμόρφωση θραύσης είναι ελάχιστα μικρότερη αυτής του δοκιμίου αναφοράς ενώ για τα ποσοστά 4,5 και 10% SSF (wt) η παραμόρφωση θραύσης είναι 82%, 76% και 85% μικρότερη από αυτή του δοκιμίου αναφοράς.
- ✓ Για όλα τα ποσοστά πρόσμιξης φολίδων χάλυβα η τάση διαρροής αλλά και η σταθερή τάση πλαστικής περιοχής είναι ελάχιστα μικρότερες σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς καθαρού πολυαιθυλενίου.



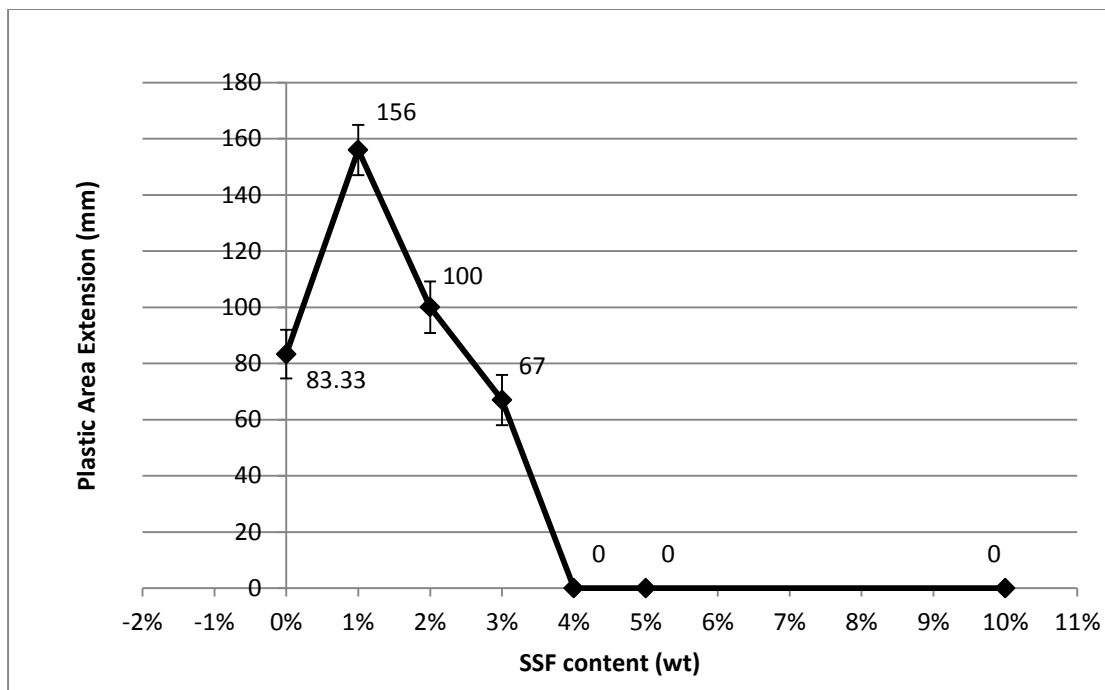
- ✓ Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για ποσοστό πρόσμειξης χάλυβα 4,5 και 10% το πλατό πλαστικής περιοχής έχει εξαλειφθεί συμπεραίνοντας ότι η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού έχει γίνει ψαθυρή.



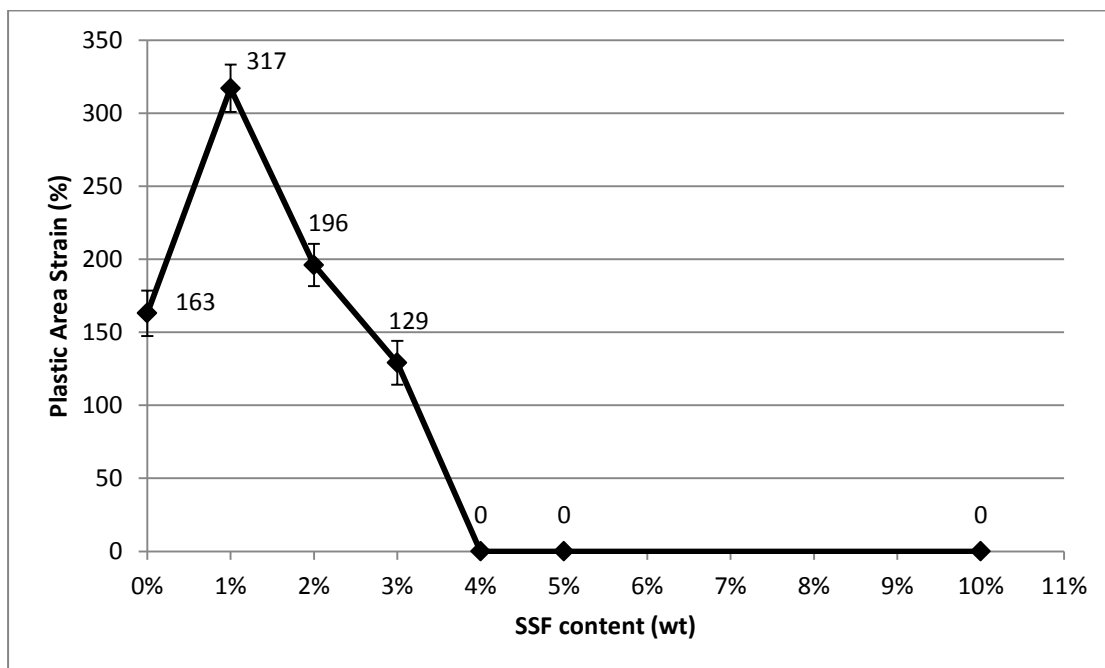
Σχήμα 5.8. Συγκριτικό διάγραμμα τάσης εφελκυσμού - παραμόρφωσης δοκιμών πολυαιθυλενίου με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα



Σχήμα 5.9 . Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF

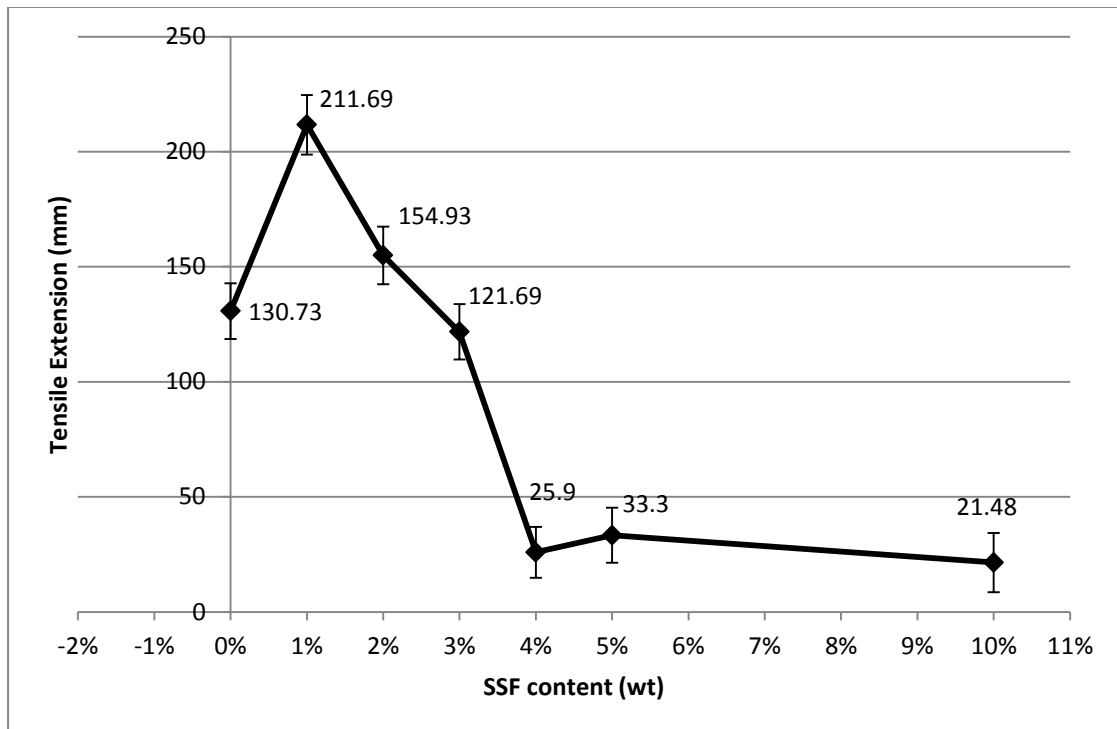


Σχήμα 5.10 Συγκριτικό διάγραμμα μήκους πλατό πλαστικής περιοχής δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF

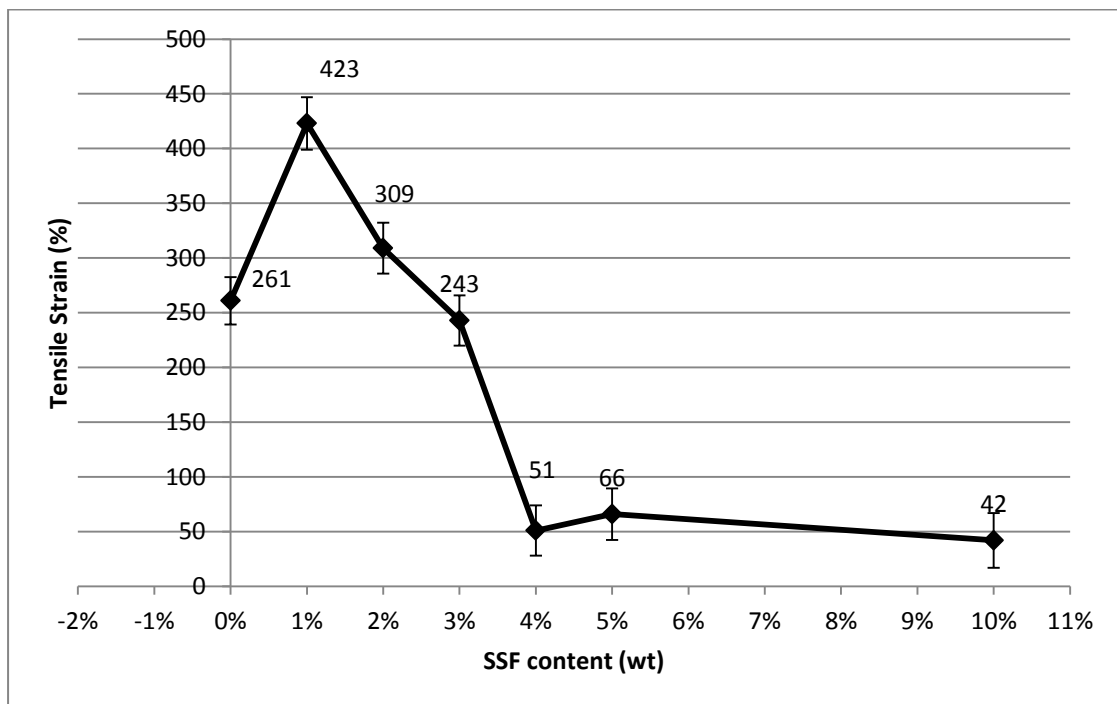


Σχήμα 5.11 Συγκριτικό διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης δοκιμίων πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF





Σχήμα 5.12 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών επιμήκυνσης δοκιμών πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Σχήμα 5.13 Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής παραμόρφωσης δοκιμών πολυαιθυλενίου με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Εικόνα 5.53 Δοκίμιο πολυαιθυλενικής μήτρας στο οποίο φαίνονται τα όρια συγκράτησης (25mm) από τις δαγκάνες, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D882-02



Εικόνα 5.54 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου (μήτρα) μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό



Εικόνα 5.55 Δοκίμια πολυαιθυλενίου (επαναλήψιμης συμπεριφοράς) περιεκτικότητας 2% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό



Εικόνα 5.56 Δοκίμια πολυαιθυλενίου (επαναλήψιμης συμπεριφοράς) περιεκτικότητας 3% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό



Εικόνα 5.57 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 10% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό

## 5.5 Δοκιμή αντοχής σε Κάμψη τριών σημείων (3Point Bending Test)

Σε πείραμα κάμψης κατά ASTM D790-03 υποβλήθηκαν δοκίμια εποξικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%,4%, 5% και 10%, (w.t.), καθώς και δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%,4%, 5% και 10%, (w.t.). Δεν ήταν δυνατή η δοκιμή σε κάμψη, δοκιμών μεθακρυλικής μήτρας διότι ως ελαστομερές υλικό δεν φέρει αντοχή σε ακαμψία. Αφότου εκτελέστηκε επαρκής αριθμός πειραμάτων κάμψης στα δοκίμια κάθε περιεκτικότητας, εκλέχθηκε από κάθε τύπο δοκιμίου (μήτρας και περιεκτικότητας ) εκείνο με την πιο αντιπροσωπευτική και επαναλήψιμη για τον τύπο απόδοση και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μεταξύ των διάφορων περιεκτικότητων σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (SSF). Η προσέγγιση των ζευγών των τιμών από το πείραμα έγινε με πολυωνυμική καμπύλη 3<sup>ου</sup> βαθμού. Όπως και στη δοκιμή εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή σε κάμψη πέντε δοκίμια από

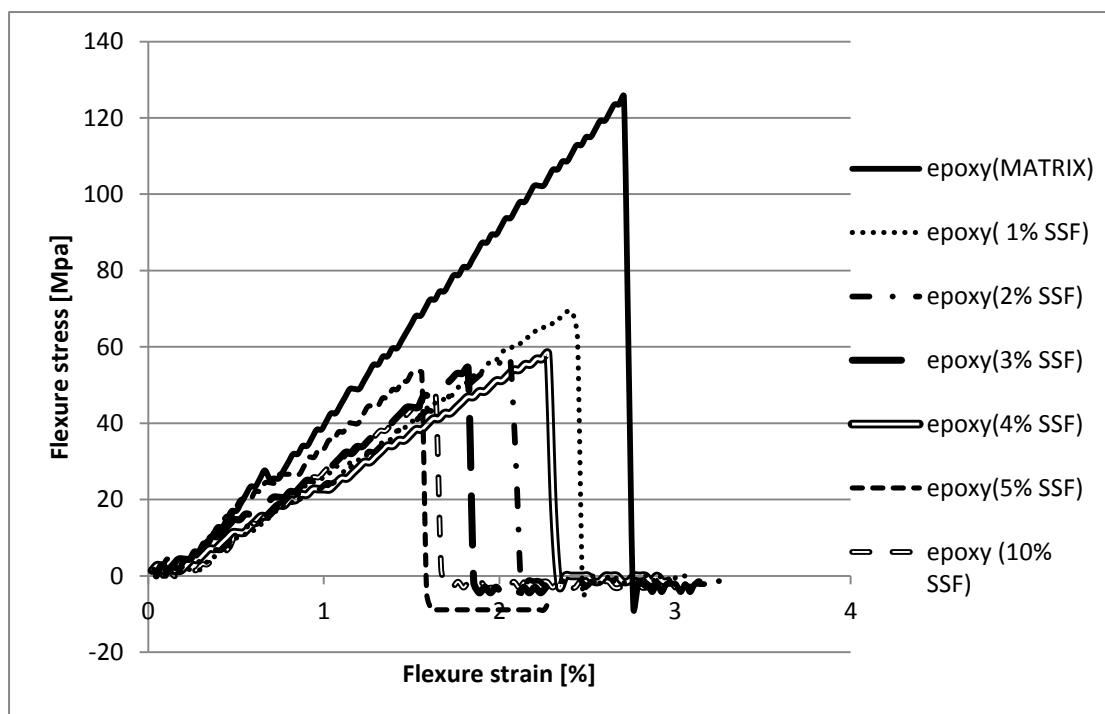


κάθε υλικό στην ίδια μηχανή δοκιμών. Επίσης, υπολογίστηκε το flexure extension (το μήκος, δηλαδή, της περιοχής καθαρής κάμψης στα διαγράμματα φορτίου/επιμήκυνσης κάμψης).

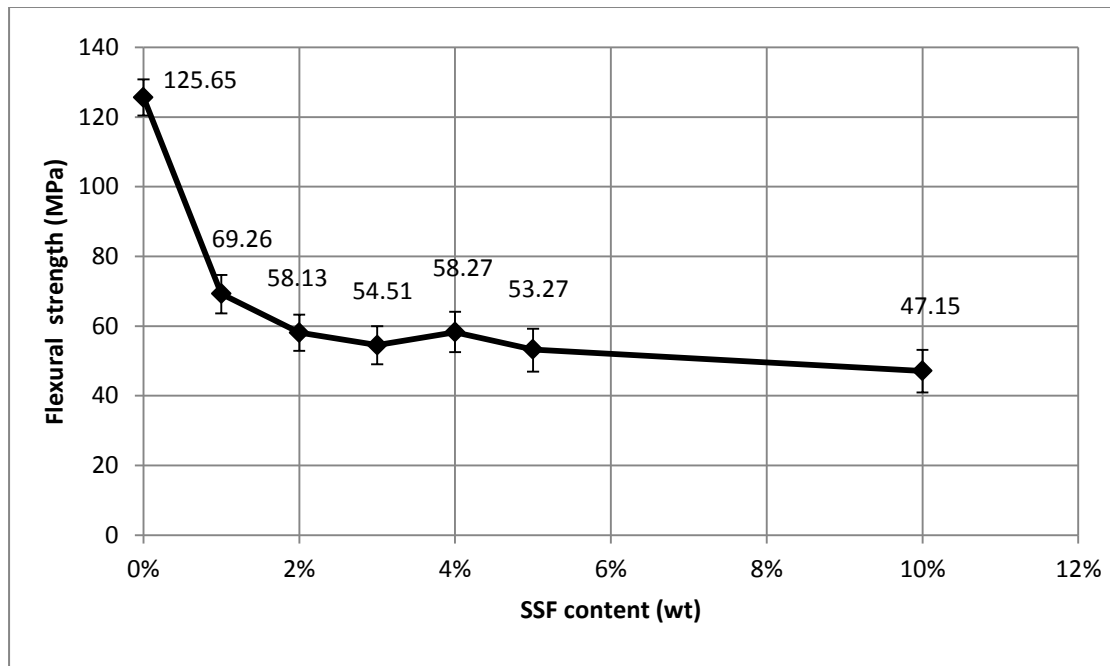
### 5.5.1 Δοκίμια εποξικής μήτρας

Οι μετρήσεις από τα πειράματα κάμψης τριών σημείων δοκιμών εποξικής μήτρας με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα (SSFs) οδήγησαν στο έξης ένα συμπέρασμα:

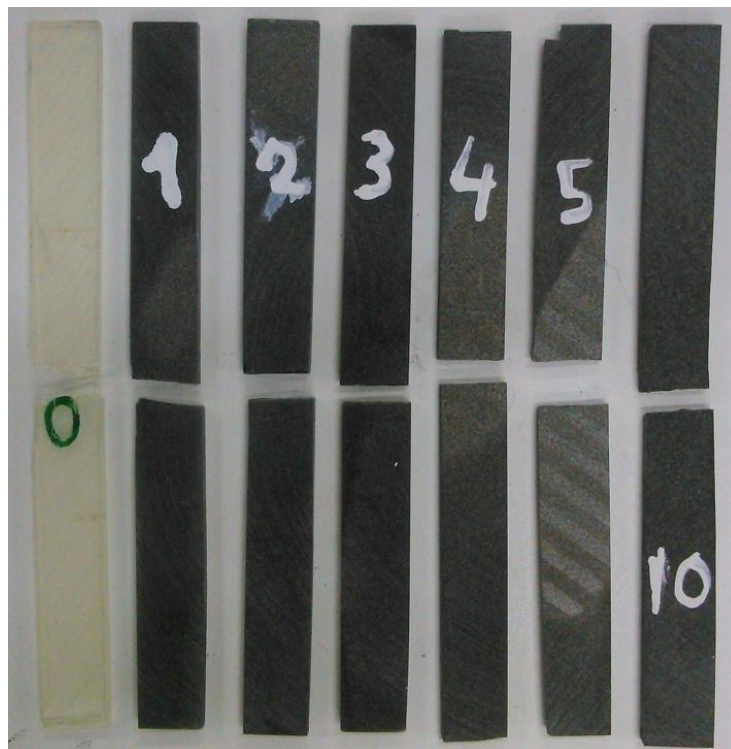
- ✓ Οι φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα μειώνουν την αντοχή σε κάμψη σε οποιαδήποτε περιεκτικότητα κατά βάρος χρησιμοποιηθούν. Παρατηρείται δε ότι όσο αυξάνει το περιεχόμενο σε χάλυβα τόσο περισσότερο υποβαθμίζεται η αντοχή σε κάμψη.



Σχήμα 5.14 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών εποξικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα

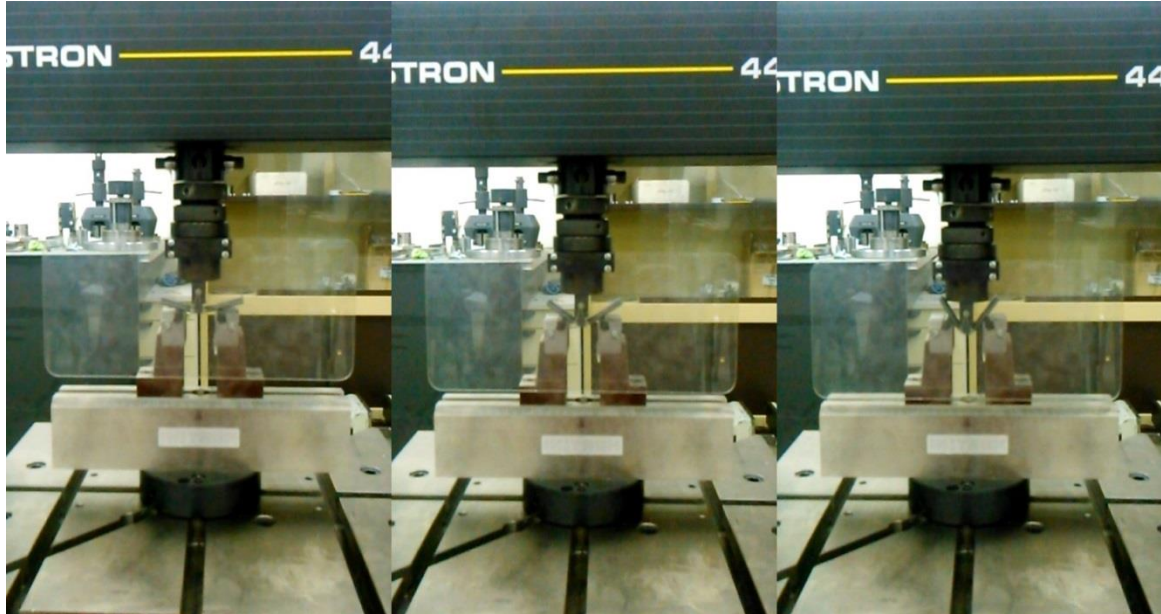


Σχήμα 5.15 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε κάμψη (UTS) δοκιμίων εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Εικόνα 5.58 Δοκίμια εποξικής ρητίνης περιεκτικότητας 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες χάλυβα μετά την κάμψη τριών σημείων

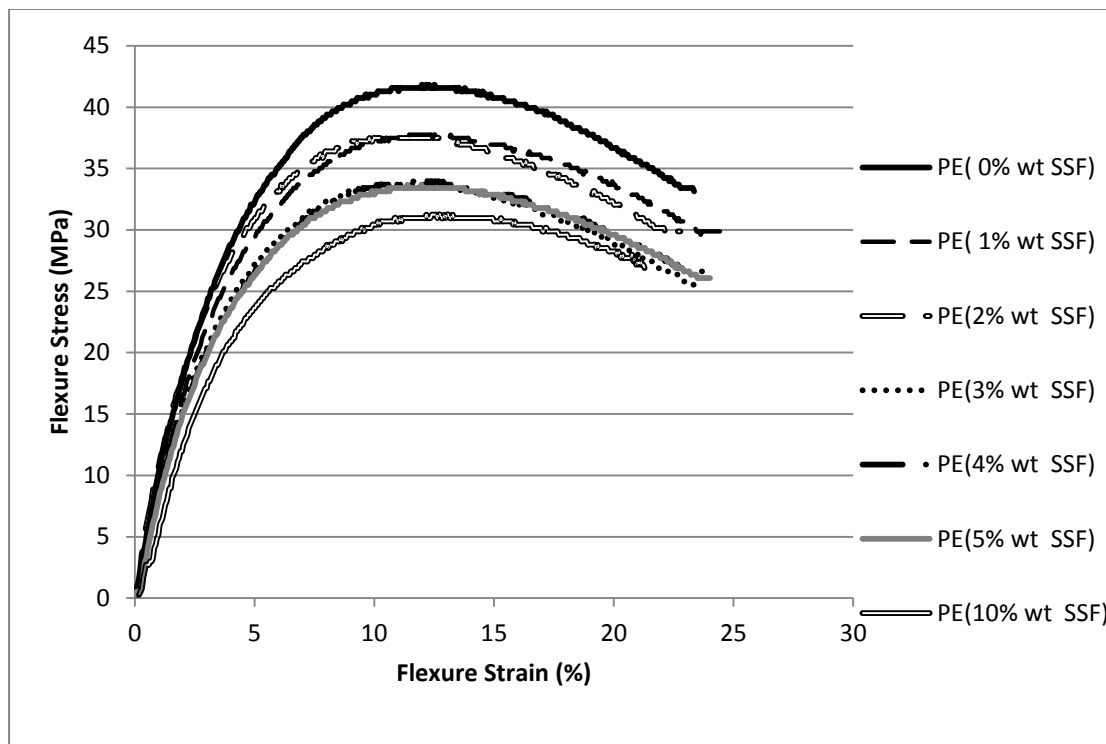
## 5.5.2 Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας



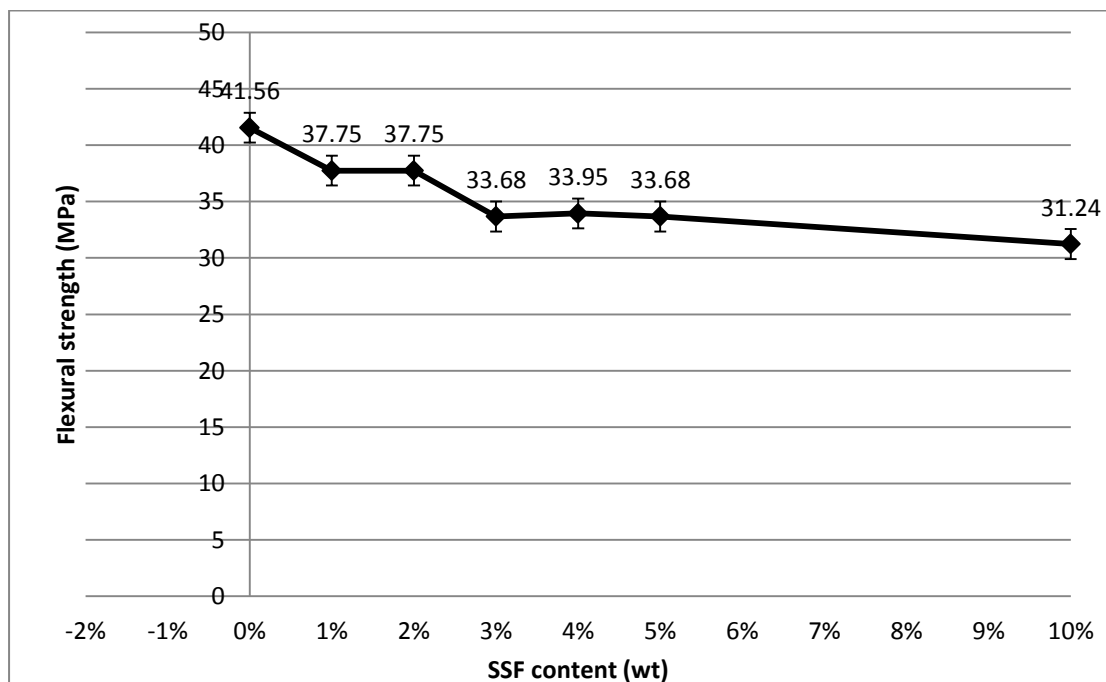
Εικόνα 5.59 Προοδευτικές απόψεις από πείραμα κάμψης πολυαιθυλενικής μήτρας με 3% φολίδες χάλυβα

Οι μετρήσεις από τα πειράματα κάμψης τριών σημείων δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (SSFs) οδήγησαν στο έξης ένα συμπέρασμα:

- ✓ Οι φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα μειώνουν την αντοχή σε κάμψη σε οποιαδήποτε περιεκτικότητα κατά βάρος χρησιμοποιηθούν. Παρατηρείται δε ότι όσο αυξάνει το περιεχόμενο σε χάλυβα τόσο περισσότερο υποβαθμίζεται η αντοχή σε κάμψη.



Σχήμα 5.16 Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών πολυαιθυλενικής μήτρας με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα



Σχήμα 5.17 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε κάμψη (UTS) δοκιμών πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF





Εικόνα 5.60 Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας με ποσοστό φολίδων χάλυβα 0,1,2,3,4,5 και 10% μετά την κάμψη τριών σημείων



Εικόνα 5.61 Δοκίμιο πολυαιθυλενίου πριν και μετά τη δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων



## 5.6 Δοκιμή αντοχής σε συμπίεση

Σε πείραμα συμπίεσης κατά ASTM D695-02a υποβλήθηκαν δοκίμια εποξικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% και 10%, (w.t.), δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%, 4% και 5%, (w.t.), καθώς και δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας με ενίσχυση φολίδων ανοξειδωτού χάλυβα (SSF) σε περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% και 10%, (w.t.). Αφότου εκτελέστηκε επαρκής αριθμός πειραμάτων συμπίεσης στα δοκίμια κάθε περιεκτικότητας, εκλέχθηκε από κάθε τύπο δοκιμίου (μήτρας και περιεκτικότητας) εκείνο με την πιο αντιπροσωπευτική και επαναλήψιμη για τον τύπο απόδοση και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μεταξύ των διάφορων περιεκτικότητων σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα (SSF).

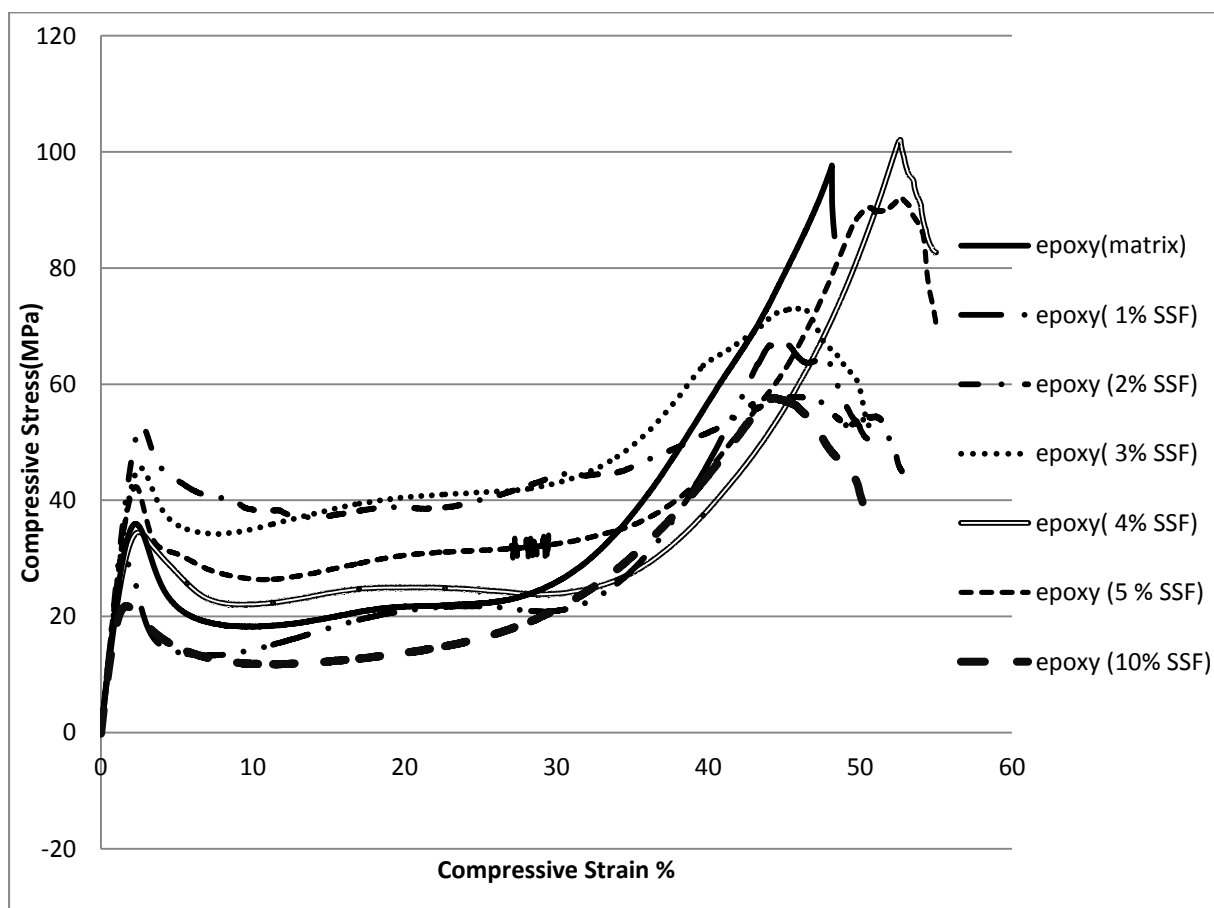
### 5.6.1 Δοκίμια εποξικής μήτρας

Οι μετρήσεις από τα πειράματα συμπίεσης δοκιμίων εποξικής μήτρας με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες ανοξειδωτού χάλυβα (SSFs) οδήγησαν στα εξής:

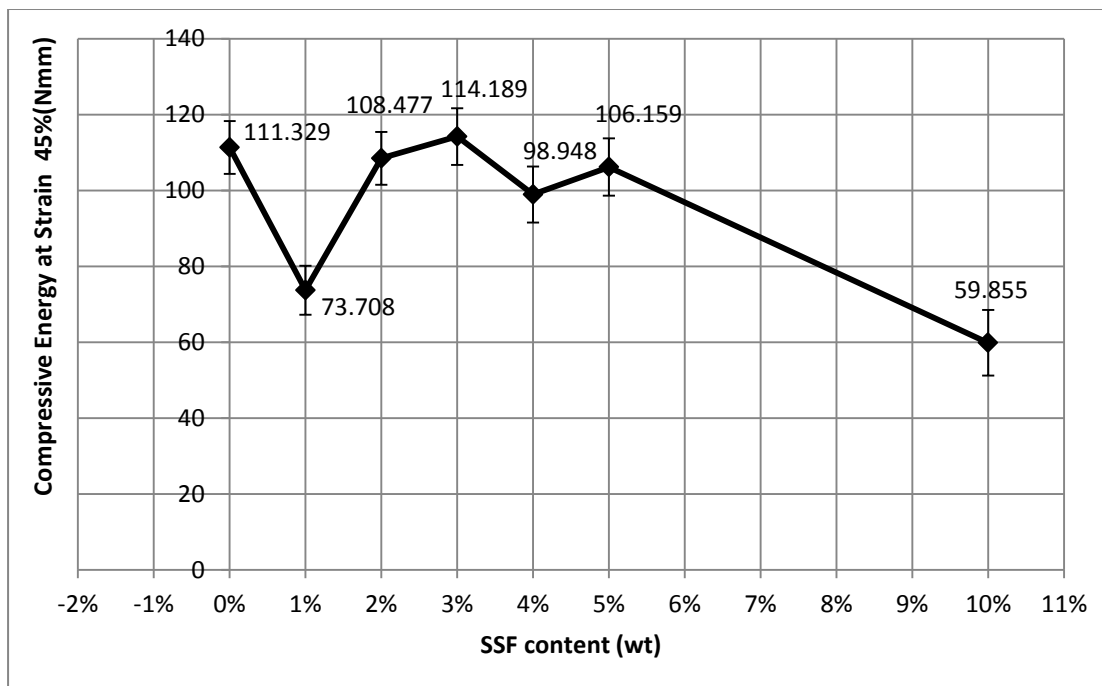
- ✓ Μεγαλύτερο όριο διαρροής (51 MPa) δείχνει το δοκίμιο περιεκτικότητας 2% SSFs (wt), αμέσως μετά έρχεται το δοκίμιο περιεκτικότητας 3% SSFs (wt) με 45 MPa. Τα δοκίμια 4% και 5% περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα έχουν όριο διαρροής κοντά στο δοκίμιο αναφοράς (34.5 MPa). Τέλος τις δυο τελευταίες θέσεις καταλαμβάνουν τα δοκίμια με περιεκτικότητες 1% και 10% SSFs (wt) με όριο διαρροής 27.5 MPa και 21 MPa αντίστοιχα.
- ✓ Το όριο θραύσης αυξήθηκε μόνο στην περίπτωση του δοκιμίου περιεκτικότητας 4% SSFs (wt) με 101 MPa έναντι των 96 MPa του δοκιμίου αναφοράς, έπειτα ακολουθεί το 5% με 92 MPa, το 3% με 73 MPa, το 1% με 67 MPa και τέλος με 57 MPa το 2% και το 10%.
- ✓ Η θραύση για τα δοκίμια 4% και 5% περιεκτικότητας SSFs (wt) υπεισέρχεται για 5% μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια.



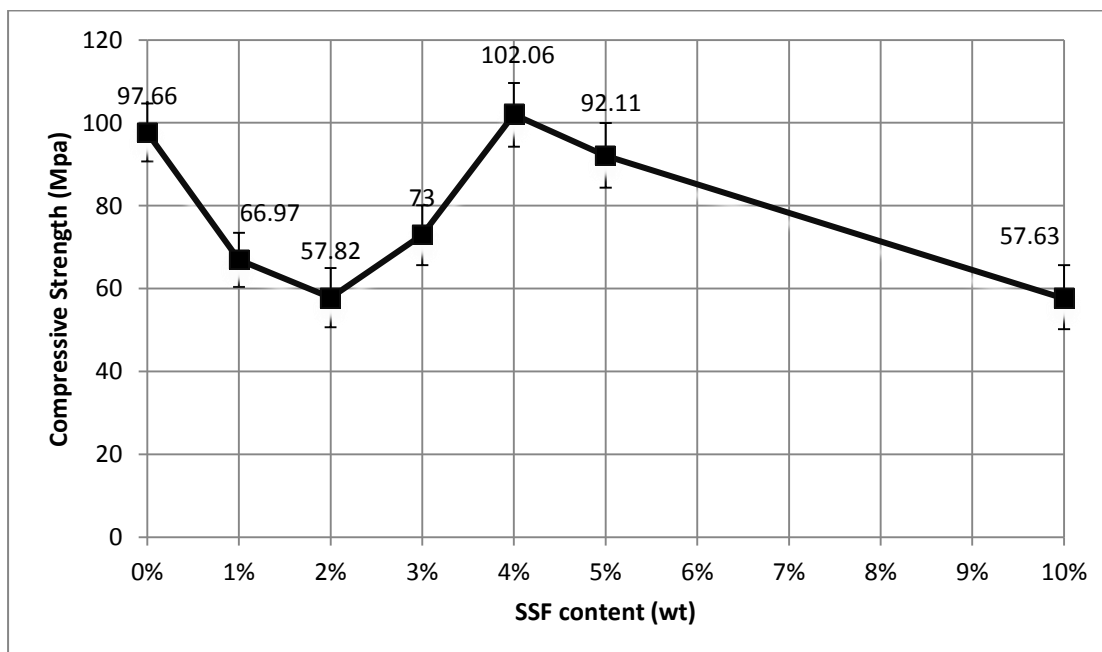
- ✓ Σαν συμπέρασμα για την εποξική μήτρα μπορούμε να πούμε ότι οι φολίδες χάλυβα βοηθούν την ελαστική περιοχή σε περιεκτικότητα 2-3% (wt) όπως και ότι απορροφούν μεγαλύτερη ενέργεια κατά τη συμπίεση λόγω μεγαλύτερου μέσου όρου τάσης από το δοκίμιο αναφοράς.
- ✓ Όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας στα δοκίμια έχουμε μικρή αύξηση μόνο για περιεκτικότητα 3% SSFs (wt) που από τα 111 Joule του δοκιμίου αναφοράς ανέβηκε στα 114 Joule και για τις υπόλοιπες περιεκτικότητες μείωση μέχρι και τα 60 Joule που παρατηρούμε για 10 SSFs.



Σχήμα 5.18 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμίων εποξικής ρητίνης με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) περιεκτικότητα φολίδων χάλυβα



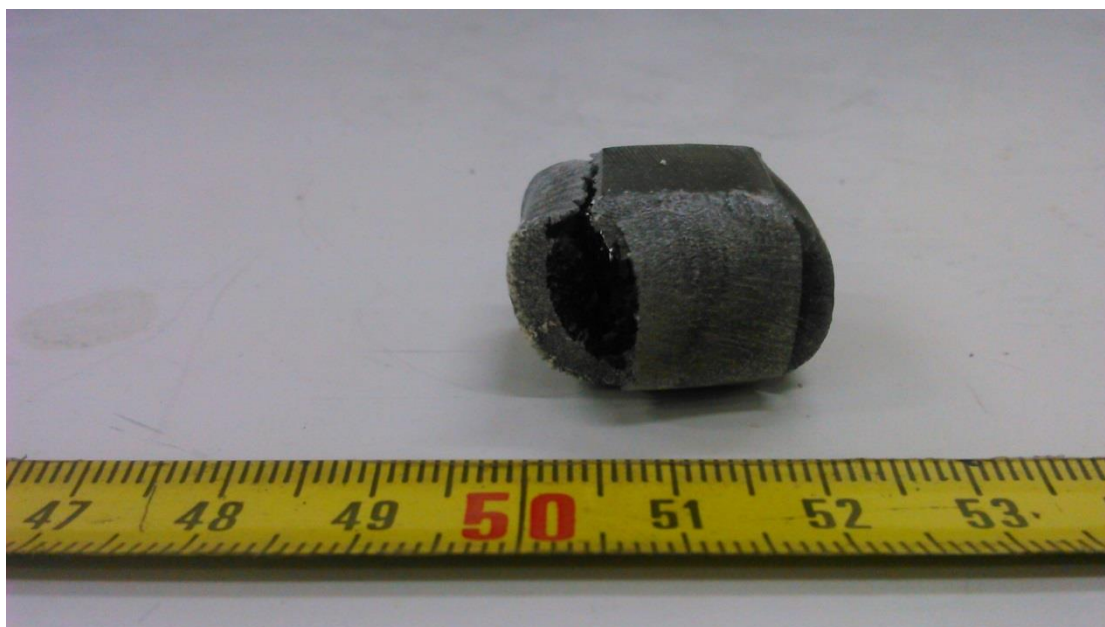
Σχήμα 5.19 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμών εποξικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Σχήμα 5.20 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε συμπίεση (UTS) δοκιμών εποξικής ρητίνης με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Εικόνα 5.62 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 1% σε φολίδες χάλυβα πριν και μετά τη δοκιμή σε συμπίεση



Εικόνα 5.63 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης περιεκτικότητας 2% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση

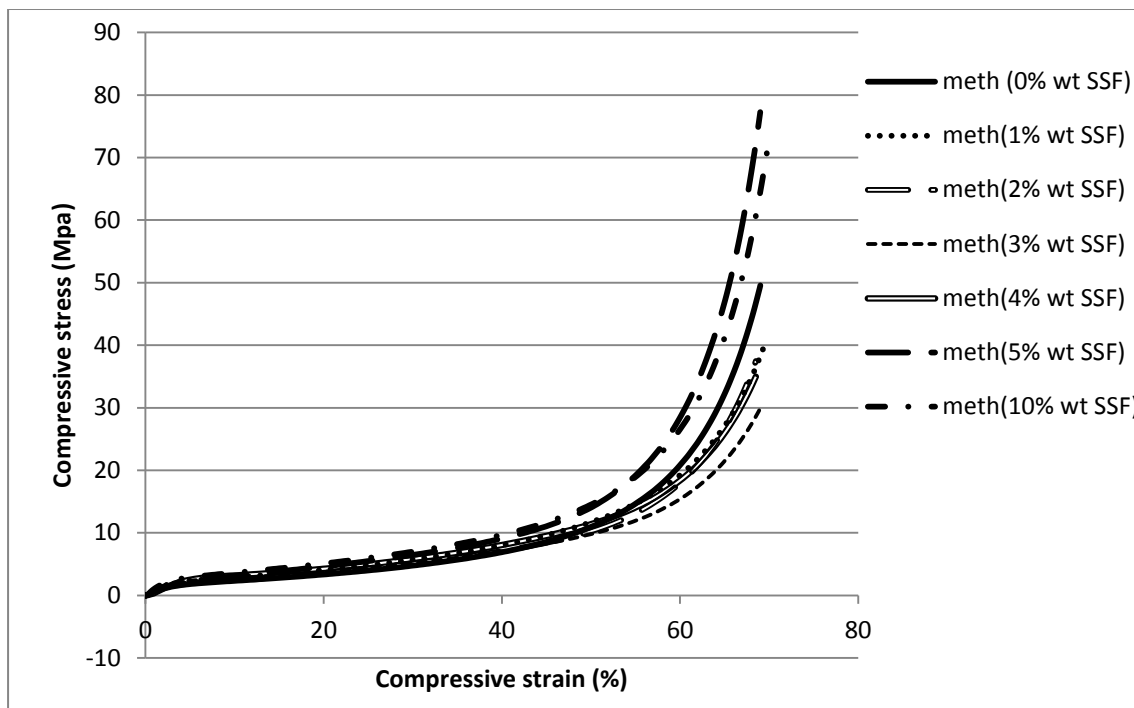


Εικόνα 5.64 Δοκίμο εποξειδικής ρητίνης μετά τη δοκιμή σε συμπίεση

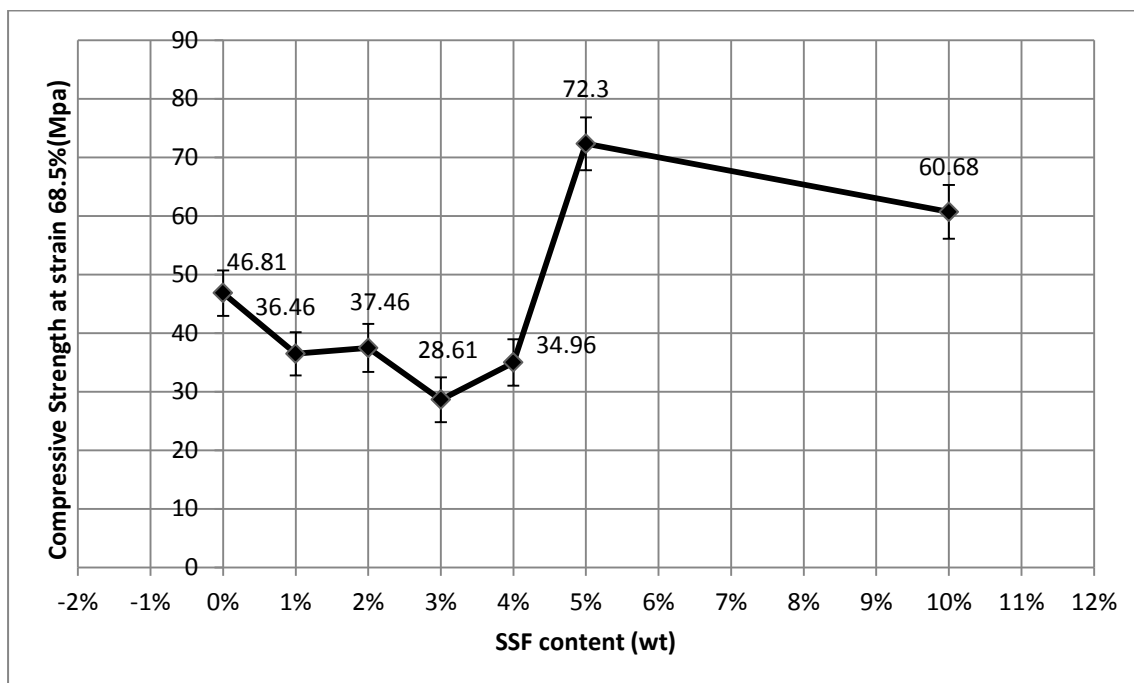
### 5.6.2 Δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας

Οι μετρήσεις από τα πειράματα συμπίεσης δοκιμίων μεθακρυλικής μήτρας με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (SSFs) οδήγησαν στα εξής:

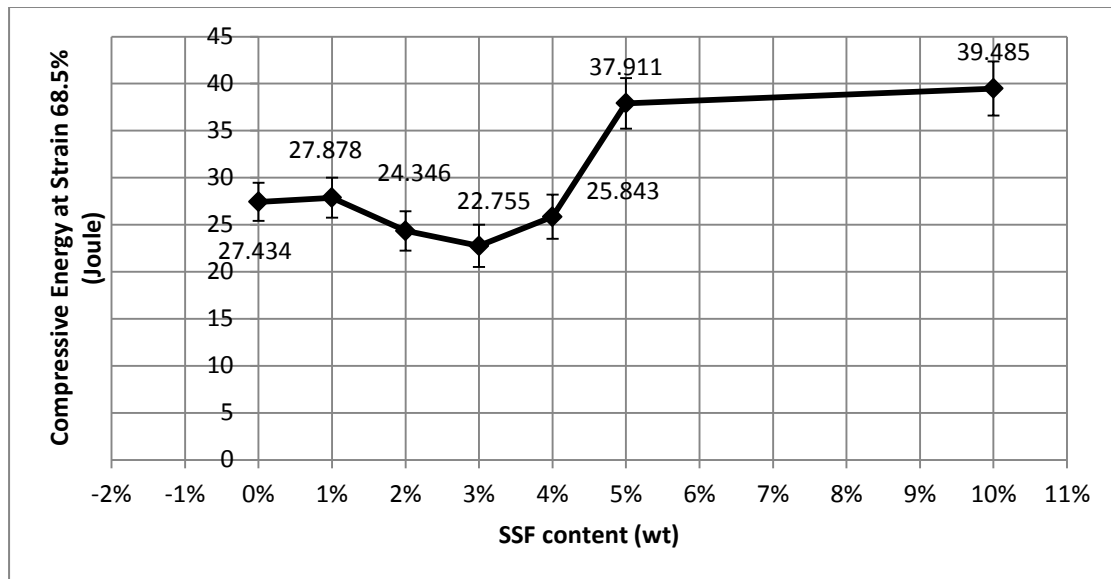
- ✓ Για δεδομένη παραμόρφωση 68.5% όλα τα δοκίμια ενισχυμένα με φολίδες χάλυβα έως 4% περιεκτικότητα πέτυχαν μικρότερη τάση σε συμπίεση από το δοκίμιο αναφοράς (46.8 MPa). Αντίθετα για τα δοκίμια 5% και 10% SSF (wt) έδειξαν τάση 72.3 MPa και 60.7 MPa αντίστοιχα.
- ✓ Όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας στα δοκίμια έχουμε επίσης αύξηση για τις περιεκτικότητες 5% και 10% SSFs (wt) που από τα 27.5 Joule του δοκιμίου αναφοράς ανέβηκε στα 38 Joule και 39.5 Joule αντίστοιχα.
- ✓ Σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι οι φολίδες χάλυβα σε ποσοστό κατά βάρος 5 έως 10% ενισχύουν την αντοχή σε συμπίεση της μεθακρυλικής ρητίνης .
- ✓ Όσον αφορά την επαναφορά ύψους των δοκιμίων μετά την συμπίεση παρατηρούμε αυξητική πορεία της επαναφοράς όσο αυξάνει η περιεκτικότητα SSFs , παρατηρούμε δε ότι μετά το 2% SSFs ο ρυθμός αύξησης της επαναφοράς μειώνεται με την αύξηση περιεκτικότητας.



Σχήμα 5.21 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμών μεθακρυλικής ρητίνης με 0,1,2,3,4 και 5% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα



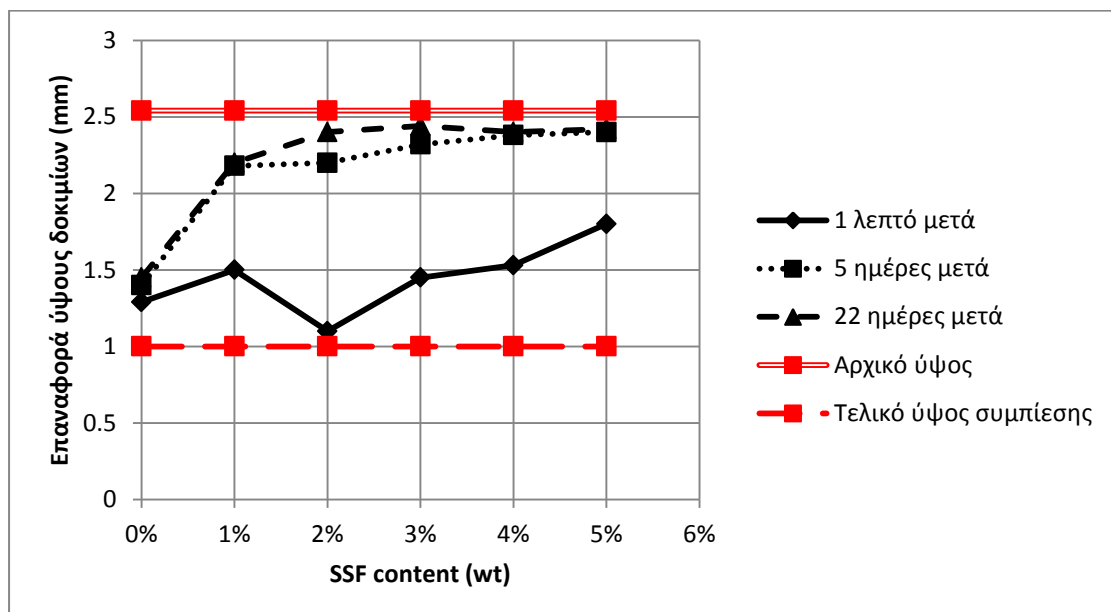
Σχήμα 5.22 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε συμπίεση (UTS) για παραμόρφωση 68.5%, δοκιμών μεθακρυλικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Σχήμα 5.23 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμών μεθακρυλικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF

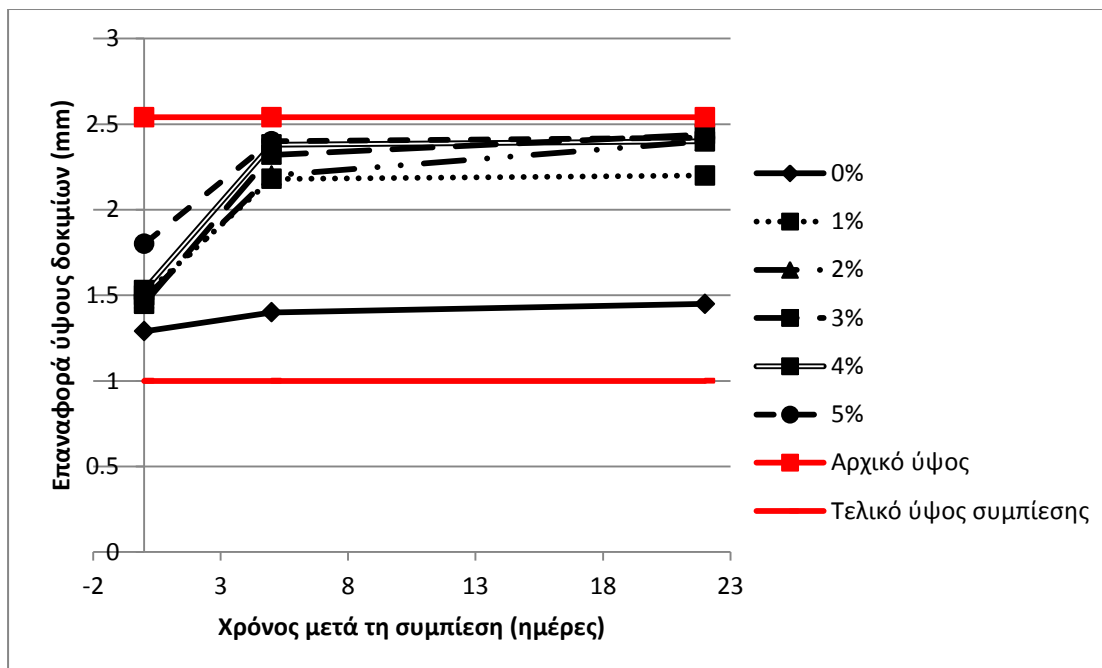
Πέρασ χρόνου από το πείραμα	Ύψος δοκιμών μεθακρυλικής ρητίνης σε σχέση με την περιεκτικότητα SSFs (wt)					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
1 λεπτό	1,29mm	1,5mm	1,48mm	1,45mm	1,53mm	1,8mm
5 ημέρες	1,4mm	2,18mm	2,2mm	2,32mm	2,38mm	2,4mm
22 ημέρες	1,45mm	2,2mm	2,4mm	2,44mm	2,4mm	2,42mm

Πίνακας 13 Επαναφορά παραμόρφωσης με το πέρας του χρόνου για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση



Σχήμα 5.24 Επαναφορά ύψους δοκιμών με το πέρας του χρόνου για δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση με βάση την περιεκτικότητα σε SSF





Σχήμα 5.25 Επαναφορά ύψους δοκιμίων για κάθε περιεκτικότητα SSF (wt) ,δοκιμίων μεθακρυλικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση σε σχέση με το χρόνο που πέρασε από τη συμπίεση



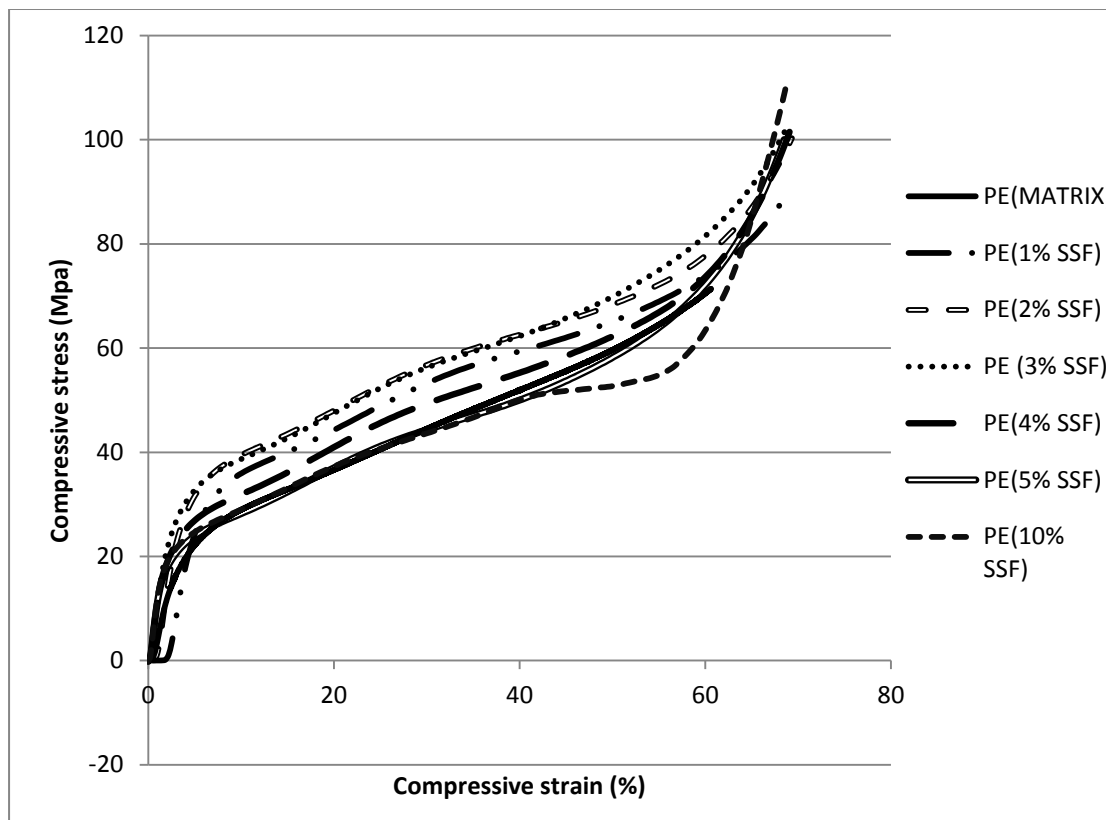
Εικόνα 5.65 Δοκίμο μεθακρυλικής ρητίνης περιεκτικότητας 1% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση



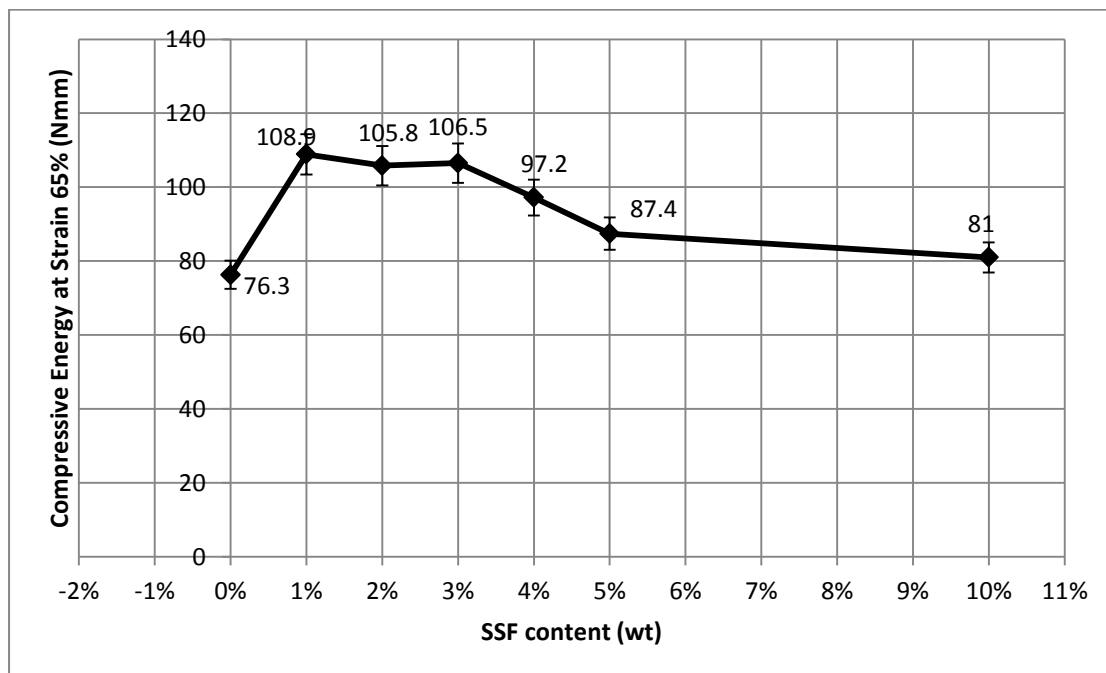
### 5.6.3 Δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας

Οι μετρήσεις από τα πειράματα συμπίεσης δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας με περιεκτικότητες 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα (SSFs) οδήγησαν στα εξής:

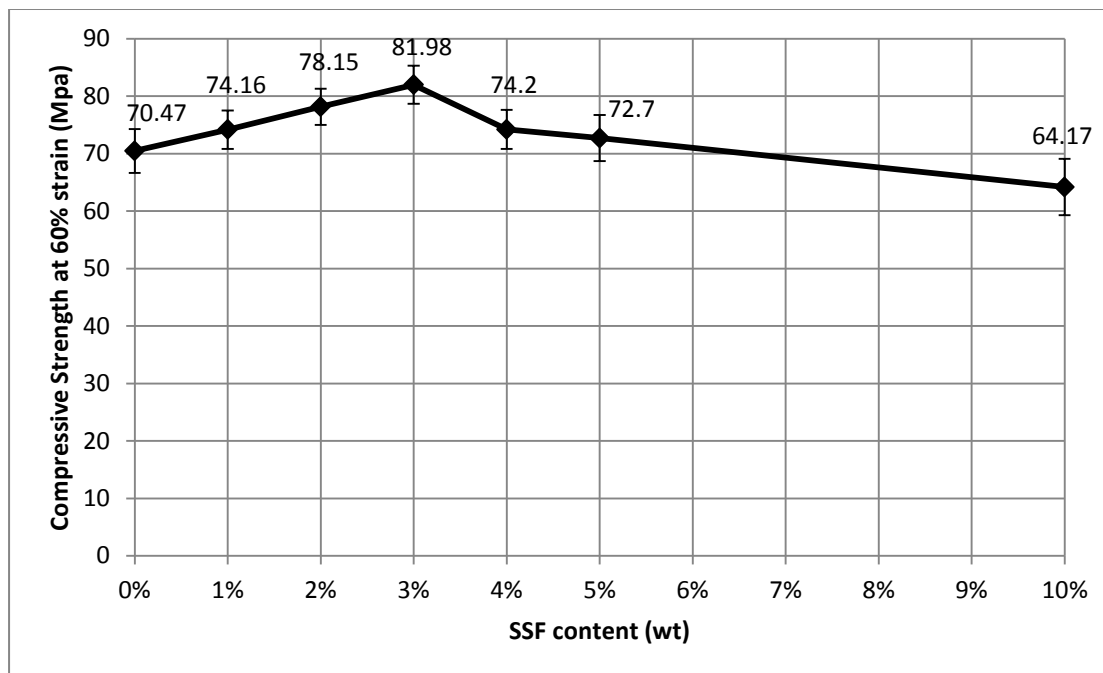
- ✓ Όλες οι περιεκτικότητες SSF (wt) εμφανίζουν μεγαλύτερο όριο διαρροής από το δοκίμιο καθαρού πολυαιθυλενίου (20 MPa) με μεγαλύτερη τιμή (32 MPa) για τα δοκίμια περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα 2% και 3%. Τα δοκίμια περιεκτικότητας 4% και 1% SSF (wt) έρχονται επόμενα με όριο διαρροής 30 MPa και 25 MPa αντίστοιχα. Τέλος τις δυο τελευταίες θέσεις καταλαμβάνουν τα δοκίμια με περιεκτικότητες 5% και 10% SSFs (wt) με όριο διαρροής στα 22 MPa.
- ✓ Το όριο αντοχής για σταθερή παραμόρφωση 60% αυξήθηκε από την τιμή του δοκιμίου αναφοράς (70 MPa), σε όλες τις περιεκτικότητες εκτός από το 10% SSF (wt) με 64 MPa. Μεγαλύτερο όριο αντοχής (81.5 MPa) έχει το δοκίμιο περιεκτικότητας 3% SSF (wt), ακολουθούν το 2% με 79 MPa και το 4% με 75 MPa. Τέλος με όριο αντοχής 72 MPa βλέπουμε το 1% και 5% SSF (wt). Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι οι τιμές απόλυτης αντοχής διαφέρουν από τις παραπάνω και αποτυπώνονται στο Σχήμα 5.18.
- ✓ Σαν συμπέρασμα για την πολυαιθυλενική μήτρα μπορούμε να πούμε ότι οι φολίδες χάλυβα βοηθούν εξίσου την ελαστική και την πλαστική περιοχή σε περιεκτικότητα έως και 5% ενώ από εκεί και πάνω αρχίζουν και πάλι την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων. Μεγαλύτερη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων έχουμε για περιεκτικότητα φολίδων χάλυβα 2% και 3%.
- ✓ Όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας στα δοκίμια έχουμε επίσης αύξηση για όλες τις περιεκτικότητες που από τα 76.35 Joule του δοκιμίου αναφοράς έφτασε μέχρι και τα 109 Joule σε περιεκτικότητα 1% wt SSF.
- ✓ Όσον αφορά την επαναφορά ύψους των δοκιμίων μετά την συμπίεση παρατηρούμε σχεδόν γραμμική μείωση της επαναφοράς όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε φολίδες χάλυβα.



Σχήμα 5.26 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης συμπίεσης - παραμόρφωσης δοκιμών πολυαιθυλενικής μήτρας με 0,1,2,3,4,5 και 10% (wt) ποσοστό φολίδων χάλυβα



Σχήμα 5.27 Συγκριτικό διάγραμμα της συνολικής απορρόφησης ενέργειας δοκιμών πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF (η συνολική ενέργεια μετρήθηκε σε 65% Strain)



Σχήμα 5.28 Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε συμπίεση (UTS) για παραμόρφωση 60%, δοκιμών πολυαιθυλενικής μήτρας με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



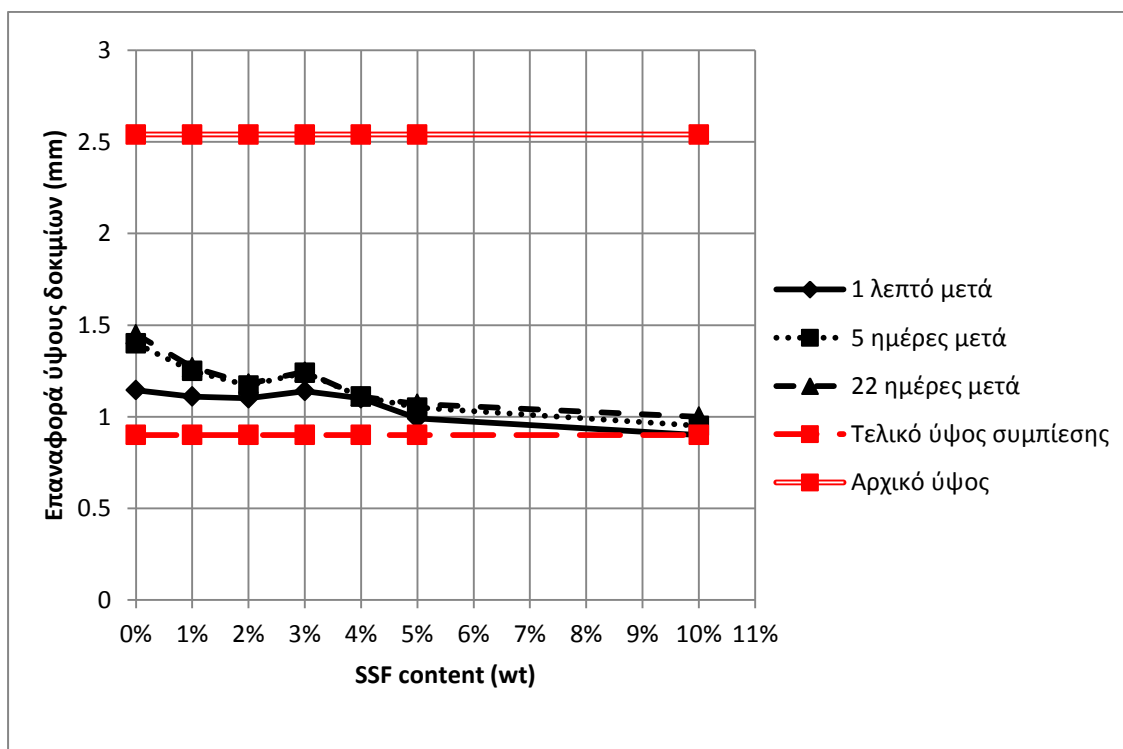
Εικόνα 5.66 Δοκίμο πολυαιθυλενίου πριν και μετά τη δοκιμή σε συμπίεση

Πέρασ χρόνου από το πείραμα	Ύψος δοκιμών πολυαιθυλενίου σε σχέση με την περιεκτικότητα SSFs (wt)						
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	10%
1 λεπτό	1,145mm	1,11mm	1,1mm	1,14mm	1,1mm	0,99mm	0,77mm
5 ημέρες	1,4mm	1,25mm	1,17mm	1,24mm	1,11mm	1,05mm	0,9mm
22 ημέρες	1,45mm	1,27mm	1,18mm	1,245mm	1,11mm	1,07mm	0,95mm

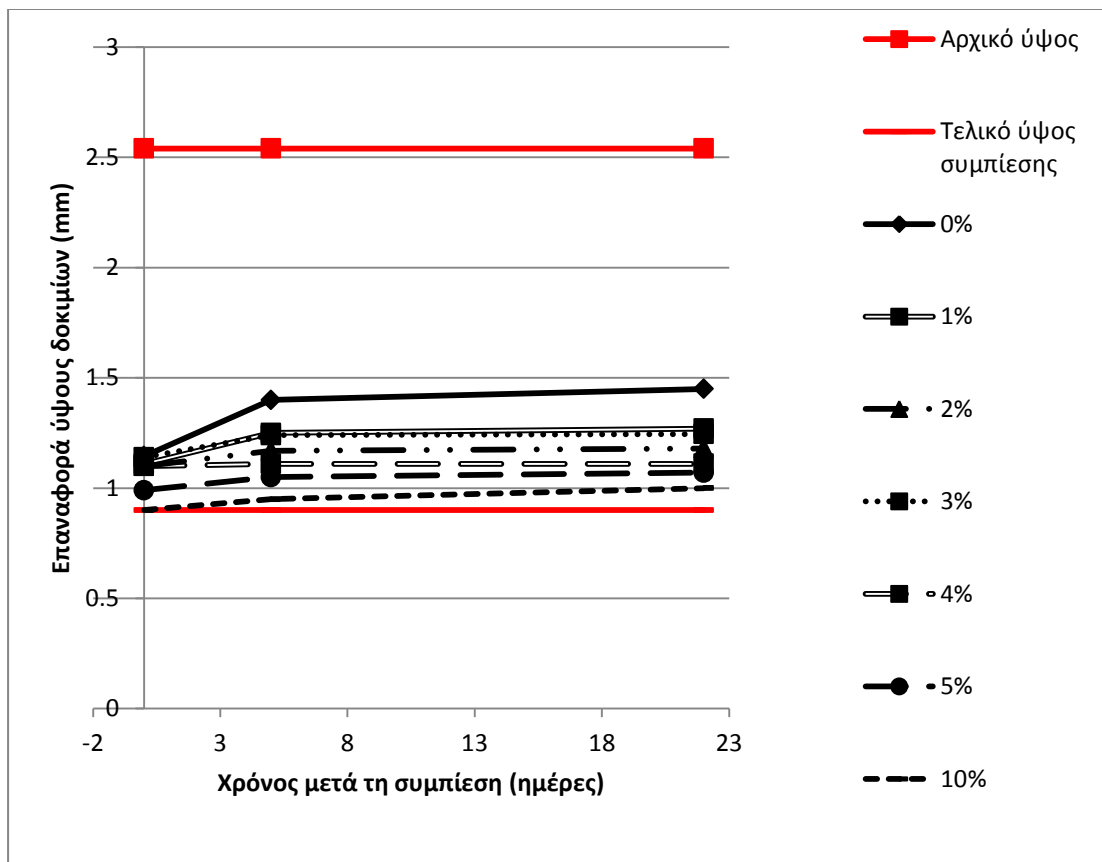
Πίνακας 14 Επαναφορά παραμόρφωσης με το πέρασ του χρόνου για δοκίμια πολυαιθυλενίου που υπέστησαν συμπίεση



Εικόνα 5.67 Δοκίμια πολυαιθυλενίου περιεκτικότητας 0,1,2,3,4,5 και 10% σε φολίδες χάλυβα μετά τη δοκιμή σε συμπίεση



Σχήμα 5.29 Επαναφορά ύψους δοκιμίων με το πέρας του χρόνου για δοκίμια πολυαιθυλενικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση με βάση την περιεκτικότητα σε SSF



Σχήμα 5.30 Επαναφορά ύψους δοκιμίων για κάθε περιεκτικότητα SSF (wt) ,δοκιμίων πολυαιθυλενικής μήτρας που υπέστησαν συμπίεση σε σχέση με το χρόνο που πέρασε από τη συμπίεση

## 6 Συμπεράσματα δοκιμών και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, ως προς τα πεδία ελέγχου στα οποία υποβλήθηκαν τα παραχθέντα δοκίμια:

### 6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από πειράματα

Παρακάτω ακολουθεί μια σύνοψη και σύγκριση των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα πειράματα εφελκυσμού, κάμψης και συμπίεσης των δοκιμίων από σύνθετο υλικό εποξικής, μεθακρυλικής και πολυαιθυλενικής μήτρας με προσθήκη φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (SSFs). Συνολικά, λοιπόν, παρατηρήθηκαν τα εξής:



- **Δοκίμια εποξικής μήτρας**

Οι φολίδες χάλυβα βελτιώνουν αισθητά την επίδοση σε συμπίεση της εποξικής ρητίνης. Παρατηρήθηκε βελτίωση της ελαστικής και πλαστικής περιοχής για περιεκτικότητα 2-3% και βελτίωση του ορίου θραύσης για περιεκτικότητα 4% σε φολίδες χάλυβα.

Ουδέτερη επίπτωση έχουν οι φολίδες χάλυβα στην περίπτωση του εφελκυσμού εποξικής ρητίνης όπου η μόνη διαφορά που επέφεραν είναι η μικρή αύξηση της παραμόρφωσης για περιεκτικότητες από 1 έως 5% SSF.

Τέλος αρνητικές συνέπειες επέφεραν στην περίπτωση της κάμψης τριών σημείων όπου οι μηχανικές ιδιότητες της εποξικής ρητίνης υποβιβάζονται αισθητά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα.

- **Δοκίμια μεθακρυλικής μήτρας**

Οι φολίδες χάλυβα βελτιώνουν αισθητά την επίδοση σε συμπίεση και την απορρόφηση ενέργειας της μεθακρυλικής ρητίνης σε περιεκτικότητα 5% και 10% , ενώ για περιεκτικότητα από 1-4% την υποβαθμίζουν.

Ακόμα παρατηρήθηκε μεγαλύτερη επαναφορά των δοκιμίων προς το αρχικό τους μέγεθος όσο αυξάνεται το ποσοστό περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα.

Για την περίπτωση του εφελκυσμού παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής μόνο για την περιεκτικότητα 4% σε φολίδες ανοξειδωτου χάλυβα. Αυτό όπως μπορούμε να δούμε και στην εικόνα 5.45 ίσως οφείλεται σε δημιουργία νέων πόρων κατά τον εφελκυσμό και ξεκίνημα μικρορωγμών από αυτούς. Αυτό σαν συνέπεια έχει την μερική ανακούφιση των τάσεων και την παράταση της αντοχής του δοκιμίου. Το σημείο θραύσης τελικώς είναι ένα από τα σημεία που αναφέρθηκε παραπάνω( εικόνα 5.46).

- **Δοκίμια Πολυαιθυλενικής μήτρας**



Οι φολίδες χάλυβα βελτιώνουν κατά πολύ την ελαστική και πλαστική περιοχή στο πείραμα συμπίεσης για περιεκτικότητες από 1 έως 4% ενώ αυξάνουν το όριο αντοχής σχεδόν ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα.

Ακόμα παρατηρήθηκε μικρότερη επαναφορά των δοκιμών προς το αρχικό τους μέγεθος όσο αυξάνεται το ποσοστό περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα.

Στο πείραμα του εφελκυσμού παρατηρήθηκε αύξηση της παραμόρφωσης σε περιεκτικότητες φολίδων χάλυβα 2% και 3% ενώ για τις περιεκτικότητες 1%, 5% και 10% εξαφανίστηκε η πλαστική περιοχή από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

Τέλος αρνητικές συνέπειες επέφεραν στην περίπτωση της κάμψης τριών σημείων όπου οι μηχανικές ιδιότητες της πολυαιθυλενικής μήτρας υποβιβάζονται αισθητά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα.

Σαν συνολικό συμπέρασμα έχουμε την βελτίωση της επίδοσης σε συμπίεση σε όλες τις μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία (εποξική ρητίνη, μεθακρυλική ρητίνη, πολυαιθυλένιο). Επίσης βελτιώθηκε η σκληρότητα κατά 13% και 15% για μήτρα εποξικής ρητίνης και πολυαιθυλενίου αντίστοιχα. Στο πείραμα του εφελκυσμού υπήρξε καλύτερευση των ιδιοτήτων σε συγκεκριμένες περιεκτικότητες σε χάλυβα για την κάθε μήτρα. Τέλος για το πείραμα κάμψης τα αποτελέσματα ήταν αρνητικά αφού η αντοχή των δοκιμών μειώθηκε αισθητά, αυτό ήταν σε ένα βαθμό αναμενόμενο διότι τα μεταλλικά σωματίδια υποβιβάζουν την αντοχή σε κάμψη πολυμερικών μητρών.

## **6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτά, προέκυψαν ορισμένα σημεία, τα οποία αξίζουν περαιτέρω προσοχής και ενδεχομένως έρευνας.

Καθώς ο μικροσκοπικός έλεγχος έδειξε την ύπαρξη πορώδους κατά τη διατομή του υλικού, πράγμα που σημαίνει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων, αποτελεί ενδιαφέρον θέμα η παρασκευή δοκιμών, κατά την οποία έχουν ληφθεί μέτρα για τη μείωση του πορώδους. Ο πιο απλός τρόπος είναι η προσθήκη ειδικών αντιαφριστικών μέσων





(defoamers και air release additives) για την απομάκρυνση των εγκλεισμάτων αέρα. Παράλληλα, στο εμπόριο διατίθενται και ειδικά πρόσθετα για την καλύτερη διασπορά και προσκόλληση των σωματιδίων στη μήτρα του συνθέτου υλικού (wetting and dispersing additives). Μια άλλη μέθοδος για την απομάκρυνση αέρα αποτελεί η τοποθέτηση του μίγματος ρητίνης-εγκλεισμάτων σε περιβάλλον κενού, όπου αναρροφάται ο αέρας από το υλικό, προτού αυτό εγχυθεί σε καλούπι. Τέλος οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι για τη διασπορά των εγκλεισμάτων και την αποφυλλοποίηση των συσσωματωμάτων είναι οι μηχανικές μέθοδοι, όπως η Three Rolls Mill και η τοποθέτηση του μίγματος ρητίνης σε λουτρό υπερήχων. Επίσης, για την εξαγωγή ακριβών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της προσθήκης φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα, προτείνεται και η παρασκευή συνθέτων υλικών με διαφορετικά εγκλείσματα σε σχέση με αυτά που παρήχθησαν στην παρούσα εργασία, ώστε να διαπιστωθεί η ακριβής επίδραση των διαφορετικών υλικών των εγκλεισμάτων στη συμπεριφορά του.

Σε άλλες εφαρμογές χρησιμοποιείται είτε για την ηλεκτρική ή την θερμική αγωγιμότητά, επομένως μετά από κατάλληλες δοκιμές μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και προς αυτές τις κατευθύνσεις της επίδρασης του χάλυβα στις ιδιότητες του συνθέτου υλικού.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κ. Μπουντίνας και Μ. Λεζκίδου, 2001, Ανακύκλωση πλαστικών, Τζιόλας.
- [2] Α.Δ. Γκότσης, 2007, Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών, Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης,.
- [3] Κ. Μπέλτσιος, 2003, Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών, Εκδ. Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
- [4] W.D. Callister, 2004, Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, Εκδ. Τζιόλα.
- [5] K. Krishan Chawla, 1998, Composite Materials Science Engineering, Second Edition, USA
- [6] S. T. Peters, 2013, Handbook of Composites, Second Edition, Charpman and Hall
- [7] Γ. Αθανασάκος , 2008, Στατικές και Δυναμικές Ελαστικές Σταθερές των Κοκκωδών Συνθέτων Υλικών, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα.
- [8] K.D.Ziegel, H.K.Frensdorff and A.W.Fogiel, 1967, J. Appl.Pol.Sci.



- [9] Ν.Γ. Τσούβαλης, 1998, Μηχανική Συνθέτων Υλικών, Σημειώσεις Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Αθήνα.
- [10] C.D. Papaspyrides, J.G. Poulakis, and C.D. Arvanitopoulos, 1995, Recycling of glass fiber reinforced thermo-plastic composites. I. ionomer and low density polyethylene based composites. Resources, Conservation and Recycling.
- [11] Α.Δ. Γκότσης, 2006, Σημειώσεις ανακύκλωσης πολυμερών, Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης.
- [12] N. Dautzenberg and H.Gessel, 1976, Production Technique and Properties of Austenitic Gr-Ni Stainless Steel Powders, Powder Metall. Int. Vol 8 (No 1).
- [13] G. Schulz, 2000, Melt Film Gas Atomization – The key to Cheaper MIM Powders, Second European Symposium on Powder Injection Molding, EPMA Munich Germany.
- [14] L. Tremblay, F. Chagnon and Y.Thomas, 2000, Enhancing Green Strength of P/M Materials, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, MPIF.
- [15] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, 2000, Γενική Μεταλλογνωσία, Πανεπιστημιακές Εκδοσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [16] P.U. Gummesson, 1972, Modern Atomizing Techniques, Powder Metallurgy, Vol. 15 (No 290).
- [17] Κ. Παπανικολάου, 2008, Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. εκδ. Κλειδάριθμος.
- [18] J.-P. Birat, 2006, Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective, a Revue de Métallurgie – CIT, (no 11).
- [19] A.J. Yule and J.J. Dunkeley, 1994, Atomization of Melts, Claredon Press, Oxford.
- [20] R.C. Leyton and O. Andersson, 2002, High Density Sintered Stainless Steel with Close Tolerances, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, MPIF Vol 7.
- [21] Ε. Ιορδανίδου, 2010, Βελτιστοποίηση ενισχυμένων δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων.
- [23] E. Klar, P.K. Samal, 2007, Powder Metallurgy Stainless Steels, Processing, Microstructures and Properties, ASM International, USA.
- [24] Ε. Δρακόπουλος, 2010, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [25] D. Hull and T.W. Clyne, 2003, An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press.



- [26] N. Taniguchi, 1974, On the Basic Concept of “Nano-Technology” , Proceeding of the Production Engineering International Conference, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo.
- [27] H.W. Kroto, Heath J.R., O’Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E., 1985, Buckminsterfullerene, Nature.
- [28] P.M. Ajayan, Schadler L.S., Braun P.V., 2003, Nanocomposite science and technology, Wiley Editions.
- [29] Α. Χρήστος Παπαδόπουλος, 2009, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [30] N. Cox Brian and G. Flanagan, 1997 , Handbook of analytical methods for textile composites. NASA Contractor Report 4750.
- [31] ASTM D790 – 03, 2003, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International.
- [32] ASTM D882 – 02, 2002, Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM International.
- [33] ASTM D695 – 02a, 2002, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics , ASTM International.
- [34] R. Brown, 1999, Handbook of Polymer Testing: Physical Methods, CRC Press, USA.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

*Επίδραση φολίδων ανοξειδωτού  
χάλυβα στις μηχανικές ιδιότητες  
πολυμερικών μητρώων*

Διπλωματική εργασία  
του  
Σοφρά Κωνσταντίνου