

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΓΚΕΚΑ ΣΟΦΙΑ (Α.Μ. 5730)
ΜΟΥΣΤΕΡΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ (Α.Μ. 5738)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΘΕΩΝΗ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την καθηγήτριά μας Θεώνη Ασημακοπούλου για την καθοδήγηση και τη συνεχή παρότρυνση για αναζήτηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και τον αναπληρωτή καθηγητή Θεόδωρο Π. Φιλιππίδη που μας επέτρεψε να εκπονήσουμε το πειραματικό σκέλος της εργασίας στο Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών και τον καθηγητή μας κ. Στέφανο Τσινόπουλο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε για την ολοκλήρωση και την αρτιότητα της πτυχιακής εργασίας μας.

Πάτρα, 15 Μαΐου 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών και αναφέρεται στην μεθοδολογία προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων σε σύνθετα υλικά τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Όπως είναι γνωστό, ιδιαίτερα όσον αφορά τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών συνδυάστηκε με την προηγηθείσα ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και την έντονη τάση της βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους.

Εν αρχή, μελετάται η φύση των σύνθετων υλικών, καθώς και οι μέθοδοι μορφοποίησης τους και αναπτύσσονται μέθοδοι χαρακτηρισμού ενός σύνθετου υλικού, όπως επίσης οι απαιτούμενες μετρήσεις κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Στην συνέχεια, αναλύεται η προετοιμασία των δοκιμίων και η πειραματική διαδικασία, επίσης, από την οποία και εξετάζουμε τα αποτελέσματα που απεικονίζονται μέσω πινάκων και διαγραμμάτων.

Η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής και εκπονήθηκε αποκλειστικά από τις συγγραφείς της.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)



(Υπογραφή)

(Ονοματεπώνυμο)



(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2. Η φύση των σύνθετων υλικών.....	2
1.2.1 Τι είναι τα σύνθετα υλικά.....	2
1.2.2 Μέρη σύνθετων υλικών.....	3
1.2.3 Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών.....	5
1.2.4 Μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών.....	5
1.2.5 Εφαρμογές των συνθέτων υλικών.....	6
1.3 Διαφορά ισότροπων με ανισότροπα υλικά.....	8
1.4 Μέθοδοι επίστρωσης (Lay-up Techniques).....	8
1.4.1 Μέθοδοι επίστρωσης με το χέρι.....	8
1.4.2 Μορφοποίηση με χρήση ασκού κενού	10
1.4.3 Χαρακτηριστικά των μεθόδων επίστρωσης.....	11

2. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

2.1 Χαρακτηρισμός σύνθετου υλικού.....	13
2.1.1 Μηχανικές ιδιότητες.....	13
2.1.2. Διαφορά ισότροπων υλικών με τα ανισότροπα με βάση το νόμο Hooke.....	13
2.1.3. Αριθμός απαραίτητων δοκιμών.....	15
2.2 Απαιτούμενες μετρήσεις κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.....	15
2.2.1 Τι είναι μηκυνσιόμετρο.....	15
2.2.2 Αρχή λειτουργίας μηκυνσιομέτρου.....	16
2.3 Γέφυρα Wheatstone.....	18
2.3.1 Ορισμός γέφυρας Wheatstone.....	18

3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1 Γενική περιγραφή διαδικασίας.....	20
3.2 Ονομασία δοκιμών.....	26

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Εκτέλεση πειράματος.....	26
4.2 Καταγραφή δεδομένων μέσω της συσκευής HBM SPIDER8.....	29

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	31
--	----

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	33
------------------------------	----

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	47
----------------------	----

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	49
------------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	50
------------------	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	65
------------------	----

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων 2 μονοδιευθυντικών (unidirectional, UD) συνθέτων GI/Ep (εποξειδικής ρητίνης με ενίσχυση υαλονημάτων), μέσω της διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ISO, καθώς και η εξοικείωση με την τοποθέτηση και τη χρήση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain-gauges). Το ένα από τα δυο σύνθετα ήταν κατασκευασμένο με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (WET HAND LAY-UP) ενώ το δεύτερο με επίστρωση με το χέρι παρουσία κενού (VACUUM BAGGING). Από τη σύγκριση των ιδιοτήτων που μετρήθηκαν στα δυο σύνθετα, προκύπτουν επίσης χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου κατασκευής.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο αναφέρεται ο ορισμός των σύνθετων υλικών, καθώς και τα μέρη από τα οποία αποτελούνται αυτά, και γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Ακολουθεί η παράθεση των πλεονεκτημάτων αλλά και των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά συγκριτικά με τα συμβατικά, ευρέως χρησιμοποιούμενα, μεταλλικά υλικά, καθώς και αναφορά στις εφαρμογές τους. Επίσης, αναπτύσσονται οι διαφορές ισότροπων και ανισότροπων υλικών και στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφονται οι δυο μέθοδοι κατασκευής ινωδών συνθέτων υλικών που εξετάζονται στην εργασία.

Στο πρώτο μέρος του δεύτερου κεφαλαίου αναφέρονται οι απαραίτητες πειραματικές δοκιμές για το χαρακτηρισμό ενός σύνθετου υλικού, δηλαδή τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του, ενώ στο δεύτερο μέρος περιγράφονται οι απαραίτητες μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών αυτών. Στο σημείο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στο κύριο μετρητικό όργανο (ηλεκτρομηκυνσιόμετρο ή, συντομότερα, μηκυνσιόμετρο).

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της προετοιμασίας των δοκιμών, η οποία απεικονίζεται σε αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των επιμέρους βημάτων τοποθέτησης των μηκυνσιομέτρων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, ξεκινώντας από την τοποθέτηση του δοκιμίου στην μηχανή και φτάνοντας έως και την απομάκρυνσή του από την μηχανή μετά τη θραύση.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που απαιτήθηκε ώστε να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των δυο συνθέτων.

Το έκτο κεφάλαιο ασχολείται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές. Παρατίθενται οι πίνακες των αποτελεσμάτων καθώς και αντιπροσωπευτικά διαγράμματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Στο έβδομο κεφάλαιο καταγράφονται τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, που αναδεικνύουν το σύνθετο που αποδεικνύεται πως διαθέτει τις καλύτερες ιδιότητες.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ανθεκτικότερες και ελαφρότερες κατασκευές οδήγησαν στην ανάπτυξη και εισαγωγή νέων δομικών υλικών. Μια τέτοια κατηγορία ήταν τα σύνθετα υλικά. Η αύξηση της αντοχής ή/και η μείωση του βάρους έχουν ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Το συγκριτικό πλεονέκτημα των νέων αυτών σύνθετων υλικών είναι οι υψηλές τιμές ειδικής αντοχής, δηλαδή του λόγου της αντοχής τους ως προς το βάρος. Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, τα αθλητικά είδη υψηλών επιδόσεων και η αεροδιαστημική.

Εκτός της αεροπορικής βιομηχανίας, τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλους τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Πτερύγια ανεμογεννητριών, ναυτικά σκάφη, κουπιά, ποδήλατα, παντός είδους αθλητικά είδη (ρακέτες τένις, μπαστούνια γκόλφ, ιστιοσανίδες, παγοπέδιλα κλπ.) και σχεδόν κάθε εξάρτημα όπου το βάρος, η δυσκαμψία και η αντοχή παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα, μπορεί ενδεχομένως πια να κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε ινώδη σύνθετα υλικά. Στην πράξη, οι μεγαλύτερης κλίμακας κατασκευές από ινώδη σύνθετα ενισχύονται με ίνες γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου.

Οι ίνες άνθρακα μπορεί να παρουσιάζουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι ιδιότητές τους τις καθιστούν απαραίτητα ενισχυτικά μέσα σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως στην αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία, ενώ η χρήση τους στην αυτοκίνηση και σε αθλητικά είδη κατακτά συνεχώς περισσότερο έδαφος, ιδιαίτερος καθώς το κόστος τους μειώνεται.

Αν και η ιδέα της κατασκευής και χρήσης συνθέτων υλικών ανάγεται στην αρχαιότητα, η ανάπτυξη νέων τεχνικών, η χρήση νέων πρώτων υλών και η ποικιλία των δυνατών συνδυασμών των επιμέρους φάσεων οδήγησε στην ανάπτυξη ακόμα πιο βελτιωμένων υλικών, ενώ η έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή συνεχίζεται με αυξανόμενο ρυθμό. Χαρακτηριστική είναι η πρόσφατη σχετικά εμφάνιση και συνεχής ανάπτυξη των νανοσύνθετων, στα οποία προσθήκη μικρού ποσοστού εγκλείσματος έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών, θερμικών ή και ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες των νανοσύνθετων είναι συνήθως βελτιωμένες σε σχέση με ένα αντίστοιχο σύνθετο υλικό ίδιας σύστασης.

Η βασική ιδέα στην ανάπτυξη ενός σύνθετου υλικού είναι η φυσική ανάμιξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών και η δημιουργία ενός νέου υλικού, με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες αυτών που το αποτελούν. Με την κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών, καθώς και της τεχνικής ανάμιξής τους, μπορεί να κατασκευαστούν σύνθετα υλικά με τις εκάστοτε επιθυμητές τελικές ιδιότητες.

Η ιστορία των σύνθετων υλικών χάνεται στα βάθη των αιώνων. Ένα από τα παλαιότερα καταγεγραμμένα παραδείγματα εντοπίζεται στη Βίβλο: πρόκειται για την ανάμιξη άχυρου με λάσπη, με σκοπό την κατασκευή των τούβλων που δομούσαν τις κατοικίες και τα ανάκτορα. Το γνωστότερο σύνθετο στην ιστορία είναι η ασπίδα του Αχιλλέα, χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετης κατασκευής αποτελούμενη από πέντε στρώσεις μετάλλων, χρυσό, άργυρο, μπρούντζο, κασσίτερο και σίδηρο. Η

ασπίδα του Αίαντα, επίσης, είχε τη δομή ολόσωμης μυκηναϊκής ασπίδας κατασκευασμένης από επτά στρώματα δέρματος και ένα εξωτερικό χάλκινο στρώμα.

Προηγμένα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται μαζικά από το 1935, με τη χρήση υαλοβάμβακα ως ενισχυτικό μέσο σε πλαστικά. Αυτά τα πρώιμα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε πολεμικές αεροπορικές κατασκευές. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 κατασκευάστηκαν τα πρώτα ημιδιαφανή πλαστικά (με ενίσχυση ινών γυαλιού), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή πλαστικών επικαλύψεων στα σκάφη, σε σκελετούς αυτοκινήτων και καμπίνες φορτηγών.

Η ιστορία των πολυμερικών σύνθετων υλικών ξεκινάει με την παραγωγή της εποξειδικής ρητίνης το 1939. Τότε, οι ίνες άνθρακα με τη μορφή που είχαν, δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές αφού υστερούσαν σε αντοχή και κατά συνέπεια δεν αποτελούσαν αποτελεσματικό μέσο ενίσχυσης. Όμως, από το 1963, με την ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων παραγωγής, το προϊόν βελτιώθηκε και η χρήση του επεκτάθηκε σε ειδικές εφαρμογές όπου το κόστος δεν αποτελούσε πια αποτρεπτικό παράγοντα, όπως στην κατασκευή αεροσκαφών και την παραγωγή αθλητικών ειδών. Στην τελευταία δεκαετία του αιώνα οι ίνες αραμιδίου, με την εμπορική ονομασία Kevlar49, οι ίνες άνθρακα (carbon) καθώς και οι ίνες γυαλιού (glass), ενισχύουν τα υλικά μήτρας επιδεικνύοντας εξαιρετικά υψηλές τιμές αντοχής και δυσκαμψίας.

Όσον αφορά στα σύνθετα με ίνες γυαλιού, που είναι και το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας, αυτά εμφανίστηκαν το 1942 σε μήτρα πολυεστέρα (glass fiber reinforced polyester, GRP). Η εξέλιξη του τρόπου επεξεργασίας του συνθέτου αυτού αποτέλεσε βασικό παράγοντα ώστε το προϊόν να καταστεί στη συνέχεια εμπορεύσιμο. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα προέρχεται από τον τομέα της ναυπηγικής, όπου τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο, έχουν σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί από σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Η χρήση των υλικών αυτών επέτρεψε σε μικρές βιομηχανίες την κατασκευή σκαφών αναψυχής με χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και παραγωγή ενιαίων τμημάτων με χύτευση σε καλούπια αλλά και την επισκευή τους με σχετικά χαμηλό κόστος.

1.2 Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.2.1 Τι είναι τα σύνθετα υλικά

ΟΡΙΣΜΟΣ (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.*

Ένα σύνθετο είναι ένα πολυφασικό υλικό του οποίου οι συνιστώσες φάσεις είναι χημικά ανόμοιες και διαχωρίζονται με διακριτή διεπιφάνεια. Έτσι, τα κράματα μετάλλων και τα κεραμικά δεν συγκαταλέγονται σε αυτόν τον ορισμό.

Πολλά σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Τότε η μία από αυτές ονομάζεται μήτρα. Η μήτρα είναι συνεχής και περιβάλλει τη δεύτερη φάση, η οποία ονομάζεται δισπαρμένη ή ενισχυτική φάση. Σε ένα σύνθετο υλικό μπορούν να απαντηθούν παραπάνω από δύο φάσεις ή/και διαφορετικών ειδών πληρωτικά μέσα.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνιστωσών τους φάσεων, των σχετικών αναλογιών τους καθώς και της γεωμετρίας της διασπαρμένης φάσης. Τα σύνθετα χαρακτηρίζονται, όπως προαναφέρθηκε, από την ύπαρξη διεπιφάνειας μεταξύ των συστατικών τους. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη, κατά το δυνατόν, συνεργασία μεταξύ της μήτρας και του ενισχυτικού μέσου είναι απαραίτητο να υπάρχει πλήρης μεταξύ τους επαφή με ανάπτυξη ισχυρού συγκολλητικού δεσμού.

1.2.2 Μέρη σύνθετων υλικών

Μήτρα

Η μήτρα των σύνθετων υλικών είναι ζωτικής σημασίας, αφού λειτουργεί ως συνδετικός παράγοντας μεταξύ των ενισχυτικών μέσων, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στην εφαρμοζόμενη στο σύνθετο τάση να μεταφέρεται αρμονικά στις ίνες. Η μήτρα επομένως δεν φορτίζεται με όλη την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση. Αντίθετα, η φόρτιση μεταφέρεται στο υλικό ενίσχυσης και από αυτό παραλαμβάνεται. Ένα άμεσο αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται έτσι είναι η αύξηση της αντοχής της μήτρας σε εφελκυσμό. Μερικά τυπικά είδη πολυμερικής μήτρας δίνονται στον Πίν. 1.1.

Άλλες λειτουργίες της μήτρας είναι να προστατεύει το υλικό της ενίσχυσης και να αποτρέπει τη διάδοση ρωγμών προς το εσωτερικό του υλικού. Οι πολυμερικές μήτρες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις θερμοσκληρυνόμενες (thermosetting) και τις θερμοπλαστικές (thermoplastic). Για λόγους πληρότητας αξίζει να αναφερθεί πως εκτός των πολυμερικών, υπάρχουν και οι κεραμικές (ceramic) αλλά και οι μεταλλικές μήτρες (metal).

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικά είδη πολυμερικής μήτρας

Υλικό μήτρας	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)
Εποξειδική ρητίνη	35-85
Πολυιμίδιο	120
Πολυσουλφόνη	75

Ενισχυτική φάση

Η ενισχυτική φάση είναι αυτή που προσδίδει στο σύνθετο τις βελτιωμένες ιδιότητες του συγκριτικά με τις ιδιότητες της μήτρας. Οι τάσεις μεταφέρονται στην ενισχυτική φάση από τη μήτρα, μέσω της μεταξύ τους διεπιφάνειας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενίσχυσης. Μπορεί να έχουν μορφή ινών, κόκκων (σωματιδίων), υβριδική μορφή, αλλά και αλληλοδιαχεόμενων δικτύων (IPN). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση ανήκουν σε διάφορες κατηγορίες υλικών, όπως μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή (Πίν. 1.2, 1.3, 1.4).

Παρακάτω καταγράφονται οι τρεις κύριες κατηγορίες ενίσχυσης ινώδους μορφολογίας. Η κυριότερη διαφορά τους είναι η διάμετρος. Διάφοροι μικροσκοπικοί παράγοντες όπως η δομή και η επιφανειακή μορφολογία κάθε τύπου ενίσχυσης διαφέρουν από υλικό σε υλικό και αυτό επίσης επιφέρει διαφορές στις ιδιότητες της εκάστοτε διεπιφάνειας (ενδιάμεσης φάσης). Κάτι τέτοιο βέβαια επηρεάζει τον τρόπο μεταφοράς του φορτίου και άρα κατ' επέκταση και τις τελικές ιδιότητες του συνθέτου.

Πίνακας 1.2: Βελόνες (whiskers)

Υλικό	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
Γραφίτης	20
Καρβίδιο πυριτίου	20
Νιτρίδιο πυριτίου	14
Αλουμίνιο	14-28

Πίνακας 1.3: Ίνες

Υλικό	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
Kevlar49	3.5
E-glass	3.5
Carbon	1.5-5.5
Αλουμίνιο	2.1
Καρβίδιο πυριτίου	3.9

Πίνακας 1.4: Μεταλλικά σύρματα

Υλικό	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
Χάλυβας υψηλής αντοχής	4.1
Μολυβδένιο	1.4
Βολφράμιο	4.3

Όμως, πέρα από τη δομή και την επιφανειακή μορφολογία των ινωδών υλικών, υπάρχουν και μακροσκοπικοί παράγοντες που αφορούν τις ίνες και επηρεάζουν τις τελικές τους ιδιότητες των συνθέτων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η συγκέντρωση των ινών, το μέγεθος, το σχήμα, η κατανομή, η ευθυγράμμιση και ο προσανατολισμός τους.

Διεπιφάνεια (ενδιάμεση φάση)

Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας (fiber-matrix interface) ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δυο συνιστωσών φάσεων, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της διεπιφάνειας διαφέρουν και από αυτές της μήτρας και από αυτές της ενίσχυσης.

Για λόγους θεωρητικής ανάλυσης και μόνο, θεωρείται ότι η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας έχει αμελητέο ή μηδενικό πάχος. Στην πραγματικότητα όμως, και κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας-μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων εκατέρωθεν της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφορικών θερμικών φαινομένων. Η επίδραση

των διεργασιών αυτών εκτείνεται σε πάχος από μερικά ως μερικές εκατοντάδες νανόμετρα. Έτσι, ίσως έχει περισσότερο νόημα να αναφέρεται ως ενδιάμεση φάση (interphase) παρά ως διεπιφάνεια. Γενικά, οι ασθενείς διεπιφάνειες ίνας-μήτρας προσδίδουν στο σύνθετο χαμηλή αντοχή και δυσκαμψία αλλά ανοχή στη διάδοση ρωγμών (δυσθραυστότητα), ενώ ισχυρές διεπιφάνειες έχουν ως αποτέλεσμα ένα ανθεκτικό και δύσκαμπτο αλλά ψαθυρότερο υλικό.

1.2.3 Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι διατηρούν συνήθως τις ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν ενώ αποκτούν και επιπλέον ιδιότητες που καμία από τις επιμέρους φάσεις δεν διέθετε. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών που τα διαφοροποιούν από τα συμβατικά υλικά είναι οι παρακάτω:

- Ειδική αντοχή
- Ειδική δυσκαμψία
- Αντίσταση σε διάβρωση
- Αντίσταση στη φθορά
- Χαμηλό βάρος
- Καλή συμπεριφορά σε κόπωση
- Θερμική αγωγιμότητα
- Θερμική μόνωση
- Ακουστική μόνωση

Στην πράξη, ένα σύνθετο δεν είναι δυνατόν να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω ιδιότητες, αφού μερικές από αυτές είναι και ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση και θερμική αγωγιμότητα). Κάθε σύνθετο κατασκευάζεται κατά περίπτωση ώστε να διαθέτει μερικές από αυτές τις ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι συνήθως επιθυμητό να διαθέτουν δυσκαμψία, αντοχή και μικρό βάρος. Το ενδιαφέρον των μηχανικών για τα σύνθετα υλικά εστιάζεται κυρίως σε δυο σημεία:

- Ο συνδυασμός της μικρής πυκνότητας και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων (δηλαδή οι καλύτερες ειδικές ιδιότητες) επιτρέπει το σχεδιασμό ελαφρότερων κατασκευών.
- Η μορφοποίηση του τελικού προϊόντος γίνεται σε ένα μόνο στάδιο, χωρίς να απαιτούνται ενδιάμεσες κατεργασίες.
- Η απειρία των δυνατών συνδυασμών των διαφόρων παραμέτρων προσδίδει ευελιξία στο σχεδιασμό των προϊόντων.

1.2.4 Μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών

- Χαμηλή αντοχή στη θερμοκρασία και στη UV ακτινοβολία
- Απορρόφηση υγρασίας
- Υποβάθμιση ιδιοτήτων με το χρόνο (ageing)

1.2.5 Εφαρμογές των συνθέτων υλικών

Τα σύνθετα υλικά έχουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. Οι κυριότερες από αυτές αφορούν όπως προειπώθηκε στα αθλητικά είδη (κράνη, παγοπέδιλα, ρακέτες, ποδήλατα), στην αεροπορική βιομηχανία (πτέρυγες, άτρακτοι αεροσκαφών), στα σκάφη αναψυχής, στα αποθηκευτικά μέσα (φιάλες, πιεστικά δοχεία, δεξαμενές). Παρακάτω απεικονίζονται τέτοιες εφαρμογές των σύνθετων υλικών στην καθημερινότητα (Εικ. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4) .



Εικόνα 1.1: Εφαρμογή σύνθετων υλικών σε πολεμικά αεροσκάφη



Εικόνα 1.2: Εφαρμογή σύνθετων υλικών στη ναυπηγική



Εικόνα 1.3: Εφαρμογή σύνθετων υλικών σε ποδήλατα



Εικόνα 1.4: Εφαρμογή σύνθετων υλικών σε αθλητικά είδη

1.3 ΔΙΑΦΟΡΑ ΙΣΟΤΡΟΠΩΝ ΜΕ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΑ ΥΛΙΚΑ

Ισότροπα είναι τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες σε οποιαδήποτε διεύθυνση φόρτισης. Τα μέταλλα είναι τυπικά ισότροπα υλικά. Στα ισότροπα υλικά ισχύει ο Νόμος του Hooke στην απλή του μορφή.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Ανισότροπα ονομάζονται τα υλικά που παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά συναρτήσει της διεύθυνσης φόρτισης. Τα σύνθετα υλικά είναι κατά κανόνα ανισότροπα, διότι οι ίνες του εκάστοτε σύνθετου έχουν συγκεκριμένη διεύθυνση και έτσι οι ιδιότητές τους αλλάζουν ανάλογα με την διεύθυνση των ινών. Στα ανισότροπα υλικά ισχύει ο γενικευμένος Νόμος του Hooke.

1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ (LAY-UP TECHNIQUES)

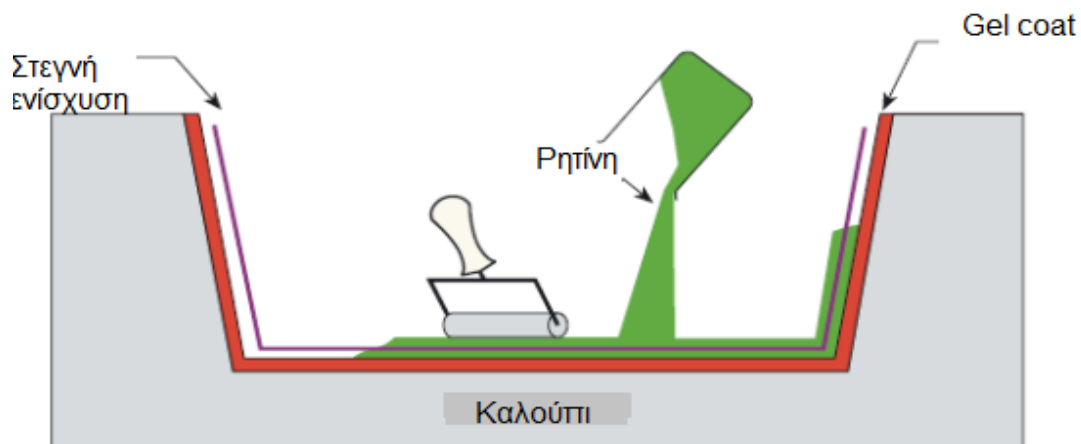
Η βιομηχανία των σύνθετων υλικών δανείστηκε τις μεθόδους μορφοποίησης των μετάλλων και ανέπτυξε όπου έπρεπε νέες μεθόδους κατασκευής. Έτσι, χρησιμοποιούνται τόσο μέθοδοι όπως η μορφοποίηση εν θερμώ με πρέσσα (compression molding) που είναι γνωστή από τα μέταλλα όσο και η τεχνική της περιέλιξης των ινών (filament winding), που αναπτύχθηκε ειδικά για κατασκευές ινωδών συνθέτων υλικών.

1.4.1 Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (WET HAND LAY-UP)

Η γενική διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προετοιμασία καλουπιού: Τοποθέτηση release material (όπως κερί) για εύκολη απομάκρυνση του έτοιμου κομματιού.
- Ομοιόμορφη τοποθέτηση ειδικής ρητίνης (gel-coat) με ψεκασμό, απόχυση ή σε μορφή στερεού φιλμ: φινίρισμα εξωτερικής επιφάνειας.
- Προετοιμασία ενίσχυσης: Το ύφασμα κόβεται στο μέγεθος του καλουπιού και τοποθετείται στο καλούπι.
- Ανάμειξη ρητίνης και καταλύτη/σκληρυντή.
- Συμπύεση με ρολά για τον καλύτερο εμποτισμό ενίσχυσης, την απομάκρυνση του αέρα και της περίσσειας ρητίνης.
- Curing/πολυμερισμός.
- Ψύξη και απομάκρυνση από το καλούπι.

Στην επίστρωση με το χέρι, η οποία απεικονίζεται και παρακάτω (Εικ. 1.5) στρώνεται με τη βοήθεια ενός ρολού η κατά κανόνα θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη στα στρώματα της ενίσχυσης που είναι είτε ύφασμα μακριών ινών, είτε κοντών ινών τυχαίας διεύθυνσεως (chopped strand mat, CMS), για να επιτευχθεί κατά το δυνατόν ομοιόμορφη διαβροχή στο υλικό και να αφαιρεθεί ο παγιδευμένος αέρας.



Εικόνα 1.5: Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι

Η μέθοδος της επίστρωσης με το χέρι, αν και παρουσιάζει ορισμένα βασικά μειονεκτήματα όπως μικρό όγκο παραγωγής και εξάρτηση της ποιότητας από την ικανότητα του τεχνίτη, βρίσκει αρκετά ευρεία εφαρμογή λόγω της ευελιξίας που προσφέρει (κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών).

Η διαδικασία της επίστρωσης με το χέρι απαιτεί αρχικά προετοιμασία του καλουπιού. Η προετοιμασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να μην κολλήσει το κατασκευαζόμενο εξάρτημα επάνω στο καλούπι κατά τη μορφοποίηση. Έτσι, το καλούπι καλύπτεται με ένα ειδικό αντικολλητικό υλικό (release material). Στον Πίν. 1.5 δίνεται η ποικιλία των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

Η επιλογή του release material γίνεται ανάλογα με την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας που επιθυμείται και το εάν πρόκειται να ακολουθήσει κάποια πρόσθετη επιφανειακή κατεργασία όπως π.χ. βαφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις η επικάλυψη του καλουπιού πρέπει να επαναλαμβάνεται μετά από 1-5 χρήσεις.

Το επόμενο βήμα είναι η επικάλυψη του καλουπιού με ένα στρώμα μη ενισχυμένου πολυμερούς (reel-plies) που θα αποτελέσει και την εξωτερική επιφάνεια του κομματιού μετά το πέρας της διαδικασίας μορφοποίησης. Το πολυμερές αυτό φύλλο είναι δυνατόν να είναι σε στερεή μορφή φιλμ, να ψεκάσει πάνω στο καλούπι ή και να αποχυθεί με ή χωρίς άσκηση πίεσης.

Στη συνέχεια προετοιμάζεται η ενίσχυση του προς κατασκευή συνθέτου. Η ενίσχυση αυτή μπορεί να είναι σε μορφή υφάσματος ραμμένων ή πλεγμένων ινών διαφόρων διευθύνσεων (stitched ή woven fabric, unidirectional ή multidirectional), προεμβαπτισμένη στη ρητίνη (pre-preg), ή ακόμα και πανιού κοντών ινών τυχαίας διεύθυνσης (chopped strand mat). Το ύφασμα κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και επιστρώνεται στο καλούπι. Στο μεταξύ αναμιγνύεται και η ρητίνη με τον απαραίτητο σκληρυντή (hardener) για τον πολυμερισμό και τη σκλήρυνση (curing). Είναι δυνατόν το μίγμα αυτό να απλωθεί έτοιμο κατευθείαν στο καλούπι ή να ψεκάσει με πιστόλι αέρα που αναμιγνύει επί τόπου ρητίνη και σκληρυντή. Η επίστρωση του καλουπιού γίνεται με ρολά, αφ' ενός για να ομογενοποιηθεί η κατασκευή και να διαβραχεί με το μίγμα η ενίσχυση, αφ' ετέρου για να αφαιρεθεί ο παγιδευμένος στο υλικό αέρας. Ανάλογα με τη φύση της κατασκευής, δίνεται προσοχή σε ειδικές λεπτομέρειες. Για παράδειγμα, εάν ο κατασκευαστής θέλει να επιτύχει αντοχή σε διάβρωση (π.χ σε

σκάφη) τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ειδική μήτρα και το πρώτη επιφανειακή στρώση να είναι πλούσια σε ρητίνη.

Στο τέλος πραγματοποιείται το curing και, όταν και αυτό ολοκληρωθεί, γίνονται οι ακόλουθοι τρεις βασικοί ποιοτικοί έλεγχοι στην κατασκευή:

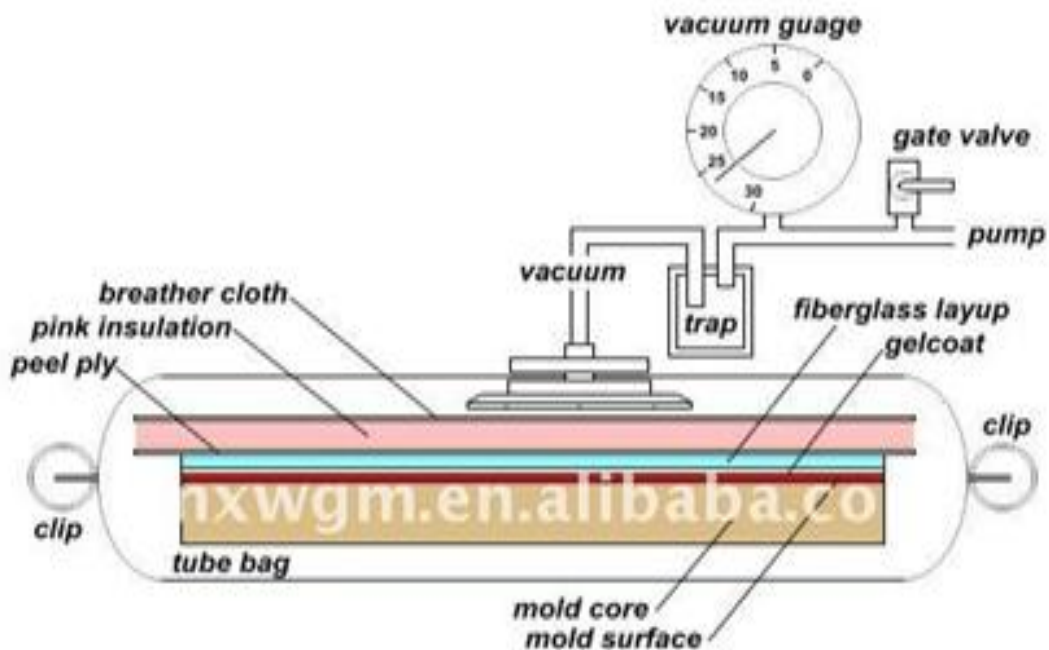
- Ειδικός οπτικός έλεγχος: Ρίχνεται φως στο προϊόν ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ανομοιομορφίες, κενά με αέρα, εσωτερικές ρωγμές.
- Επιφανειακός έλεγχος: Εξετάζεται η επιφάνεια του υλικού για να διαπιστωθεί ότι η ενίσχυση έχει όντως διαβραχεί από τη ρητίνη.
- Έλεγχος διαστάσεων: Ελέγχεται διαστασιολογικά η κατασκευή.

Πίνακας 1.5: Τύποι αντικολλητικών επιστρώσεων (release materials)

<i>Είδος αντικολλητικού υλικού</i>	<i>Μορφή</i>	<i>Χαρακτηριστικά</i>
Κερί	Ρευστή ή ημίρρευστη μορφή	Πολύ καλό γυάλισμα, καλή μεταφορά λεπτομερειών, πολλαπλές χρήσεις
PVA	Υγρό (συνήθως ψεκάζεται)	Υδατοδιαλυτό, μιας χρήσης, παρέχει δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας, άριστη αντικολλητικότητα
Φθοράνθρακες, σιλάνια & σιλκόνες	Υγρό ή σπρέι	Σχετικά ακριβό, μέτριο γυάλισμα επιφάνειας
Αντικολλητικά φιλμ & χαρτιά	Επικαλυμένο χαρτί, σελοφάν ή PVA φιλμ	Μιας χρήσης, σχετικά απλά καλούπια
Εσωτερικής χρήσης αντικολλητικές ουσίες	Υγρό (συνήθως αναμιγνύεται με το gel επικάλυψης)	Άριστο γυάλισμα, καλή μεταφορά λεπτομέρειας, παρέχει δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας, δεν χρειάζεται επικήρωση του καλουπιού

1.4.2 Μορφοποίηση με χρήση ασκού κενού (vacuum bagging)

Το κενό εφαρμόζεται στην εσοχή του καλουπιού (Εικ. 1.6). Αυτή η διεργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή σε υψηλότερη θερμοκρασία με ατμοσφαιρική πίεση να δρα στον ασκό κενού.



Εικόνα 1.6: Μέθοδος vacuum bagging

1.4.3 Χαρακτηριστικά των μεθόδων επίστρωσης

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με επίστρωση παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πλεονεκτήματα όπως η ευελιξία στο σχεδιασμό και το χαμηλό κόστος αντιδιαστέλλονται με τη χαμηλή ποιότητα κατασκευής και τη χαμηλή παραγωγικότητα. Παρακάτω δίνονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της μορφοποίησης, ο τεχνίτης κόβει το κομμάτι στις επιθυμητές διαστάσεις, εάν αυτό απαιτείται. Είναι δυνατόν να κοπεί το υλικό με ένα κοφτερό μαχαίρι κατά το χρόνο πήξης του υλικού (gel time). Εάν η κοπή γίνει μετά τη σκλήρυνση του υλικού, είναι συνιστώμενο να γίνει με χρήση μη οδοντωτού κοπτικού εργαλείου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων επίστρωσης με το χέρι είναι τα ακόλουθα:

- Ευελιξία στο σχεδιασμό εξαρτημάτων.
- Είναι δυνατή η παραγωγή μεγάλων & περίπλοκων κομματιών.
- Το κόστος του ελάχιστου εξοπλισμού είναι χαμηλό.
- Ως καλούπι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υλικό με σταθερό σχήμα.
- Είναι απλό το στήσιμο του εξοπλισμού και η έναρξη παραγωγής γίνεται σχετικά γρήγορα.
- Είναι εύκολες οι σχεδιαστικές αλλαγές.
- Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εγκλείσματα και ενισχύσεις κατά τη μορφοποίηση (π.χ. ασάλινα νεύρα δυσκαμψίας)
- Είναι δυνατές οι πολύστρωτες κατασκευές.
- Είναι εύκολη και απλή η εκπαίδευση των τεχνιτών.

Τα μειονεκτήματα των μεθόδων επίστρωσης είναι τα παρακάτω:

- Η μορφοποίηση έχει σχετικά ψηλό εργασιακό κόστος.
- Το τελικό προϊόν έχει μόνο την εξωτερική του επιφάνεια σε καλή μορφή.
- Η ποιότητα κατασκευής είναι συνάρτηση της ικανότητας του τεχνίτη.
- Η διαδικασία δεν προσφέρεται για μεγάλο όγκο παραγωγής.
- Δεν υπάρχει ομοιομορφία ποιότητας στα προϊόντα.
- Απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι πολυμερισμού μιας και το καλούπι βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.
- Υπάρχει υψηλό ποσοστό απωλειών σε πρώτες ύλες και "ατελή" προϊόντα.

2. ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

2.1.1 Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι εξαιρετικές και ιδιαίτερες. Ήταν αναμενόμενο λοιπόν να προκαλέσουν το ενδιαφέρον των ερευνητών. Η μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου είναι συνάρτηση:

- Της μηχανικής συμπεριφοράς των επιμέρους φάσεων
- Της συνάφειας μήτρας κι ενίσχυσης
- Της περιεκτικότητας σε ενίσχυση
- Του προσανατολισμού της ενίσχυσης
- Του μεγέθους και του σχήματος της ενίσχυσης
- Της φύσης της ενίσχυσης

Όσον αφορά στα σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες, ξεχωρίζουν για την υψηλή τους δυσκαμψία κι αντοχή που αυξάνεται με τη μείωση των διαστάσεων της ίνας. Επίσης, τα ινώδη σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από την δυσθραυστότητά τους, δηλαδή την ανοχή τους σε ρωγμές. Αυτό συνεπάγεται και την καλή τους αντοχή σε κόπωση. Γι' αυτό, στα σύνθετα υλικά, η διάδοση ρωγμών γενικά δεν είναι καταστροφική.

Τα σύνθετα πολύστρωτα υλικά αποτελούνται από στρώσεις ινών που συγκρατούνται μεταξύ τους από τη μήτρα. Παρά τη γενικά πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά τους, ο τρόπος κατασκευής των σύνθετων υλικών έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζουν ατέλειες στη δομή τους. Οι ατέλειες αυτές είναι η αποκόλληση διαδοχικών στρώσεων (delaminations), κενά στη δομή (voids), ατελής ευθυγράμμιση της ενίσχυσης (fiber misalignment), κακή πρόσφυση ή και αποκόλληση ίνας-μήτρας (fiber-matrix debonding), κακή διαβροχή των ινών (bad wetting), περίσσεια ρητίνης.

Τα σύνθετα υλικά είναι ανισότροπα, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν είναι ίδιες σε όλες τις διευθύνσεις. Έτσι, δεν αρκεί να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό και σε θλίψη σε μια μόνο διεύθυνση αλλά σε δυο κύριες διευθύνσεις. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χαρακτηρισμού υλικών σε εφελκυσμό και σε θλίψη τόσο στη διεύθυνση των ινών όσο και κάθετα σε αυτές, σε δοκίμια από σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού.

2.1.2 Διαφορά ισότροπων υλικών με τα ανισότροπα με βάση το νόμο Hooke

Η συσχέτιση μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης γίνεται μέσω του νόμου του Hooke:

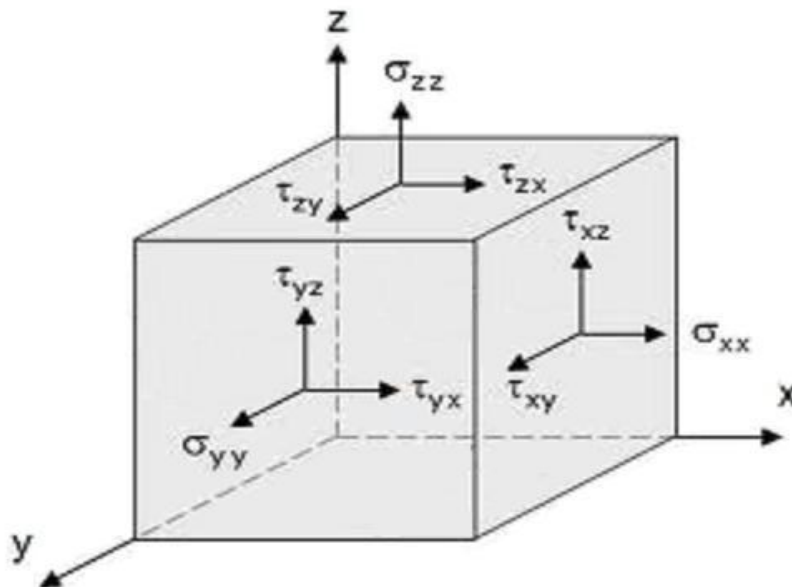
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Αυτή η σχέση, στην απλή της μορφή, ισχύει όταν ασκείται μόνο μια ορθή τάση σε ένα ισότροπο υλικό. Όταν όμως ασκούνται περισσότερες ή/και το υλικό είναι ανισότροπο, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο γενικευμένος Νόμος του Hooke:

$$\sigma_{1,2} = C_{1,2,3,4} \cdot \varepsilon_{3,4} \quad (2.2)$$

Όπου $\sigma_{1,2}$: τανυστής τάσης ($2^{\text{ης}}$ τάξης), $\varepsilon_{3,4}$: τανυστής παραμόρφωσης ($2^{\text{ης}}$ τάξης)
 $C_{1,2,3,4}$: τανυστής δυσκαμψίας ($4^{\text{ης}}$ τάξης) με $3^4 = 81$ ελαστικές σταθερές.

Επειδή όμως το C μητρώο είναι συμμετρικό, τελικά ο αριθμός των ελαστικών σταθερών μειώνεται σε 21. Στην Εικόνα 2.1 απεικονίζεται το τασικό πεδίο σε τρισδιάστατη μορφή, με σ την ορθή και τ τη διατμητική τάση. Ωστόσο, η περίπτωση ενός συνθέτου με μακριές ίνες σε μία μόνο διεύθυνση, και όταν αυτή η διεύθυνση είναι κάθετη ή παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισης, το πρόβλημα απλοποιείται αρκετά και το μητρώο δυσκαμψίας καταλήγει να περιέχει μόνο 5 ανεξάρτητες μεταξύ τους ελαστικές σταθερές. Αυτές επιδιώκει να προσδιορίσει πειραματικά και η παρούσα εργασία. Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως αυτό όντως επιτυγχάνεται, με μοναδική εξαίρεση το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο της στρώσης αφού δοκιμές διάτμησης δεν πραγματοποιήθηκαν. Οι ελαστικές σταθερές που προσδιορίστηκαν ήταν δηλαδή το μέτρο Young (Young's modulus) ή μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson (Poisson's ratio) ν .



Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατο τασικό πεδίο

Το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται τόσο στον εφελκυσμό όσο και στη θλίψη και ως φυσική έννοια εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε ελαστική παραμόρφωση. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται άμεσα από την ισχύ των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του υλικού. Έτσι, υλικά όπως τα πολυμερή, των οποίων οι μοριακές αλυσίδες συγκρατούνται μεταξύ τους με ασθενείς χημικούς δεσμούς (π.χ. Van der Waals), χαρακτηρίζονται από χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, που σημαίνει ότι σχετικά μικρές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες παραμορφώσεις. Η ορθή εγκάρσια παραμόρφωση ισούται με σταθερό ποσοστό της ορθής παραμόρφωσης κατά τον επιμήκη άξονα. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται λόγος Poisson (Poisson's ratio) και συμβολίζεται με το γράμμα ν .

Επειδή όμως το υλικό είναι ανισότροπο, για πλήρη χαρακτηρισμό δεν αρκεί μια τιμή μέτρου ελαστικότητας και ένας λόγος Poisson. Τα μεγέθη αυτά διαφέρουν σε κάθε διεύθυνση. Επομένως, για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, απαιτούνται δυο δοκιμές ανά είδος καταπόνησης (εφελκυσμό και θλίψη), μια κατά την διεύθυνση των ινών και μια κάθετα σε αυτήν (στις 0° και στις 90°). Επίσης, όπως προειπώθηκε, απαιτείται δοκιμή σε διάτμηση, η οποία στην παρούσα εργασία δεν παρουσιάζεται. Εκτός από τις ελαστικές ιδιότητες, από τις ίδιες δοκιμές προκύπτουν και οι αντοχές, και συγκεκριμένα:

- Αντοχή σε εφελκυσμό κατά την διεύθυνση των ινών
- Αντοχή σε εφελκυσμό κάθετα στην διεύθυνση των ινών
- Αντοχή σε θλίψη κατά την διεύθυνση των ινών
- Αντοχή σε θλίψη κάθετα στην διεύθυνση των ινών.

2.1.3 Αριθμός απαραίτητων δοκιμών

Με βάση τα διεθνή πρότυπα ISO και συγκεκριμένα σύμφωνα με το ISO 2602:1980 εκτιμάται ότι πρέπει να πραγματοποιούνται πέντε έγκυρες δοκιμές ανά κατηγορία. Το πρότυπο αυτό αναφέρεται μέσα στο πρότυπο ISO 527-1:1993, που αφορά στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε εφελκυσμό και θλίψη κι έχει αναθεωρηθεί από το πρότυπο 527-1:2012, το οποίο όμως δεν ήταν διαθέσιμο.

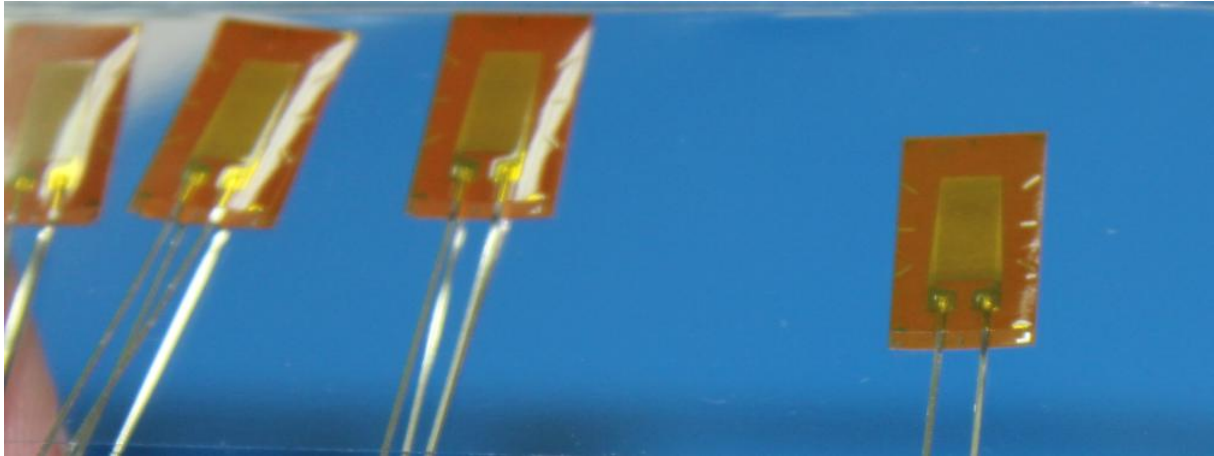
2.2 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.2.1 Τι είναι μηκυνσιόμετρο

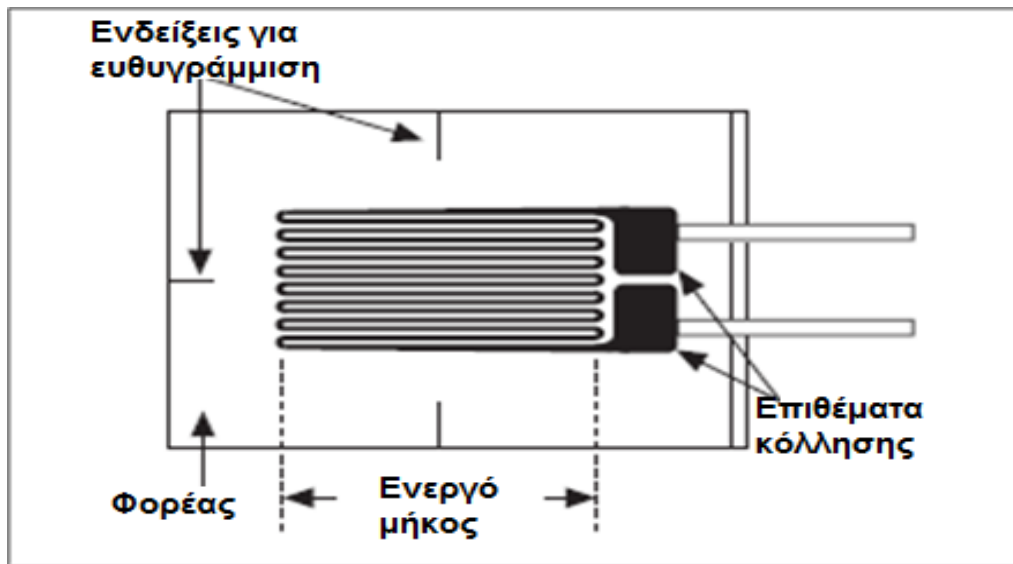
Τα μηκυνσιόμετρα είναι μετρητικά όργανα με τα οποία μπορεί να μετρηθεί η παραμόρφωση που προκαλείται από μια μηχανική καταπόνηση. Όταν επιμηκύνονται ή συστέλλονται, τα περισσότερα μέταλλα υφίστανται αλλαγή στην ηλεκτρική τους αντίσταση. Το αισθητήριο στοιχείο του μηκυνσιομέτρου αποτελείται από ένα φύλλο κράματος χαλκού-νικελίου. Η μέτρηση της μηχανικής παραμόρφωσης ουσιαστικά πραγματοποιείται μέσω μέτρησης της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης του αγωγού του μηκυνσιομέτρου καθώς αυτό, έχοντας τοποθετηθεί κατάλληλα στον καταπονούμενο φορέα, ακολουθεί την παραμόρφωσή του.

Πρόκειται για μια λεπτή μεταλλική αντίσταση σε μορφή επίπεδου ελίγματος ειδικού αγωγού (3 έως 6mm πάχος), η οποία βρίσκεται πάνω σε μια βάση λεπτού στρώματος πλαστικής μεμβράνης (15 έως 16 μm πάχος) (Εικ. 2.2, 2.3). Αν R η ηλεκτρική αντίσταση του αγωγού, ρ η ειδική αντίσταση, l το μήκος, D η διάμετρος και V ο όγκος του,

$$R = \rho \cdot \frac{1}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \rho \cdot \frac{1}{V} \quad (2.3)$$



Εικόνα 2.2: Μηκυσιόμετρα



<http://nees.buffalo.edu/docs/labmanual/HTML/Chapter%203.htm>

Εικόνα 2.3: Μέρη του μηκυσιομέτρου

2.2.2 Αρχή λειτουργίας μηκυσιομέτρου

Ισχύει η σχέση:

$$K \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (2.4)$$

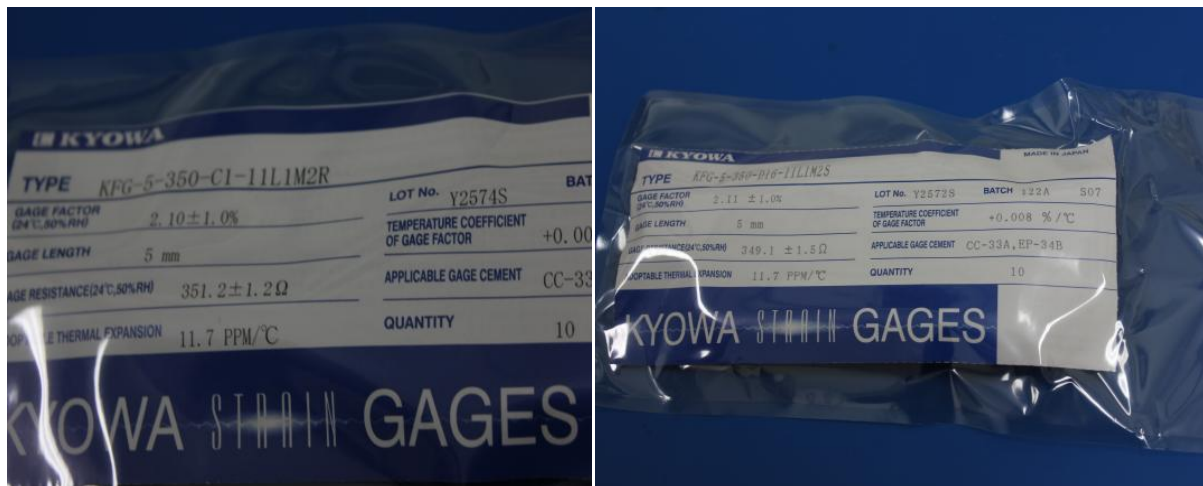
όπου:

R: η αρχική αντίσταση του strain gage, σε Ω (ohm)

ΔR: η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του αγωγού, σε Ω (ohm)

k: σταθερά (ονομάζεται gauge factor)
ε: η παραμόρφωση

Η τιμή του συντελεστή k ή gauge factor είναι συνηθέστερα περίπου ίση με 2.00 και είναι σταθερά. Στα μηκυσιόμετρα που χρησιμοποιήσαμε, η τιμή αυτή ήταν ίση με 2.10-2.11, ανάλογα με την εκάστοτε παρτίδα (Εικ. 2.4). Τα μηκυσιόμετρα που διατίθενται συνήθως στο εμπόριο έχουν ωμική αντίσταση 120Ω, 350Ω και 600Ω, τιμές που δίνονται, όπως και η τιμή του k, από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 2.4: Αναγραφόμενα κατασκευαστικά στοιχεία στις παρτίδες μηκυσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Για την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν μονά μηκυσιόμετρα (single-grid strain-gauges, Εικ. 2.5), αλλά και ροζέτες 0/90 (strain-gauge rosettes, Εικ. 2.6) ωμικής αντίστασης 350Ω της εταιρίας KYOWA Electronic Instruments CO. Το ενεργό μήκος των μηκυσιομέτρων επιλέχθηκε ίσο με 3mm, όπως προδιαγράφεται στον κανονισμό της θλίψης, ISO 14126:1999.



Εικόνα 2.5: Μονά μηχανισιόμετρα



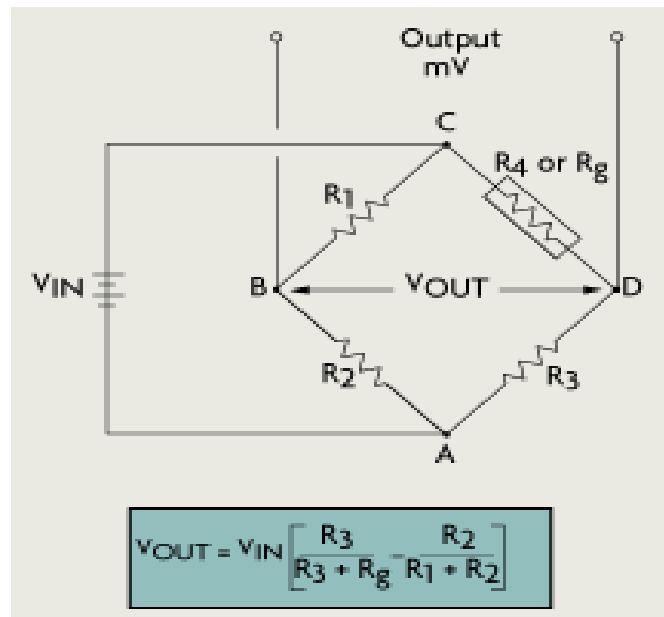
Εικόνα 2.6: Ροζέτες 0/90

2.3 ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE

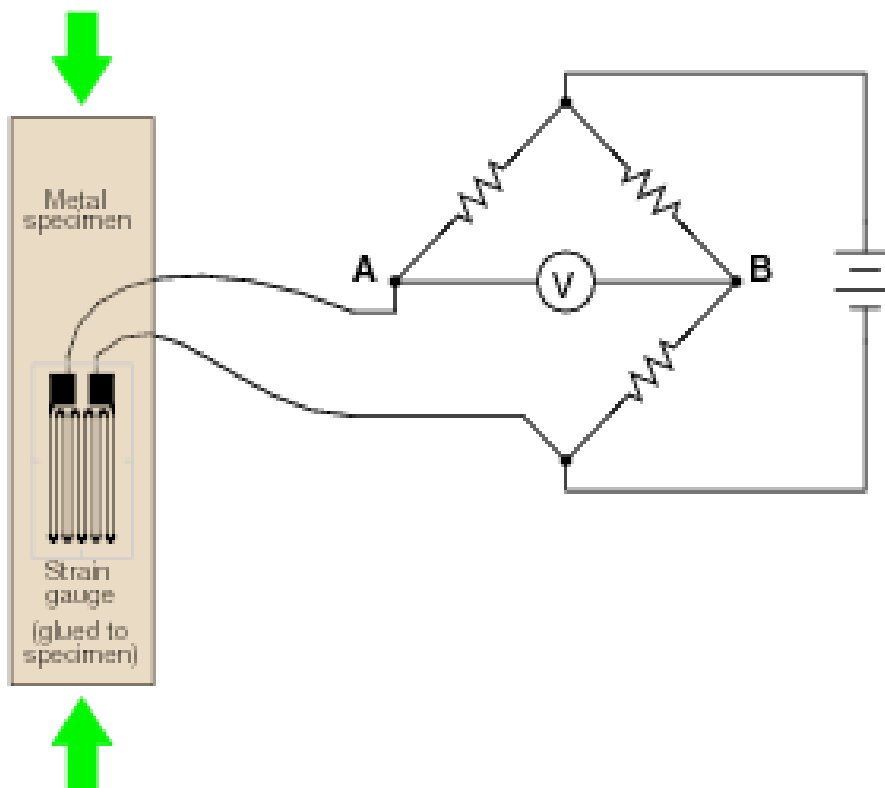
2.3.1 Ορισμός

Η μέτρηση της μεταβολής της ωμικής αντίστασης σε ένα μηχανισιόμετρο πραγματοποιείται με χρήση γέφυρας Wheatstone. Η γέφυρα Wheatstone (Εικ. 2.7) είναι ουσιαστικά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με 4 αντιστάσεις σταθερού ρεύματος, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας άγνωστης αντίστασης του κυκλώματος

κατόπιν σύγκρισης με γνωστή πρότυπη αντίσταση. Στη συνδεσμολογία αυτή, το μηχανοσκόπιο συνδέεται στη θέση της άγνωστης αντίστασης (Εικ. 2.8).



Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος γέφυρας Wheatstone

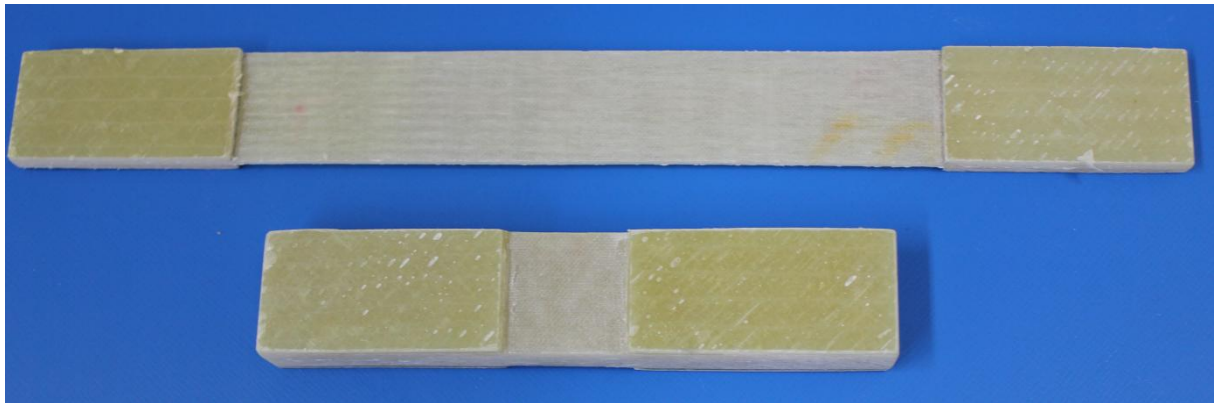


Εικόνα 2.8: Αρχή λειτουργίας γέφυρας Wheatstone

3.ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι της γεωμετρίας που προτείνεται στο πρότυπο ISO 527-5:1997 (Εικ 3.1) και συγκεκριμένα στην ενότητα 6, ενώ η γεωμετρία των δοκιμίων θλίψης προτείνεται στο πρότυπο ISO 14126:1999. Όπως προειπώθηκε, για κάθε διαφορετικό τύπο δοκιμίου απαιτούνται τουλάχιστον 5 έγκυρες δοκιμές, ενώ περισσότερα δοκίμια χρειάζονται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια.



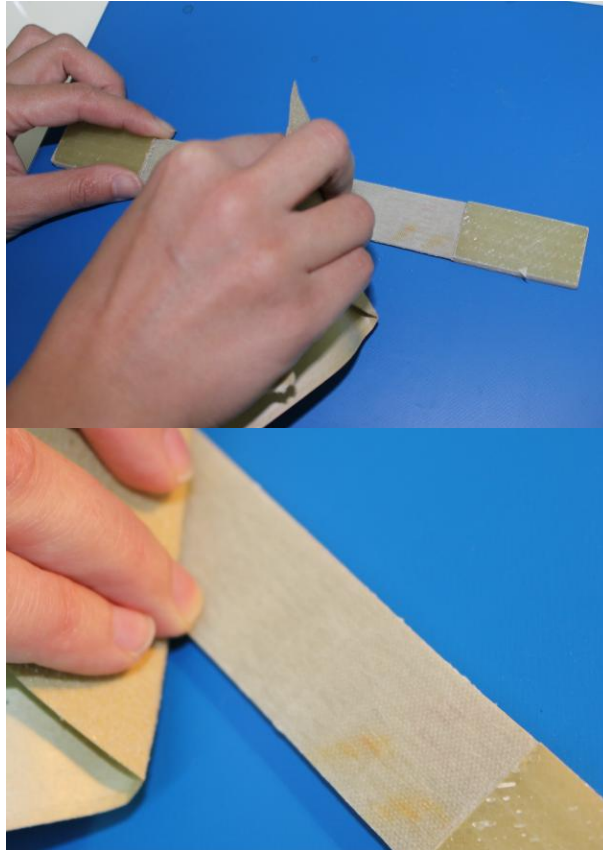
Εικόνα 3.1: Δοκίμια κατάλληλα για καταπόνηση σε εφελκυσμό και θλίψη

Αρχικά μετρούνται οι διαστάσεις των δοκιμίων, δηλαδή πάχος και πλάτος, ώστε να υπολογιστεί στη συνέχεια η επιφάνεια της διατομής. Στα δοκίμια του εφελκυσμού οι διαστάσεις μετρούνται σε τρεις θέσεις ανά δοκίμιο, και συγκεκριμένα στο μέσο και στα δύο άκρα. Από τις τρεις αυτές επιφάνειες διατομής εξάγεται και χρησιμοποιείται η μέση τιμή, ως πιο αντιπροσωπευτική. Στα δοκίμια της θλίψης, που έχουν μικρότερο μήκος, μετρήθηκαν μόνο οι διαστάσεις στο μέσο. Οι μετρήσεις διαστάσεων πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού παχυμέτρου ακρίβειας 0.01mm, όπως στην Εικ. 3.2.



Εικόνα 3.2: Μετρήσεις διαστάσεων διατομής δοκιμίου εφελκυσμού

Στη συνέχεια, τα δοκίμια τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο στις επιφάνειες όπου θα τοποθετούνταν μηκυσιόμετρα έτσι ώστε αυτή να καταστεί πιο λεία και επίσης να απομακρυνθούν υπολείμματα κόλλας ή/και περίσσεια ρητίνης, που μπορεί να παρέμειναν από τη διαδικασία κατασκευής (Εικ. 3.3).



Εικόνα 3.3: Τρίψιμο δοκιμίων με χρήση γυαλόχαρτου

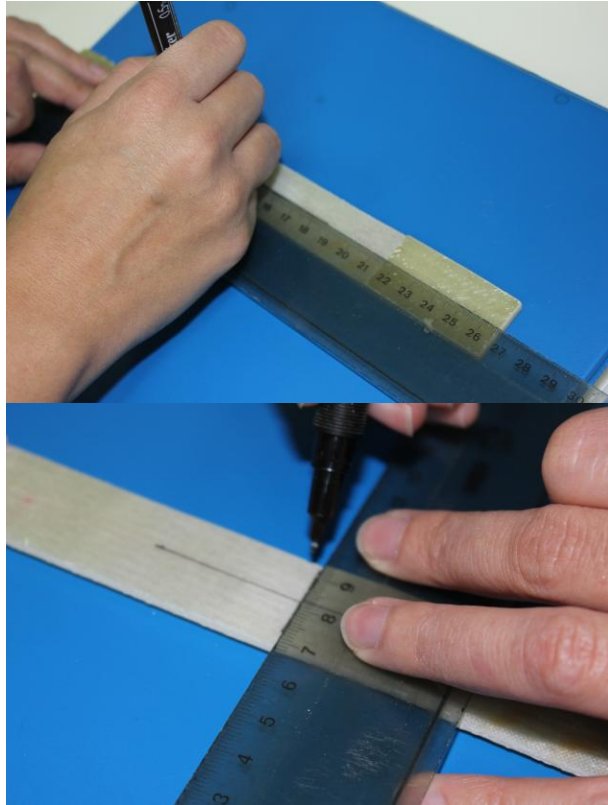
Ύστερα, η περιοχή καθαρίστηκε διεξοδικά με ειδικό διάλυμα ακετόνης και ισοπροπανόλης, χρησιμοποιώντας ειδικά πανάκια μιας χρήσης που δεν αφήνουν χνούδι στο υλικό (Εικ. 3.4). Η περιεκτικότητα του καθαριστικού σε ακετόνη είναι τέτοια ώστε να μην διαβρωθεί η ρητίνη της επιφάνειας που καθαρίζεται. Ο καθαρισμός πρέπει να γίνεται πάντα με την ίδια φορά, ώστε η ακαθαρσίες να απομακρύνονται και όχι να μεταφέρονται.

Στη συνέχεια βρίσκεται το μέσο του δοκιμίου και σημαδεύεται με ανεξίτηλο μαρκαδόρο, όπως απεικονίζεται στην Εικ. 3.5. Επιλέγεται το κατάλληλο μονό strain gage ή τη ροζέτα, αναλόγως με το είδος δοκιμίου που πρόκειται να προετοιμάσουμε (Εικ. 3.6). Συγκεκριμένα, στα δοκίμια τα οποία θα υποστούν εφελκυσμό χρειάζονται μια ροζέτα κι ένα μονό μηκυσιόμετρο, ενώ στη θλίψη είναι απαραίτητα δυο όμοια μονά μηκυσιόμετρα για κάθε δοκίμιο.

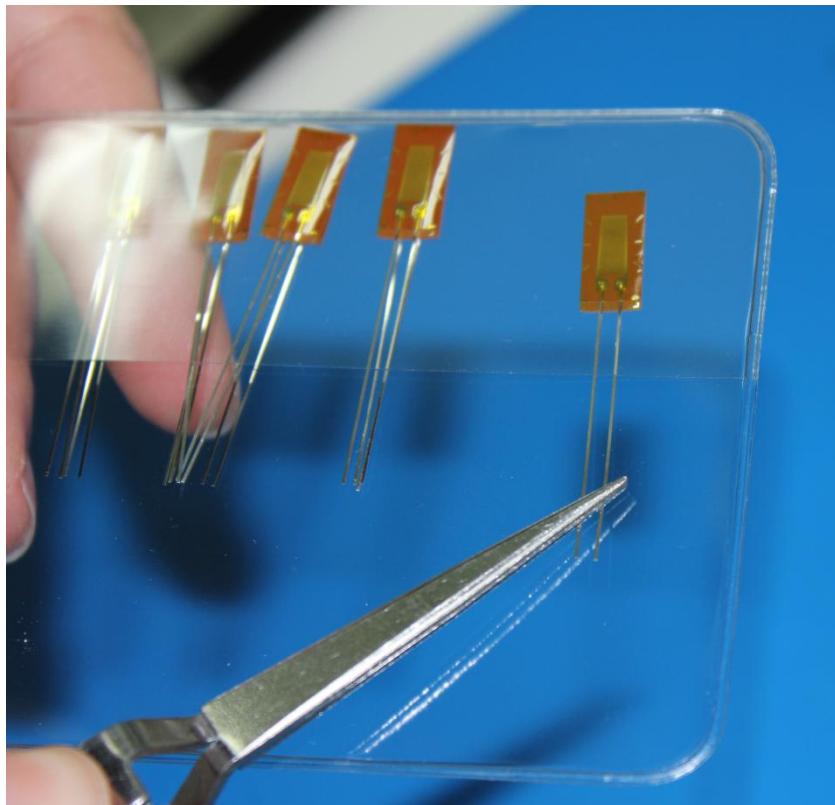
Έπειτα καθαρίζεται η επιφάνεια του μηκυνσιομέτρου στη ματ του πλευρά, δηλαδή σε αυτήν από την οποία πρόκειται να τοποθετηθεί στο δοκίμιο. Η επιφάνεια εργασίας πρέπει να είναι απόλυτα καθαρή (Εικ. 3.7).



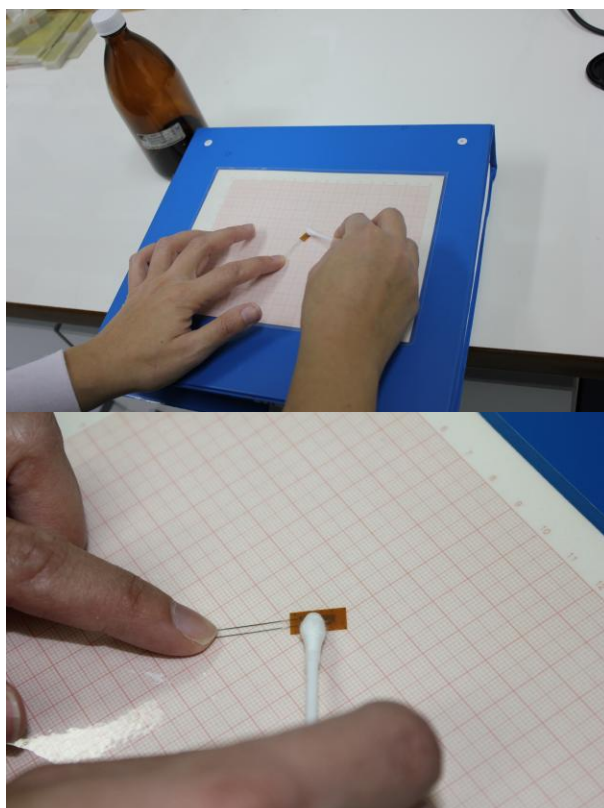
Εικόνα 3.4: Καθαρισμός επιφάνειας δοκιμίου



Εικόνα 3.5: Εύρεση του μέσου του δοκιμίου

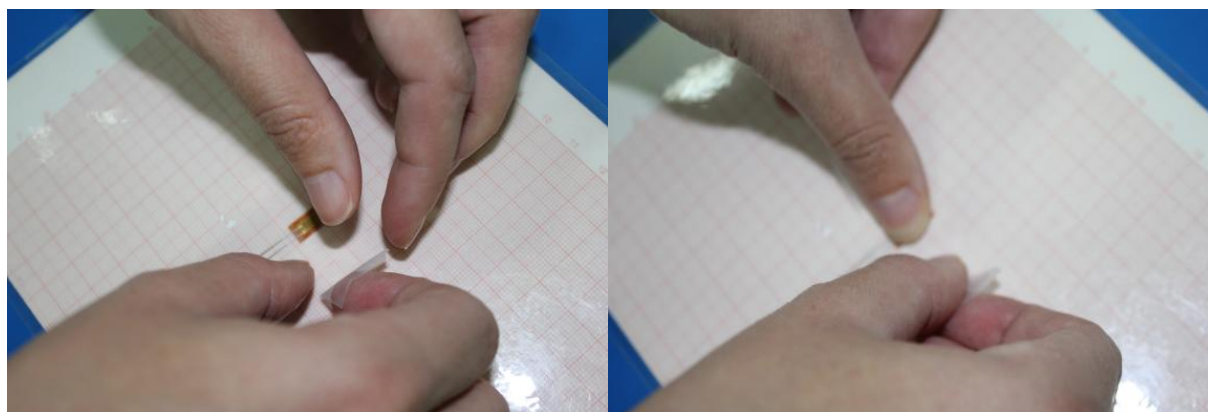


Εικόνα 3.6: Επιλογή μηκυσιομέτρου



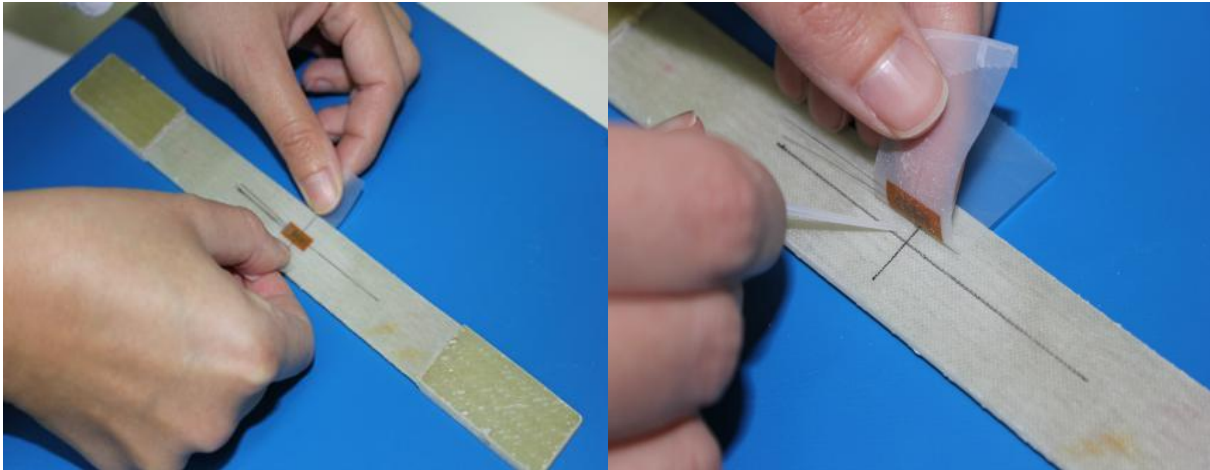
Εικόνα 3.7: Καθαρισμός μηκυσιομέτρου

Στη συνέχεια κολλάται ένα κομμάτι σελοτέιπ στο μηκυσιόμετρο (στην αντίθετη πλευρά από αυτή που μόλις καθαρίστηκε) και πιέζεται πολύ καλά πάνω στη λεία επιφάνεια εργασίας, ώστε να αφαιρεθούν μικροφουσαλίδες αέρα (Εικ. 3.8).

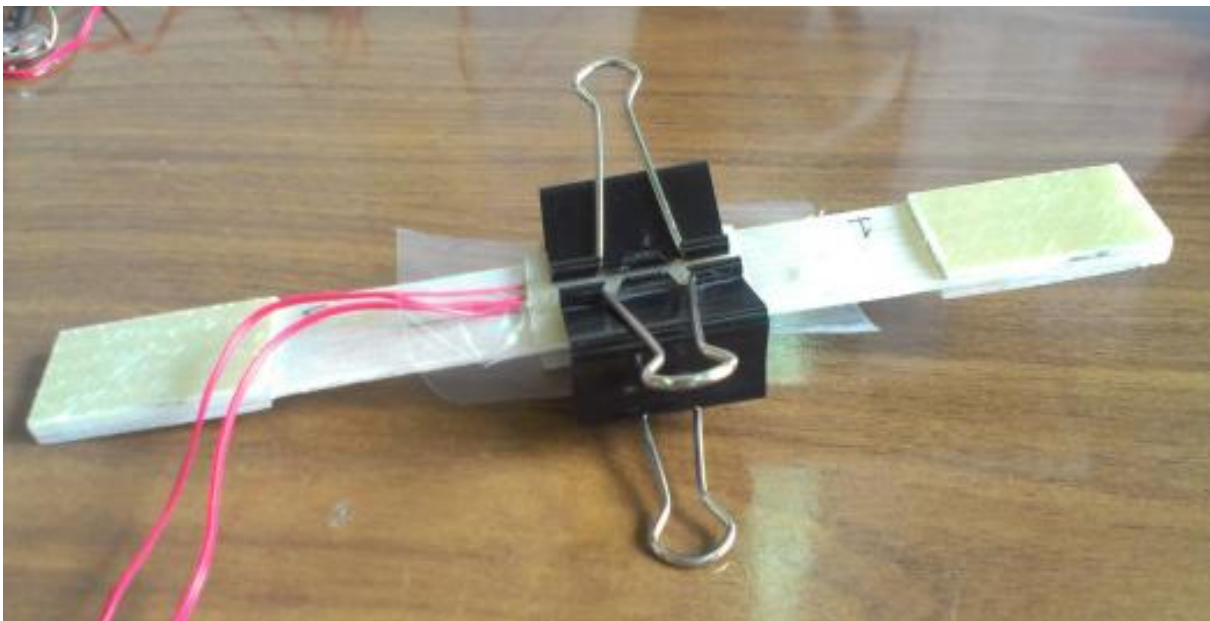


Εικόνα 3.8: Κόλληση σελοτέιπ σε μηκυσιόμετρο για ευκολότερο χειρισμό του

Το μηκυσιόμετρο ανασηκώνεται από την επιφάνεια εργασίας με προσεκτικό τράβηγμα του σελοτέιπ και στη συνέχεια τοποθετείται στο δοκίμιο. Είναι ιδιαίτερης σημασίας να ευθυγραμμιστεί με τις βοηθητικές γραμμές που έχουν σχεδιαστεί στην επιφάνειά του. Το σελοτέιπ ανασηκώνεται από τη μια του πλευρά και τοποθετείται μικρή ποσότητα κυανοακρυλικής κόλλας στην περιοχή όπου πρόκειται να κολληθεί το μηκυσιόμετρο, όπως απεικονίζεται στην Εικ. 3.9. Τέλος ασκείται πίεση στην περιοχή της κόλλησης για περίπου 2 ώρες (Εικ. 3.10).



Εικόνα 3.9: Ευθυγράμμιση και κόλληση μηκυσιομέτρου



Εικόνα 3.10: Άσκηση πίεσης στο μηκυσιόμετρο για καλύτερη κόλληση

3.2 ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Ανάλογα με την καταπόνηση στην οποία υποβλήθηκαν, τη μέθοδο κατασκευής και τη διεύθυνση φόρτισης, τα δοκίμια ονομάστηκαν όπως περιγράφεται στον Πίν. 3.1.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση δοκιμίων

	WET		VAC	
Διεύθυνση φόρτισης	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη
Παράλληλα στην φορά των ινών	A1	B1	A5	B5
Κάθετα στη φορά των ινών	A2	B2	A6	B6

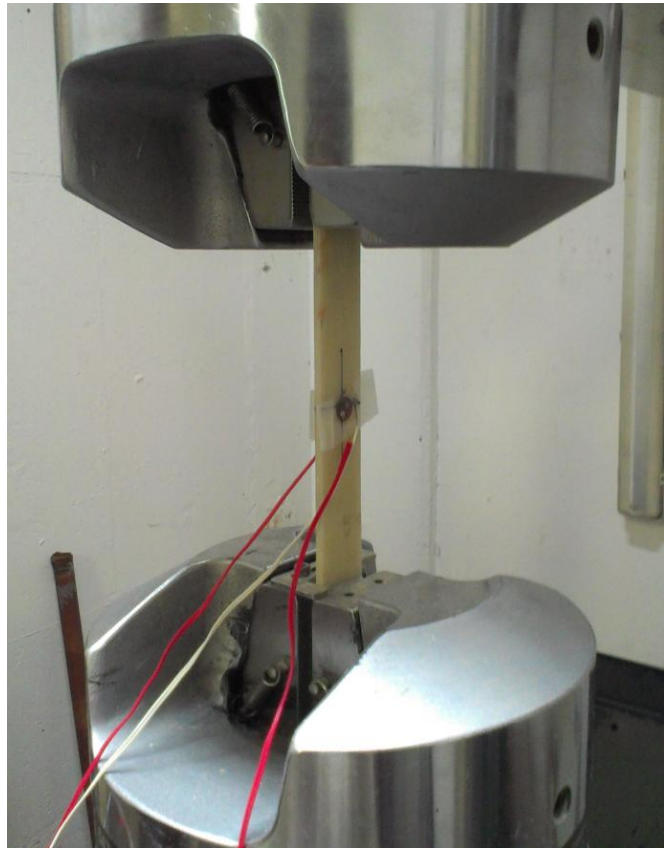
- **WET:** προκύπτει από το WET HAND LAY-UP, το οποίο σημαίνει επίστρωση με το χέρι.
- **VAC:** προκύπτει από το VACUUM BAGGING, το οποίο σημαίνει επίστρωση με το χέρι με υποβοήθηση κενού αέρα.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

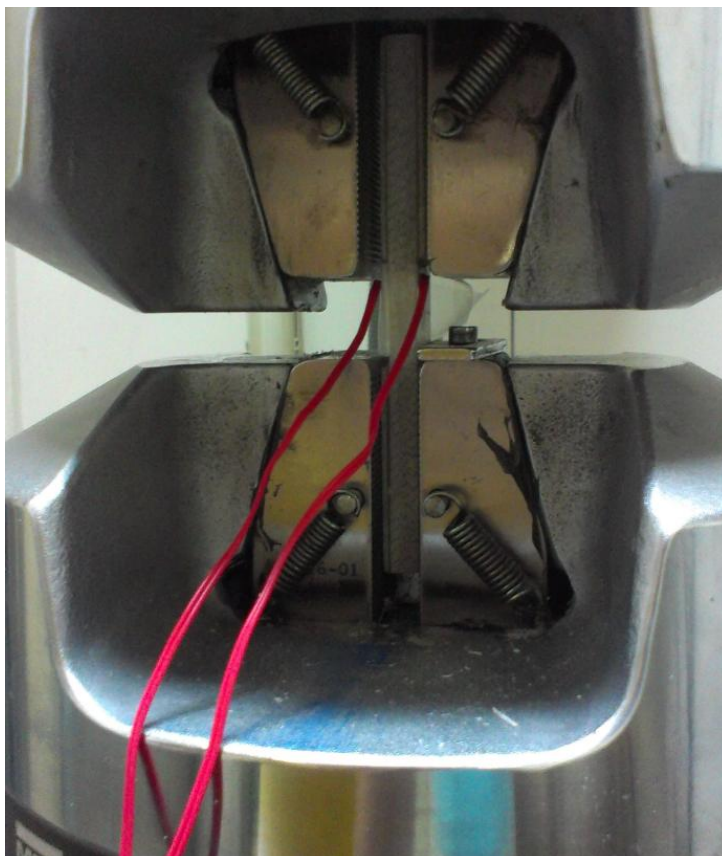
4.1 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

- Το δοκίμιο τοποθετείται στην κάτω αρπάγη της μηχανής DENNISON-MAYES DH 100S δυναμικότητας 100kN.
- Ρυθμίζεται η υδραυλική πίεση συγκράτησης των δοκιμίων στις αρπάγες. Ανάλογα με το ύψος του φορτίου που αναμένεται, η πίεση αυτή στη συγκεκριμένη μηχανή κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 8 και 15MPa. Μεγάλη πίεση χρησιμοποιείται στη διεύθυνση των ινών, ώστε να μη γλιστρούν τα δοκίμια λόγω της υψηλής αντοχής τους, ενώ κάθετα στη διεύθυνση των ινών χρησιμοποιείται συνήθως μικρότερη. Σε κάθε περίπτωση, η πίεση δεν πρέπει να είναι υπερβολική καθώς υπάρχει κίνδυνος σύνθλιψης του δοκιμίου στα άκρα.
- Το δοκίμιο ευθυγραμμίζεται χρησιμοποιώντας γωνιακό αλφάδι. Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ευθυγράμμιση, επειδή το υλικό είναι ανισότροπο.
- Τόσο στον εφελκυσμό, Εικ. 4.1 όσο και στη θλίψη, Εικ. 4.2, όλο το προστατευτικό επίθεμα (tab) πρέπει να βρίσκεται μέσα στην αρπάγη, ώστε το φορτίο να

μεταφέρεται αποτελεσματικότερα στο δοκίμιο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη θλίψη, διαφορετικά το δοκίμιο κινδυνεύει περισσότερο από λυγισμό.



Εικόνα 4.1: Τοποθέτηση εφελκυστικού δοκιμίου στη μηχανή



Εικόνα 4.2: Τοποθέτηση θλιπτικού δοκιμίου στη μηχανή

- Μηδενίζεται το καταγραφικό και ξεκινά η καταγραφή.
- Κλείνει η επάνω αρπάγη. Το δοκίμιο παίρνει μια μικρή προφόρτιση, θλιπτική ή εφελκυστική. Μηδενίζεται το φορτίο χειροκίνητα από τον controller της μηχανής (Εικ. 4.3) ώστε η πειραματική καμπύλη που θα προκύψει να ξεκινά από το μηδέν.
- Ρυθμίζεται ο ρυθμός μετατόπισης της κινούμενης (κάτω) αρπάγης σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο (2mm/min στον εφελκυσμό, 1mm/min στη θλίψη).
- Ξεκινά η δοκιμή.
- Μετά τη θραύση, το δοκίμιο λύνεται και απομακρύνεται από τη μηχανή.



Εικόνα 4.3: Controller MTS 407 της μηχανής δοκιμών

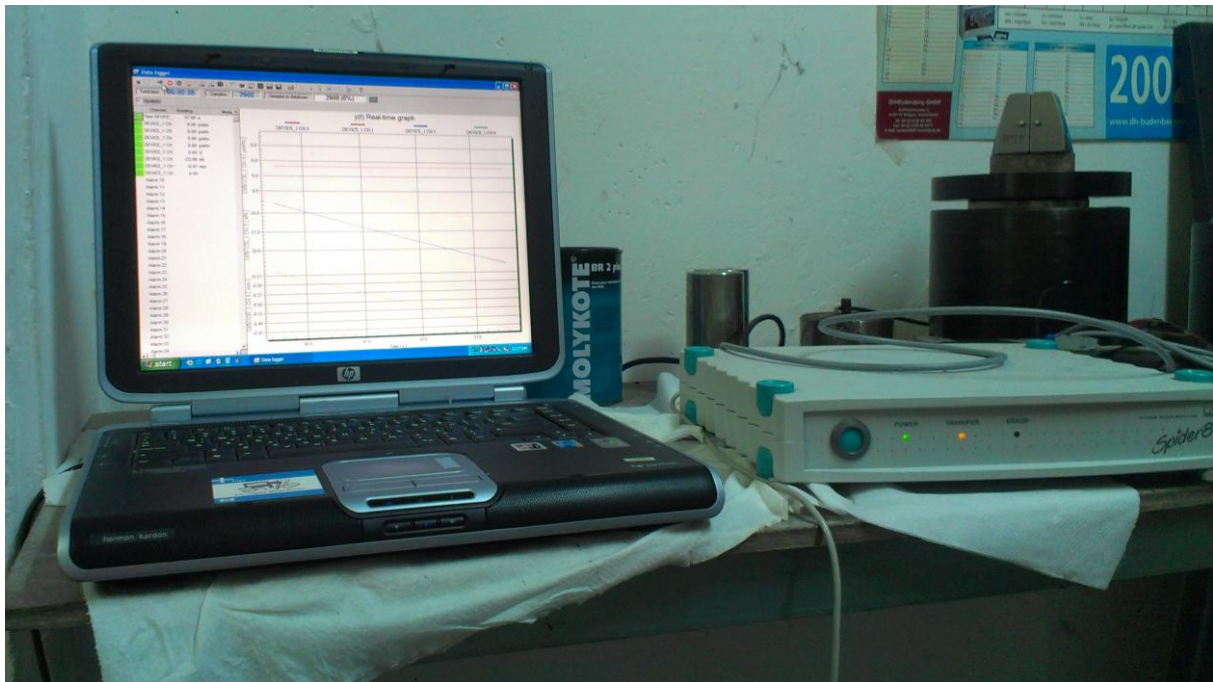
4.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ HBM SPIDER8

Η συσκευή αυτή, που απεικονίζεται στην Εικ. 4.4, διαθέτει συνολικά 8 κανάλια, ένα για το φορτίο, ένα για τη μετατόπιση της κινούμενης αρπάγης της μηχανής, τέσσερα για μηχανοσκόπια και δύο για μέτρηση θερμοκρασίας. Ο χρόνος μπορεί να αποθηκεύεται αυτόματα. Η συσκευή καταγραφής συνδέεται απευθείας με τα μηχανοσκόπια μέσω κατάλληλων καλωδίων που ολοκληρώνουν τη γέφυρα Wheatstone που διαθέτει κάθε κανάλι. Το φορτίο και η μετατόπιση φτάνουν ως αναλογικά σήματα στη συσκευή, απ' ευθείας από τον controller της μηχανής δοκιμών μέσω ομοαξονικών καλωδίων (BNC), και ψηφιοποιούνται πριν καταγραφούν.

Όπως προειπώθηκε, στον εφελκυσμό χρειάζονται 3 κανάλια μηχανοσκόπων, δηλαδή ένα για ένα μόνο strain-gauge και δύο για μια ροζέτα 0/90 (που είναι απαραίτητη για τη μέτρηση του λόγου Poisson). Στη θλίψη χρειάζονται 2 κανάλια, ένα για κάθε μόνο strain-gauge.

Προσοχή πρέπει να δίνεται στα στοιχεία που καταχωρούνται στη συσκευή καταγραφής. Συγκεκριμένα, το k (gauge factor) που εισάγεται στο καταγραφικό πρέπει να αντιστοιχεί κάθε φορά στην ακριβή τιμή k του μηχανοσκόπου που τοποθετήθηκε στο συγκεκριμένο δοκίμιο. Πρέπει εδώ να διευκρινιστεί ότι, από

παρτίδα σε παρτίδα, το k τυπικά όμοιων μηχανοσυστημάτων μπορεί και να διαφέρει (π.χ. σε μια παρτίδα μπορεί να είναι $k=2.07$ ενώ σε μια άλλη $k=2.11$).



Εικόνα 4.4: Καταγραφικό HBM Spider8

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα πειράματα που απαιτούνται για να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων είναι ο εφελκυσμός, η θλίψη και η διάτμηση. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών από το σύστημα καταγραφής ήταν σε μορφή ASCII και για την επεξεργασία τους έγινε πρώτα εισαγωγή τους στο πρόγραμμα excel. Τα στοιχεία που συλλέγονταν από το καταγραφικό σύστημα ήταν ο χρόνος, το φορτίο που δεχόταν το δοκίμιο κατά την κάθε χρονική στιγμή, η μετατόπιση της κινούμενης αρπάγης της μηχανής δοκιμών και οι παραμορφώσεις, δηλαδή οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε πείραμα ήταν η εξής:

Για τον εφελκυσμό: Αρχικά διαγράφηκαν τα δεδομένα που καταγράφηκαν πριν από την έναρξη της δοκιμής. Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης της καταγραφής και της έναρξης του πειράματος. Στο χρονικό αυτό διάστημα, το ήδη τοποθετημένο στην κάτω αρπάγη δοκίμιο, στερεώνεται και στην επάνω αρπάγη. Όταν κλείσουν και οι δυο αρπάγες το δοκίμιο φορτίζεται ελαφρώς. Η μικρή αυτή προφόρτιση αφαιρείται χειρονακτικά με τη βοήθεια του controller της μηχανής, ώστε η δοκιμή να ξεκινήσει από μηδενικό φορτίο. Στη μηδενική αυτή τιμή του φορτίου, η ένδειξη των μηκυνσιομέτρων οφείλει επίσης να είναι μηδενική. Αυτό στην πράξη δεν συμβαίνει: γενικά, με κλειστές αρπάγες και σε μηδενικό φορτίο, η ένδειξη των μηκυνσιομέτρων είναι μη μηδενική, δηλαδή υπάρχει κάποια αρχική τιμή (offset). Πριν από την επεξεργασία, αυτό το offset, που είναι διαφορετικό για κάθε μηκυνσιόμετρο, πρέπει να αφαιρεθεί. Στη συνέχεια, έχοντας τη μετρηθείσα διατομή των δοκιμίων και το φορτίο που καταγράφηκε, και χρησιμοποιώντας τον ορισμό της τάσης $\sigma = P/A$, υπολογίζεται η στιγμιαία τάση στο δοκίμιο. Έπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή της αξονικής παραμόρφωσης από την αξονική ροζέτα που βρίσκεται στη μία πλευρά του δοκιμίου και το μονό αξονικό μηκυνσιόμετρο που βρίσκεται στην άλλη. Έχοντας λοιπόν την τάση και την μέση παραμόρφωση, δημιουργείται το διάγραμμά τους για την περιοχή τιμών παραμόρφωσης από 500με έως 2500με. Η επαπτομένη στη γραμμική αυτή καμπύλη αποτελεί τπ μέτρο ελαστικότητας E ($\sigma = \epsilon \cdot E$). Το δεύτερο διάγραμμα που κατασκευάζεται είναι με τις τιμές που παίρνει το εγκάρσιο και αξονικό μηκυνσιόμετρο της ροζέτας για τιμές που βρίσκονται στην περιοχή από 500με μέχρι 2500με. Από αυτό το διάγραμμα, χρησιμοποιώντας πάλι την επαπτομένη, βρίσκεται ο λόγος Poisson ν . Τέλος, σημειώνονται και οι μέγιστες τιμές του φορτίου και της τάσης. Η μέγιστη τιμή της τάσης αποτελεί την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό.

Για τη θλίψη: Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή του εφελκυσμού. Αρχικά διαγράφονται τα δεδομένα που καταγράφηκαν πριν από την έναρξη της δοκιμής. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14126:1999, συμπεραίνουμε ότι υπό θλιπτική φόρτιση τα δοκίμια της θλίψης είναι πιθανό να λυγίσουν. Ο λυγισμός είναι μη επιθυμητός, διότι έτσι υποεκτιμάται η αντοχή του υλικού σε θλίψη. Γίνεται λοιπόν έλεγχος για λυγισμό, υπολογίζοντας ένα δείκτη που ονομάζεται bending strain σύμφωνα με τη σχέση:

$$\left| (\epsilon_b - \epsilon_c) / (\epsilon_b + \epsilon_c) \right| \quad (5.1)$$

Οι παραμορφώσεις που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω σχέση είναι οι ενδείξεις των δυο μηκυνσιομέτρων. Για να μη θεωρηθεί πως το δοκίμιο λύγισε, η τιμή του bending strain δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10%. Για τον έλεγχο λυγισμού, κατασκευάζεται το διάγραμμα του bending strain συναρτήσει της τάσης. Εάν έως τη θραύση η τιμή του bending strain υπερβεί το όριο αυτό, τότε θεωρείται πως το δοκίμιο λύγισε. Τότε σημειώνεται η τιμή της τάσης στην οποία παρατηρήθηκε η υπέρβαση, ως μέτρο του πότε συνέβη ο λυγισμός. Τέλος, σημειώνονται οι μέγιστες τιμές που έχει πάρει το φορτίο και η τάση. Η μέγιστη τιμή της τάσης αποτελεί την αντοχή του υλικού σε θλίψη.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

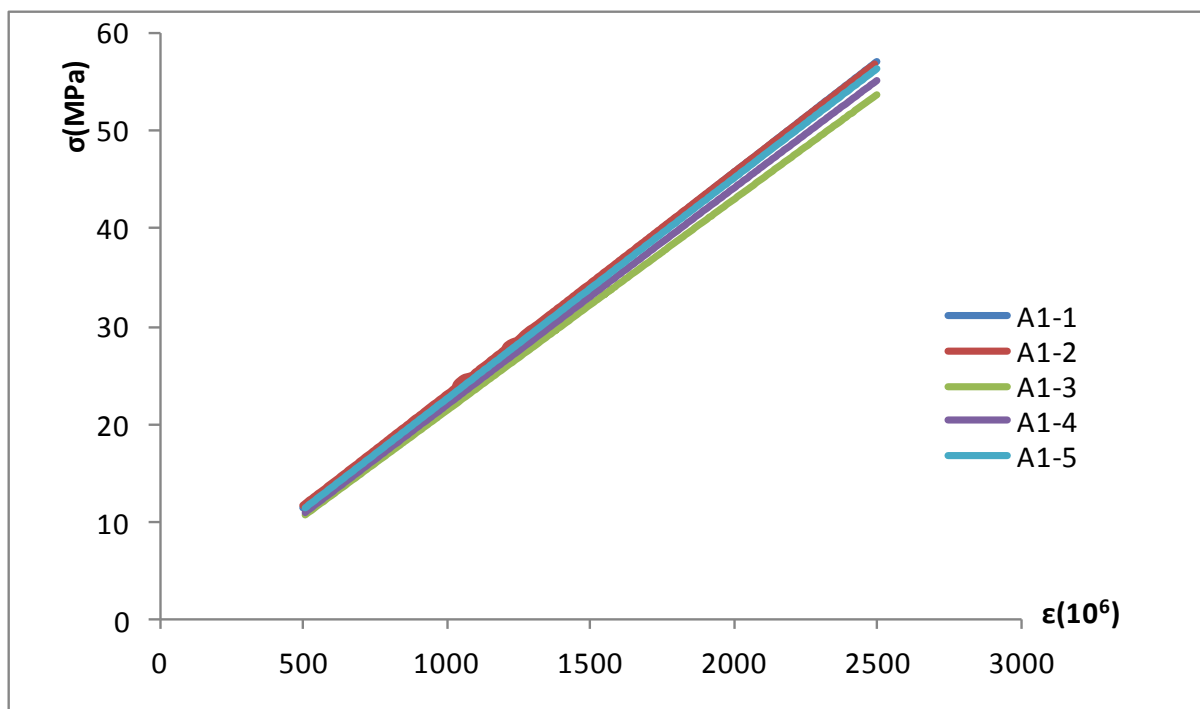
Στους παρακάτω πίνακες καταγράφονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια που υπόκεινται σε εφελκυσμό και θλίψη. Τα δοκίμια χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη διεύθυνση φόρτισης σε σχέση με τη διεύθυνση των ινών (0° και 90°) και με τον τρόπο κατασκευής τους (WET HAND LAY-UP και VACUUM BAGGING). Στους πίνακες, εκτός από τα πειραματικά αποτελέσματα, μέγιστο φορτίο, μέγιστη τάση, μέτρο ελαστικότητας και λόγο Poisson (μόνο στον εφελκυσμό), αναφέρεται επίσης η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση καθώς και ο συντελεστής μεταβλητότητας, που ορίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή. Ο συντελεστής μεταβλητότητας (COV, coefficient of variation) είναι σημαντικός επειδή υποδεικνύει κατά πόσο τα πειραματικά αποτελέσματα είναι συνεπή. Αν για παράδειγμα η τιμή του συντελεστή αυτού είναι κάτω από 10%, τότε το πείραμα θεωρείται επιτυχές, αντιθέτως όσο μεγαλύτερος είναι ο COV τόσο μεγαλύτερη είναι και η διασπορά.

Πιο ειδικά, στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 6.1) καταγράφονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια που υποβάλλονται σε εφελκυσμό και είναι κατασκευασμένα με επίστρωση με το χέρι (WET HAND LAY-UP). Κάθε ομάδα δοκιμίων έχει διαφορετική διεύθυνση φόρτισης (στην A1 ομάδα οι ίνες είναι τοποθετημένες σε διεύθυνση 0° και στην A2 σε 90°). Στον πίνακα παρατηρούνται ιδιομορφίες σε ορισμένα δοκίμια. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια A2_2, A2_6 και A2_7 το μονό strain gauge δεν λειτούργησε οπότε το μέτρο ελαστικότητας E προκύπτει μόνο από τη μέτρηση της αξονικής ροζέτας. Στα υπόλοιπα δοκίμια, η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε όπως ακριβώς αναφέρεται στο κεφάλαιο 5.

Πίνακας 6.1: Εφελκυσμός, Μέθοδος κατασκευής: WET HAND LAY-YP

TEST	Coupon ID	A mm ²	P _{max} kN	σ _{max} MPa	E GPa	ν
TENSION 0°	A1_1	77.01	37.53	487.34	22.80	0.3104
	A1_2	77.29	40.03	517.95	22.70	0.3042
	A1_3	81.42	37.65	462.45	21.60	0.2502
	A1_4	79.75	37.53	470.60	22.10	0.3224
	A1_5	75.96	34.18	450.00	22.60	0.2718
	Μέση πμμή		37.39	477.67	22.36	0.2918
	Τυπική απόκλιση		1.86	23.51	0.45	0.0267
COV (%)			4.99	4.92	2.01	9.1529
TEST	Coupon ID	A mm ²	P _{max} kN	σ _{max} MPa	E GPa	ν
TENSION 90°	A2_1	142.92	5.56	38.93	8.1	0.0931
	A2_2	139.78	5.99	42.86	9.5	0.0986
	A2_3	136.98	6.04	44.12	8.9	0.1115
	A2_5	142.26	5.77	40.54	8.40	0.1134
	A2_6	143.30	5.78	40.36	12.6	0.0952
	A2-7	141.46	5.52	39.04	8.1	
	Μέση πμμή		5.78	40.98	9.27	0.1024
	Τυπική απόκλιση		0.19	1.91	1.57	0.0084
COV (%)			3.35	4.66	16.93	8.25

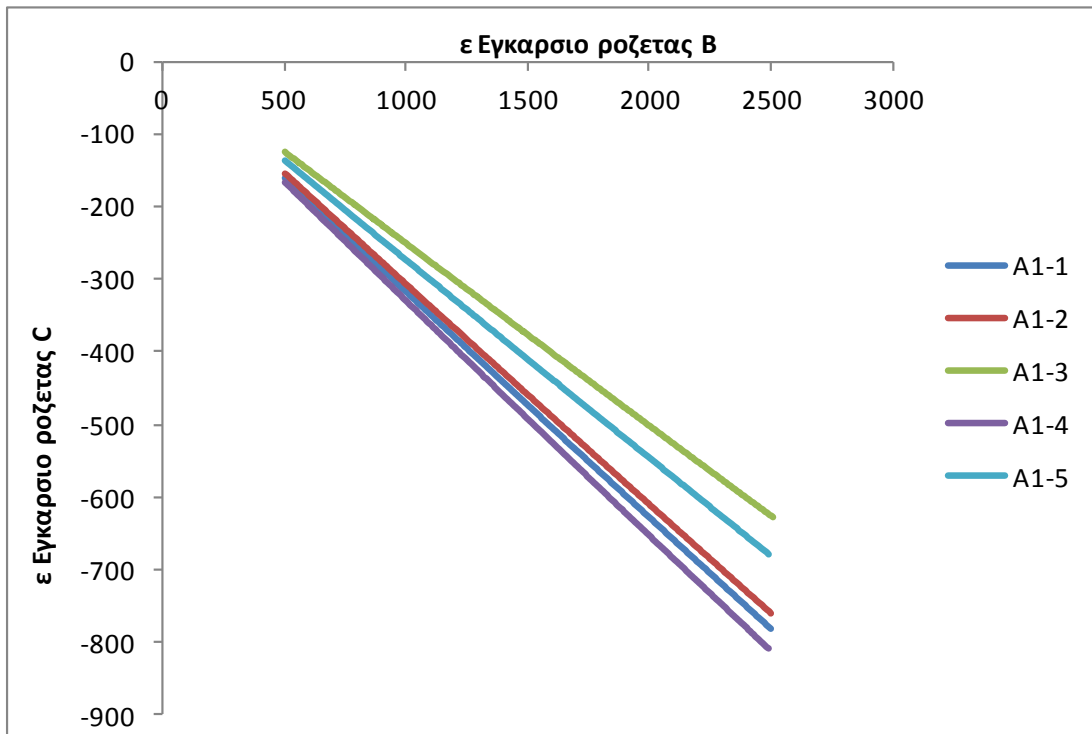
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Εικ. 6.1) με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια της ομάδας A1 όπου η διεύθυνση φόρτισης βρίσκεται στις 0°. Το διάγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης όλων των δοκιμίων της ίδιας ομάδας. Το εύρος τιμών στο οποίο έγινε είναι από 500 έως 2500με σύμφωνα με τα πρότυπα που ακολουθήθηκαν. Από την εφαιπτομένη του διαγράμματος προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας E. Η τυπική απόκλιση του E είναι 0.45. Αυτό δηλώνει ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας μεταβάλλονται ελάχιστα από δοκίμιο σε δοκίμιο. Γι' αυτό και στο συγκεντρωτικό διάγραμμα οι ευθείες γραμμές οριακά συμπίπτουν. Το παραπάνω μας το επιβεβαιώνει και ο συντελεστής μεταβλητότητας με τιμή 2.01%.



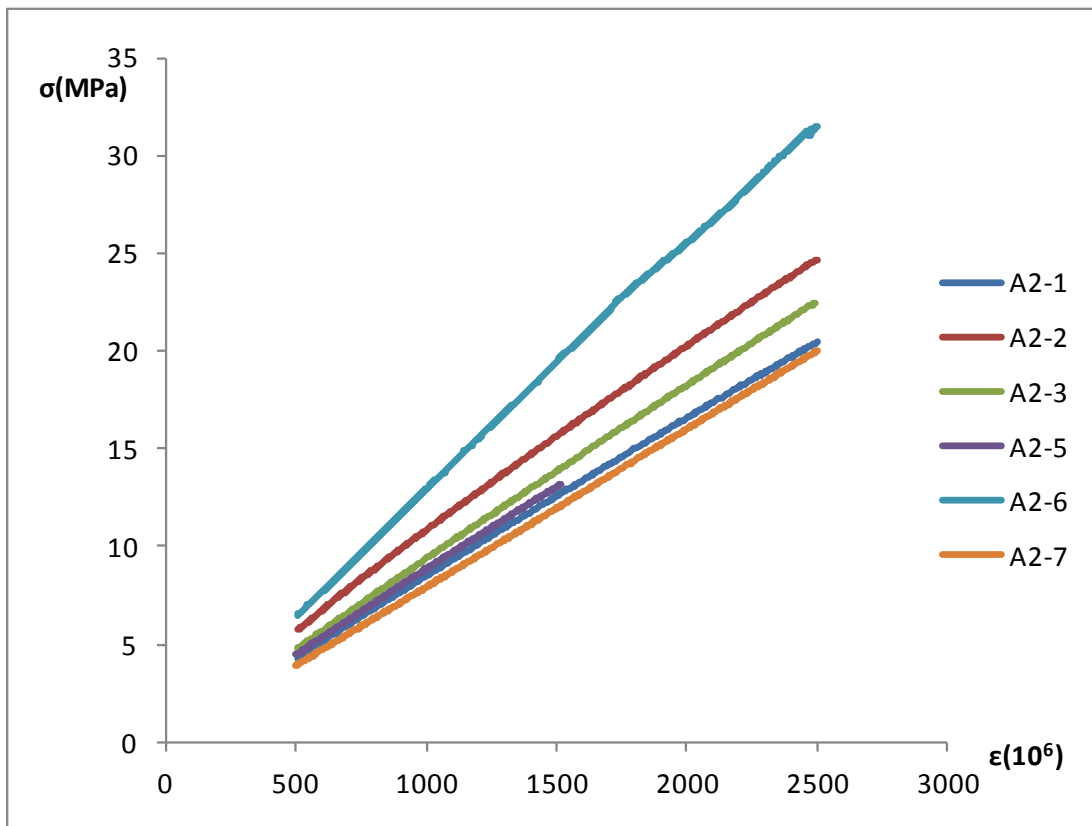
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα A1

Στο δεύτερο συγκεντρωτικό διάγραμμα (Εικ. 6.2) για την ίδια ομάδα (A1), με την βοήθεια πάλι της εφαπτομένης βρίσκουμε το λόγο Poisson ν . Παρατηρούμε ξανά ότι οι διαφορές είναι μικρές. Μπορούμε να πούμε ότι το πείραμα ήταν επιτυχές, με τα δοκίμια σωστά κατασκευασμένα και την τοποθέτηση των μηκυσιομέτρων αρκετά ικανοποιητική (COV κάτω του 10%).

Στην ομάδα A2 προβάλλεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Εικ. 6.3) με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια. Η διεύθυνση φόρτισης βρίσκεται στις 90° . Από την εφαπτομένη του διαγράμματος προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας E . Ωστόσο, ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 16.93% γι' αυτό και οι ευθείες των διαγραμμάτων απέχουν και δεν συμπίπτουν όπως στο αντίστοιχο διάγραμμα του A1.

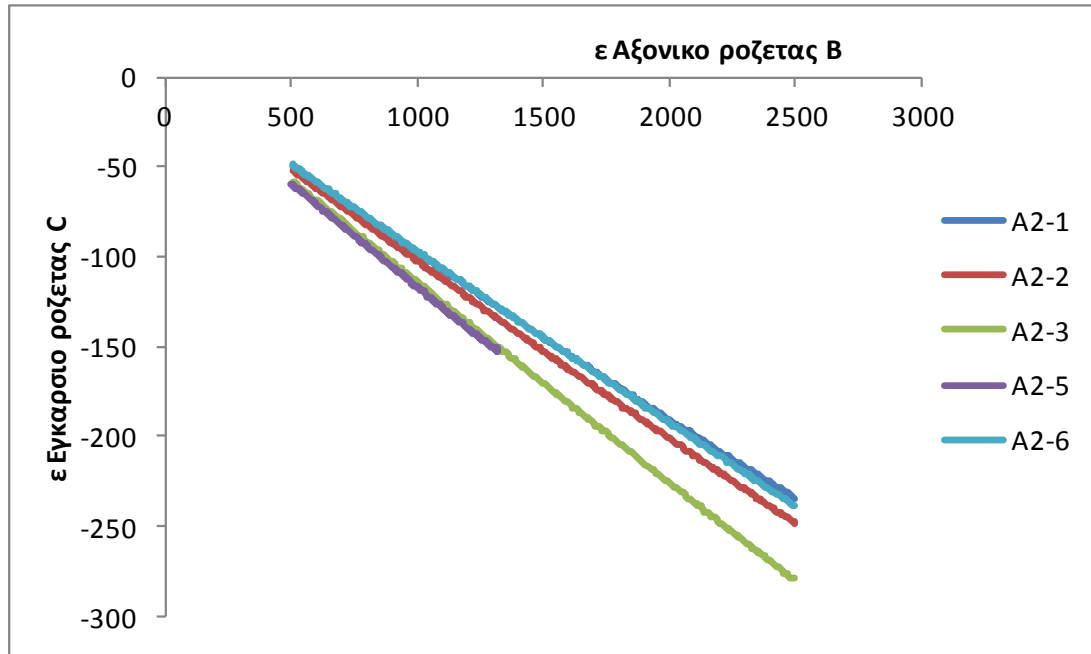


Εικόνα 6.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων, ομάδα A1



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα A2

Στο δεύτερο συγκεντρωτικό διάγραμμα για την ίδια ομάδα (A2), που βρίσκεται παρακάτω στην Εικ. 6.4 χρησιμοποιώντας πάλι την εφαπτομένη βρίσκουμε το λόγο Poisson. Παρατηρείται ότι οι διαφορές είναι μικρές και ο συντελεστής μεταβλητότητας μικρότερος του 10%.



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα παραμορφώσεων, ομάδα A2

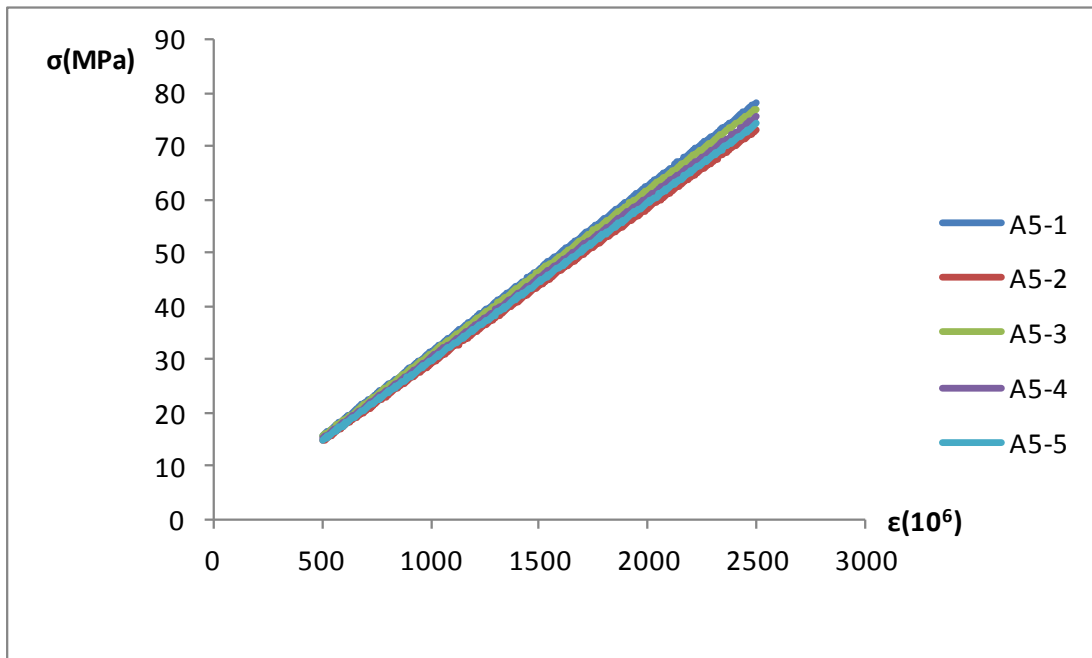
Στον παρακάτω Πίν. 6.2 βλέπουμε τις συνολικές τιμές για τα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό και είναι κατασκευασμένα με επίστρωση με το χέρι παρουσία κενού (VACUUM BAGGING). Κάθε ομάδα δοκιμίων έχει διαφορετική διεύθυνση φόρτισης συναρτήσει της διεύθυνσης των ινών (0° και 90°).

Πίνακας 6.2: Εφελκυσμός, μέθοδος κατασκευής: Vacuum bagging

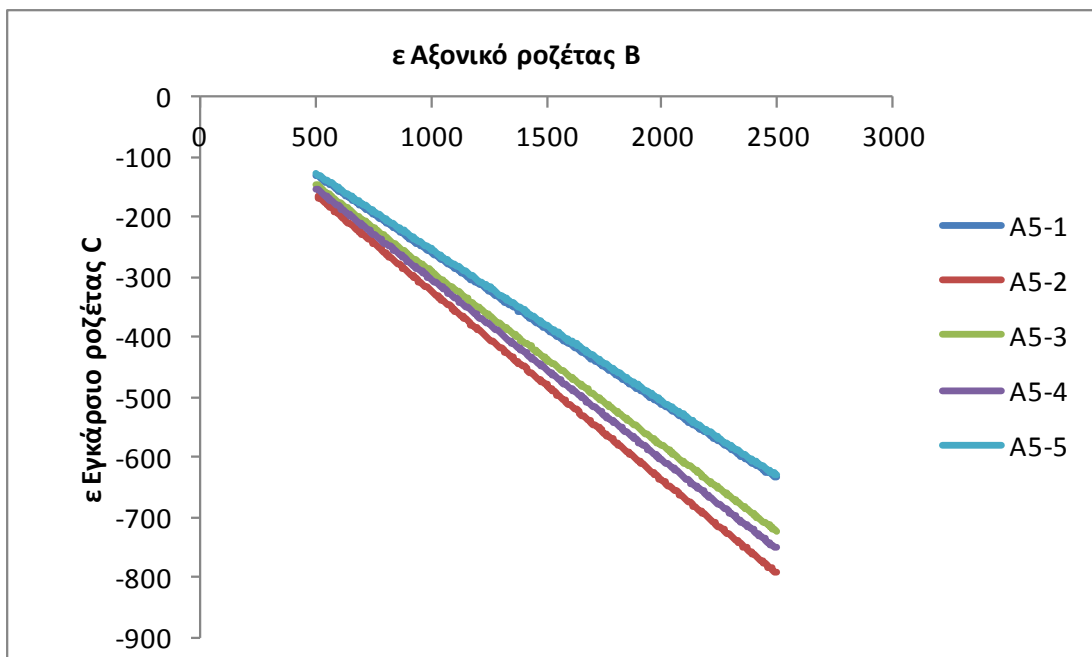
TEST	Κουπον ID	A mm ²	P _{max} kN	σ _{max} MPa	E GPa	ν
TENSION 0°	A5-1	54.58	31.65	579.95	31.30	0.2530
	A5-2	55.50	37.23	670.74	29.30	0.3152
	A5-3	55.74	34.61	620.87	30.90	0.2940
	A5-4	53.41	32.65	611.30	30.20	0.3007
	A5-5	56.02	35.24	629.09	29.70	0.2526
	Μέση πμμή		34.28	622.39	30.28	0.2831
	Τυπική απόκλιση		1.96	29.36	0.74	0.0257
COV (%)			5.73	4.72	2.44	9.0681
TEST	Κουπον ID	A mm ²	P _{max} kN	σ _{max} Mpa	E GPa	ν
TENSION 90°	A6-1	112.40	6.15	54.70	10.50	0.1103
	A6-2	112.85	5.99	53.11	10.60	0.1067
	A6-3	119.81	6.06	50.60	9.30	0.0921
	A6-4	110.51	5.26	47.60	10.30	0.1068
	A6-5	114.78	6.24	54.35	10.50	0.1082
	Μέση πμμή		5.94	52.07	10.24	0.1048
	Τυπική απόκλιση		0.35	2.66	0.48	0.0065
COV (%)			5.89	5.11	4.69	6.1931

Παρακάτω (Εικ. 6.5), προβάλλεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια της ομάδας A5 όπου η διεύθυνση φόρτισης βρίσκεται στις 0°. Από την εφαπτομένη του διαγράμματος βρίσκεται το μέτρο ελαστικότητας. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 2.44%. Αυτό μας δηλώνει ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας μεταβάλλονται ελάχιστα. Γι' αυτό και στο συγκεντρωτικό διάγραμμα οι ευθείες γραμμές οριακά συμπίπτουν.

Στο δεύτερο συγκεντρωτικό διάγραμμα (Εικ. 6.6) για την ίδια ομάδα (A5), με την βοήθεια πάλι της εφαπτομένης βρίσκουμε το λόγο Poisson. Ο COV είναι στο 9.06%.

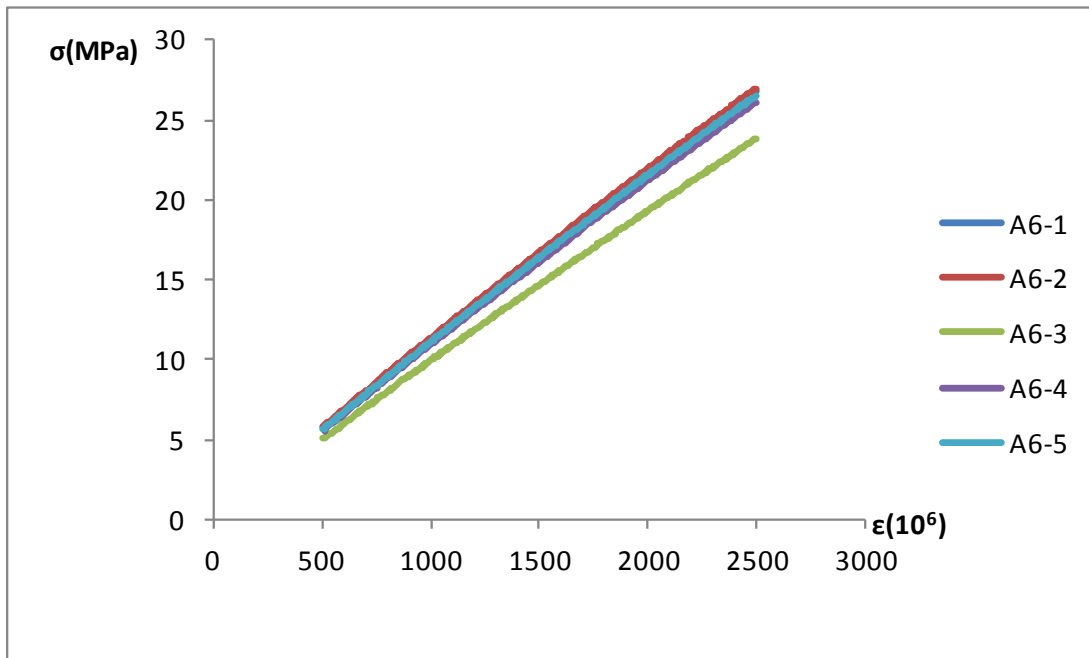


Εικόνα 6.5: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα A5

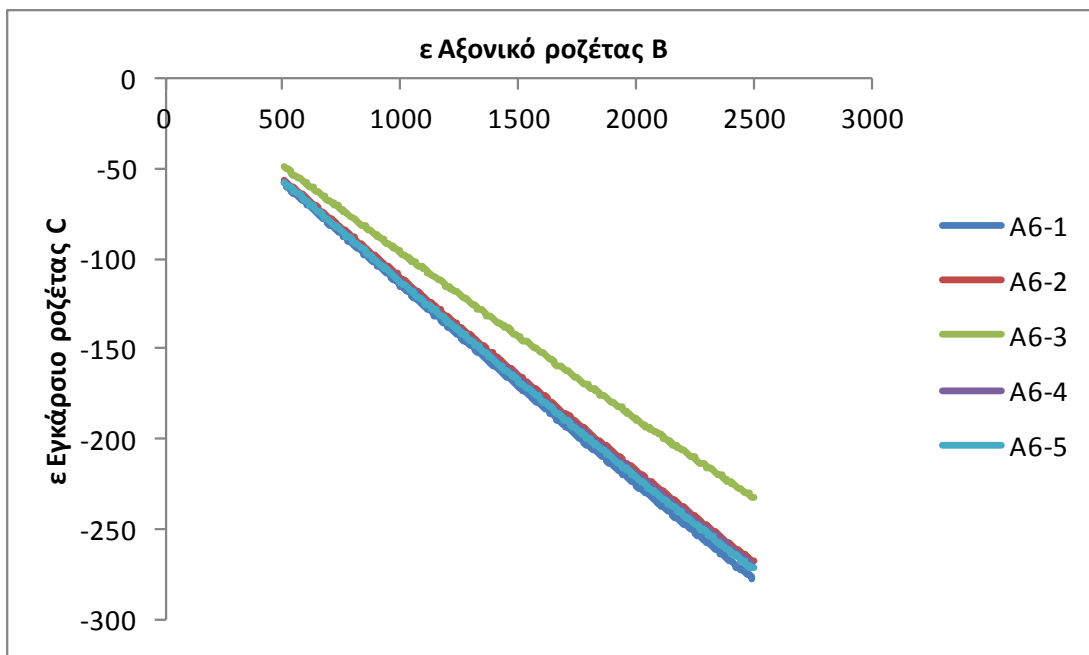


Εικόνα 3.6: Διάγραμμα λόγου Poisson, ομάδα A5

Τα αντίστοιχα με τα παραπάνω ισχύουν και για την ομάδα A6, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικ. 6.7) όπου η τυπική απόκλιση για το μέτρο ελαστικότητας E είναι 0.48 και ο συντελεστής μεταβλητότητας 4.69%.



Εικόνα 6.7 : Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα A6



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα λόγου Poisson, ομάδα A6

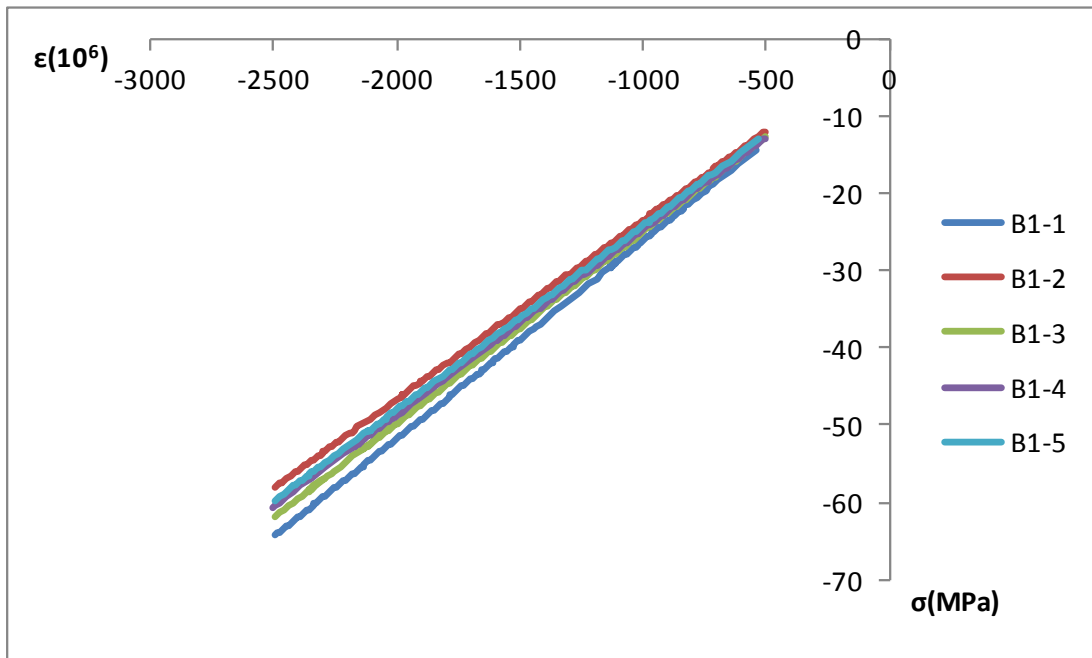
Στον παρακάτω Πίν. 6.3, καταχωρούνται οι συνολικές τιμές για τα δοκίμια σε θλίψη που είναι κατασκευασμένα με επίστρωση με το χέρι (WET HAND LAY-UP). Κάθε ομάδα δοκιμών έχει διαφορετική διεύθυνση φόρτισης (στη B1 ομάδα οι ίνες είναι στις 0° και στην B2 οι ίνες είναι στις 90°). Στην τελευταία στήλη έχει σημειωθεί ποια δοκίμια υπέστησαν λυγισμό και σε ποια τιμή τάσης.

Πίνακας 6.3: Θλίψη, μέθοδος κατασκευής: WET HAND LAY-UP

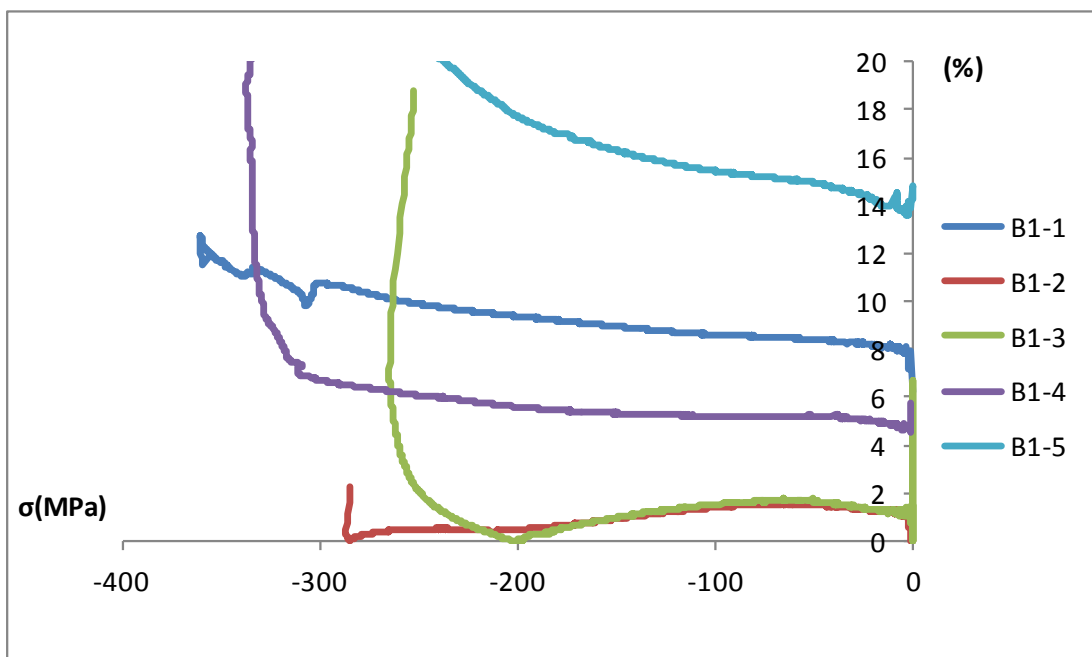
TEST	Coupon ID	A mm ²	P _{min} kN	σ _{min} MPa	E GPa	σ Mpa
COMPRESSION 0°	B1_1	131.28	-47.39	-360.99	25.70	
	B1_2	142.94	-41.02	-286.96	23.20	
	B1_3	141.49	-37.50	-265.03	24.80	-263.60
	B1_4	142.55	-48.28	-338.66	24.00	-329.39
	B1_5	138.58	-39.36	-283.99	23.90	
	Μέση πμή		4.10	-307.12	24.32	
	Τυπική απόκλιση		4.34	36.36	0.86	
COV (%)			105.83	-11.84	3.52	
TEST	Coupon ID	A mm ²	P _{min} kN	σ _{min} MPa	E GPa	σ MPa
COMPRESSION 90°	B2_1	223.90	-29.58	-132.13	8.80	
	B2_2	210.92	-24.56	-116.46	9.30	-85.60
	B2_3	221.11	-30.47	-137.82	9.00	-0.21
	B2_4	215.62	-27.62	-128.11	9.30	
	B2_5	205.31	-25.90	-126.16	9.60	-125.13
	B2_6	204.19	-24.88	-121.83	9.40	
	Μέση πμή		-27.17	-127.08	9.23	
Τυπική απόκλιση		2.26	6.87	0.26		
COV (%)			-8.31	-5.41	2.84	

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικ. 6.9) τάσης-παραμόρφωσης προβάλλονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια της ομάδας B1 όπου η διεύθυνση φόρτισης βρίσκεται στις 0°. Η τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας είναι 0.86 και ο COV 3.52%.

Στο παρακάτω διάγραμμα λυγισμού (Εικ. 6.10) καταχωρούνται όλες οι τιμές bending strain που παίρνει το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι καμπύλες που δεν ξεπερνούν το 10% φανερώνουν ότι στα συγκεκριμένα δοκίμια δεν παρατηρήθηκε λυγισμός. Οι υπόλοιπες, οι οποίες ξεπερνούν το ποσοστό, δείχνουν ότι το δοκίμιο έχει λυγίσει.

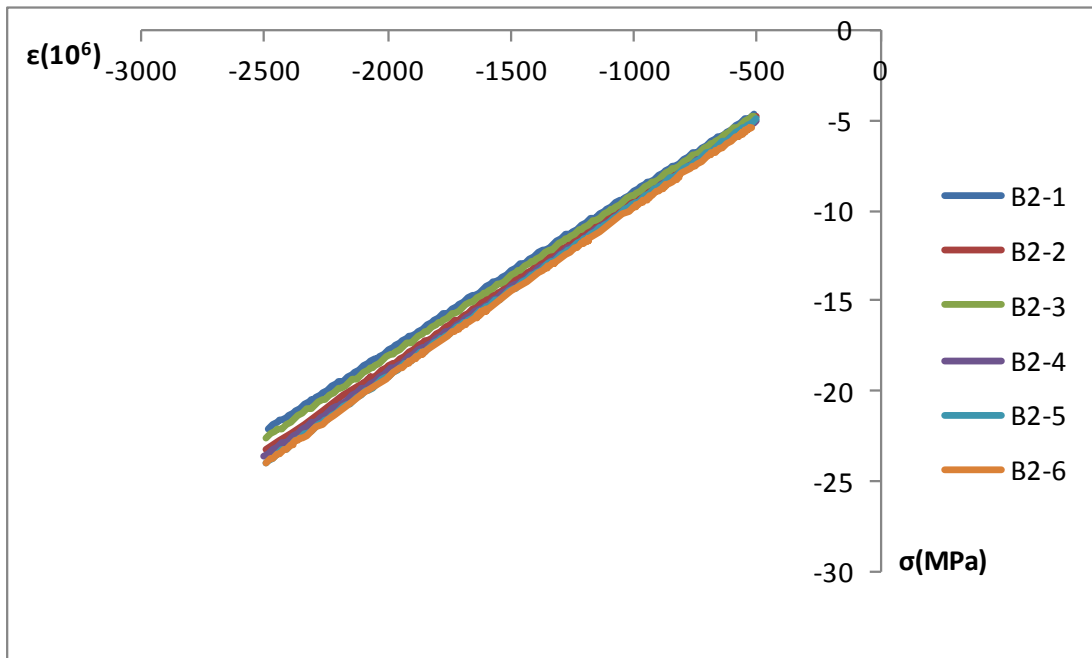


Εικόνα 6.9: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα B1



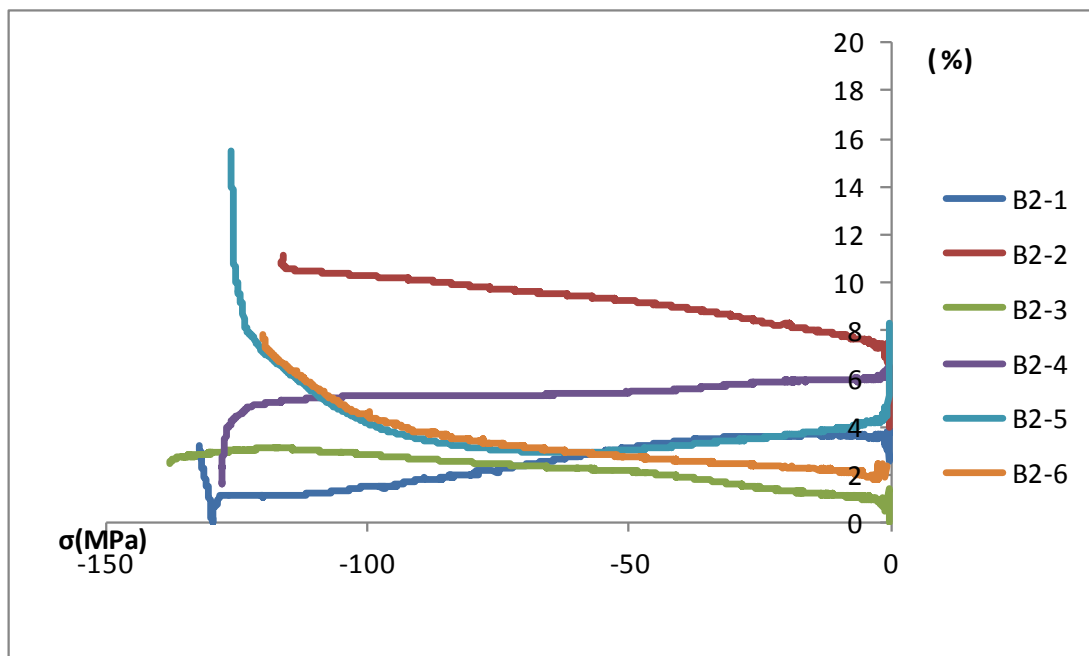
Εικόνα 6.10: Διάγραμμα λυγισμού, ομάδα B1

Στο διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης (Εικ. 6.11) για την ομάδα B2 όπου η διεύθυνση φόρτισης είναι στις 90° η τυπική απόκλιση του E είναι 0.26. Αυτό δηλώνει ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας μεταβάλλονται ελάχιστα. Γι' αυτό και στο συγκεντρωτικό διάγραμμα οι ευθείες γραμμές οριακά συμπίπτουν.



Εικόνα 6.11: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα B2

Στο παρακάτω διάγραμμα λυγισμού είναι επίσης καταχωρημένες (Εικ. 6.12) όλες οι τιμές bending strain που παίρνει το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 6.12: Διάγραμμα λυγισμού, ομάδα B2

Στον παρακάτω πίνακα (Πίν 6.4) βλέπουμε τις συνολικές τιμές για τα δοκίμια σε θλίψη που είναι κατασκευασμένα με επίστρωση με το χέρι παρουσία κενού

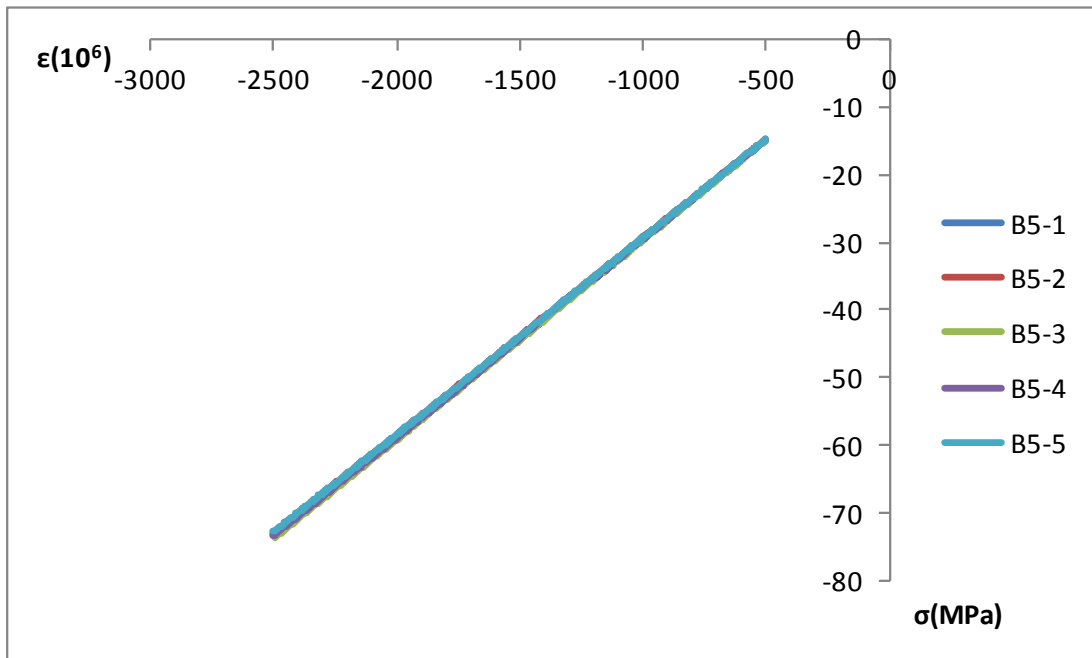
(VACUUM BAGGING). Κάθε ομάδα δοκιμών έχει διαφορετική διεύθυνση φόρτισης (0° και 90°). Στο παραπάνω πίνακα παρατηρούμε κάποιες ιδιομορφίες στο δοκίμιο B6_3. Σε αυτό το δοκίμιο το ένα strain-gauge δεν λειτούργησε, οπότε το μέτρο ελαστικότητας βγαίνει μόνο από τη μέτρηση του δεύτερου strain-gauge.

Πίνακας 6.4: Θλίψη, μέθοδος κατασκευής: Vacuum bagging

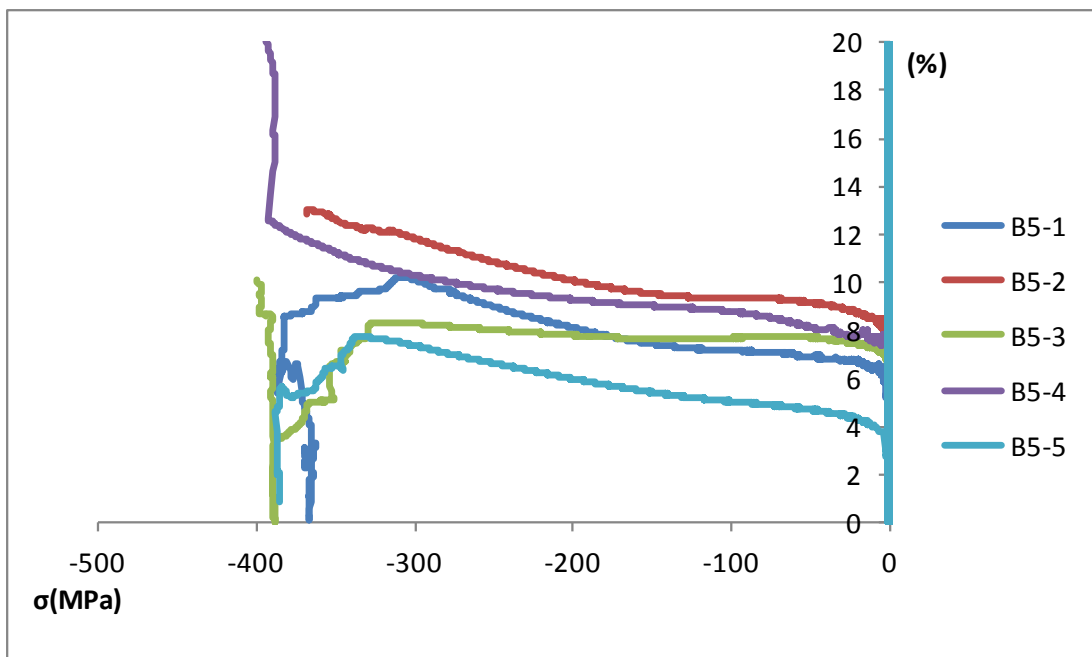
TEST	Κουπον ID	A mm ²	P _{min} kN	σ _{min} MPa	E GPa	σ MPa
COMPRESSION 0°	B5-1	111.96	-43.33	-387.04	29.3	-295.69
	B5-2	111.73	-41.18	-368.57	29.2	-194.97
	B5-3	110.86	-44.65	-402.73	29.5	-400.07
	B5-4	111.62	-44.39	-397.70	29.4	-277.05
	B5-5	113.22	-43.92	-387.95	29.1	
	Μέση πμή		-43.50	-388.80	29.30	
	Τυπική απόκλιση		1.24	11.72	0.14	
COV (%)			-2.85	-3.01	0.48	
TEST	Κουπον ID	A mm ²	P _{min} kN	σ _{min} MPa	E GPa	σ MPa
COMPRESSION 90°	B6-1	169.71	-20.90	-123.16	11	
	B6-2	169.87	-21.99	-129.47	11.2	
	B6-3	165.58	-21.11	-127.52	21.6	
	B6-4	167.88	-22.33	-133.04	10.8	-131.34
	B6-5	170.07	-22.93	-134.84	11.9	-95.00
	Μέση πμή		-21.85	-129.60	13.30	
	Τυπική απόκλιση		0.76	4.13	4.17	
COV (%)			-3.46	-3.18	31.33	

Στο παρακάτω διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Εικ. 6.13) της ομάδας B5, η τυπική απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας E είναι 0.14 οριακά τείνει στο μηδέν και αυτό φαίνεται στο διάγραμμα όπου οι ευθείες συμπίπτουν. Αντίστοιχα ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι 0.48%. Στο διάγραμμα λογισμού για την ομάδα B5 όλες οι γραμμές είναι κάτω του 10% (Εικ. 6.14).

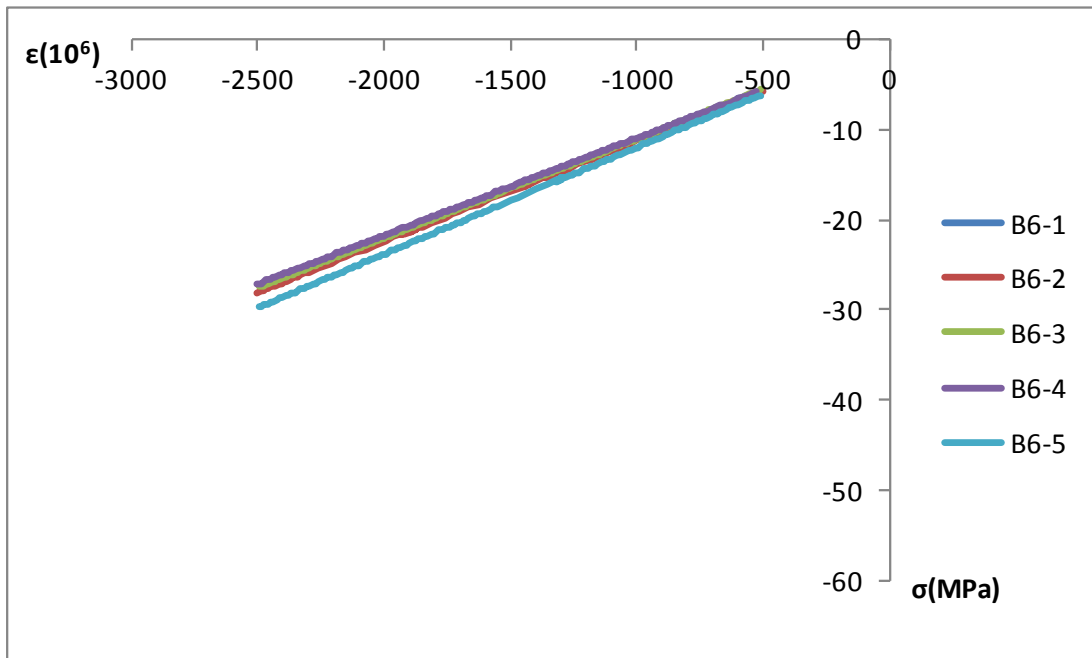
Στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Εικ. 6.15) για την ομάδα B6 όπου η διεύθυνση φόρτισης είναι στις 90°, οι ευθείες γραμμές οριακά συμπίπτουν εκτός από αυτήν του δοκιμίου B6_3, γι' αυτό και η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι αρκετά μεγάλη όπως και η τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας που είναι στο 31.33%.



Εικόνα 6.13: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα B5

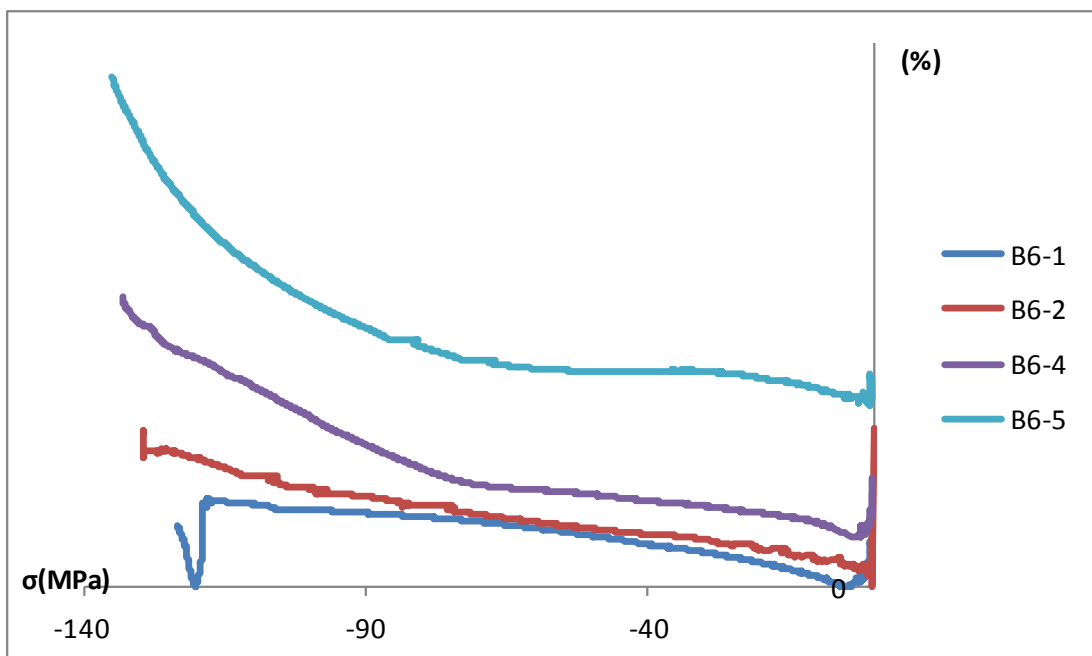


Εικόνα 6.14: Διάγραμμα λυγισμού, ομάδα B5



Εικόνα 6.15: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, ομάδα B6

Στο διάγραμμα λυγισμού για την ομάδα B6 (Εικόνα 6.16) όλες οι γραμμές είναι κάτω του 10% άρα τα δοκίμια δεν έχουν υποστεί λυγισμό. Το B6_3 έχει μόνο ένα strain-gauge και δεν μπορεί να γίνει το διάγραμμα λυγισμού του.



Εικόνα 6.16: Διάγραμμα λυγισμού, ομάδα B6

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν ήταν κατασκευασμένα, το ένα με επίστρωση με το χέρι (WEY HAND LAY-UP) και το δεύτερο με επίστρωση με το χέρι παρουσία κενού (VACUUM BAGGING).

Θεωρητικά, η διαδικασία επίστρωσης με το χέρι παρουσία κενού είναι καλύτερη γιατί αφαιρείται ο περιττός αέρας και επιτυγχάνεται καλύτερη συμπίεση (compaction). Αυτό προκύπτει και στην εργασία αυτή. Πιο αναλυτικά, παρατίθενται οι πίνακες με τις μέσες ιδιότητες των ομάδων συνολικά και δίνονται οι αντίστοιχες ποσοστιαίες αποκλίσεις.

Για τον εφελκυσμό:

Πίνακας 7.1: Σύγκριση ιδιοτήτων A1, A5

0°	WET	VAC	Τυπική απόκλιση
σ_{\max} (MPa)	477.67	622.39	30.30
E (GPa)	22.36	30.28	35.42
ν	0.2918	0.2831	2.98

Πίνακας 7.2: Σύγκριση ιδιοτήτων A2, A6

90°	WET	VAC	Τυπική απόκλιση
σ_{\max} (MPa)	40.976	52.074	27.08
E (GPa)	9.2667	10.24	10.50
ν	0.1024	0.1048	2.40

Για τη θλίψη:

Πίνακας 7.3: Σύγκριση ιδιοτήτων B1, B5

0°	WET	VAC	Τυπική απόκλιση
σ_{\max} (MPa)	-307.1	-388.80	26.59
E (GPa)	24.32	29.3	20.48

Πίνακας 7.4: Σύγκριση ιδιοτήτων B2, B6

90°	WET	VAC	Τυπική απόκλιση
σ_{\max} (MPa)	-127.1	-129.6	1.98
E (GPa)	9.2333	13.3	44.04

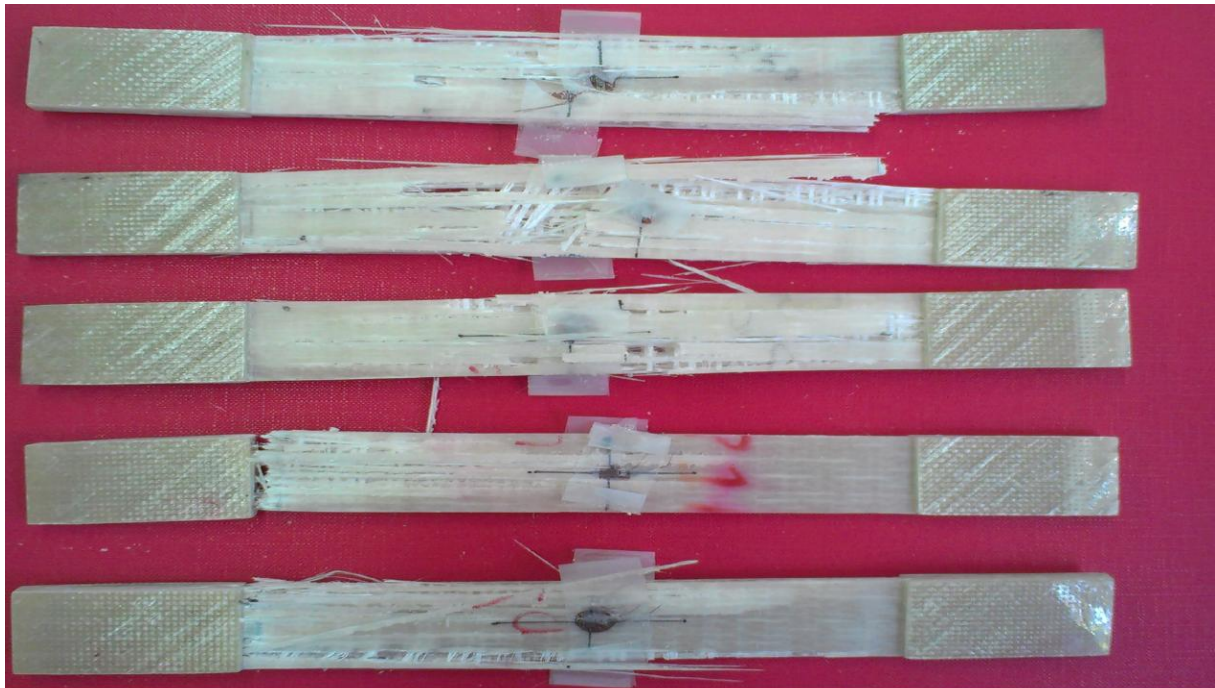
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ιστότοπος:
http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8616/1/FOURLAS_MARIOS.pdf «Η επίδραση της ενδιάμεσης φάσης στον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου αποθήκευσης και απωλειών των κοκκωδών σύνθετων υλικών», Μάριος Φούρλας.
2. «Παρασκευή και χαρακτηρισμός ενισχυτικών νανοδομών και πολυμερών συνθέτων υλικών βασισμένων στους νανοσωλήνες άνθρακα», Δημήτρης Καστάνης, 2008
3. Ιστότοπος:
http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
«Σύνθετα υλικά (Composites)», Δικτυακός Τόπος Σελίδων Μαθημάτων Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π
4. Ιστότοπος:
http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/8615/1/Alexandratoss_FSP.pdf
«Βελτιστοποίηση και παραγωγή συνθέτων υλικών αλούμινας / μήτρας κράματος αλουμινίου 7075-Ο, με χρήση της διαδικασίας διά τριβής με ανάδευση (FSP)», Σπυρίδων Α. Αλεξανδράτος
5. «Σύνθετα υλικά», Γ. Παπανικολάου, Δ. Μουζάκης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
6. http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_III.pdf «Μηχανική συμπεριφορά υλικών», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
7. http://eclass.cie.teithe.gr/TPEY127/document/SHMEIWSEIS/CHAPTER7_1.pdf
«Μέτρηση παραμορφώσεων με ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Θεσσαλονίκης
8. Ιστότοπος: <http://www.straintech.fi/pdf/whats.pdf> «Introduction to Strain Gages», Εταιρία Kyowa
9. http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/5373/3/maliogloua_carbon.pdf
«Ανάπτυξη, χαρακτηρισμός κι εφαρμογή σύνθετων μαγνητοελαστικών υλικών για την μέτρηση μηχανικής παραμόρφωσης», Αλέξανδρος Μαλιόγλου
10. *Plastics-Determination of tensile properties, British Standard*
ISO 604:1993 Πλαστικά - Προσδιορισμός των ιδιοτήτων της θλίψης.
(ISO 604:1993 Plastics -- Determination of compressive properties)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α
ΕΙΚΟΝΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ



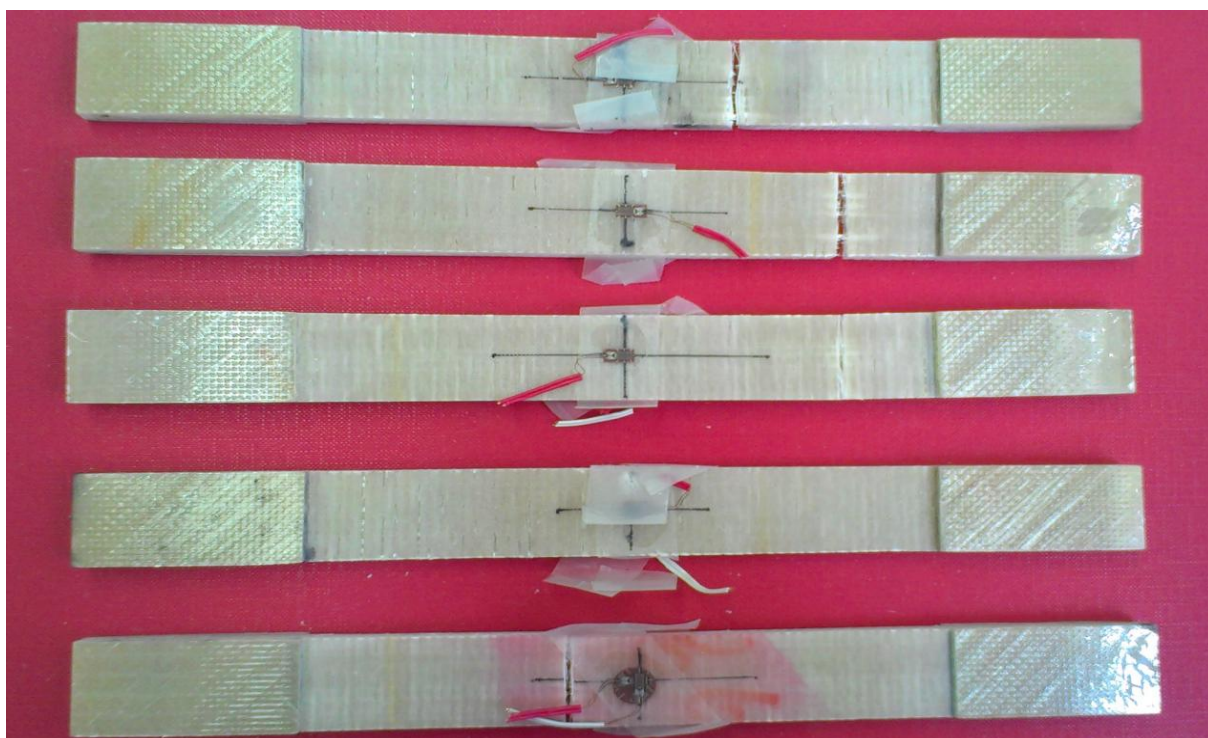
Εικόνα Α.1: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα Α1 (όψη Α)



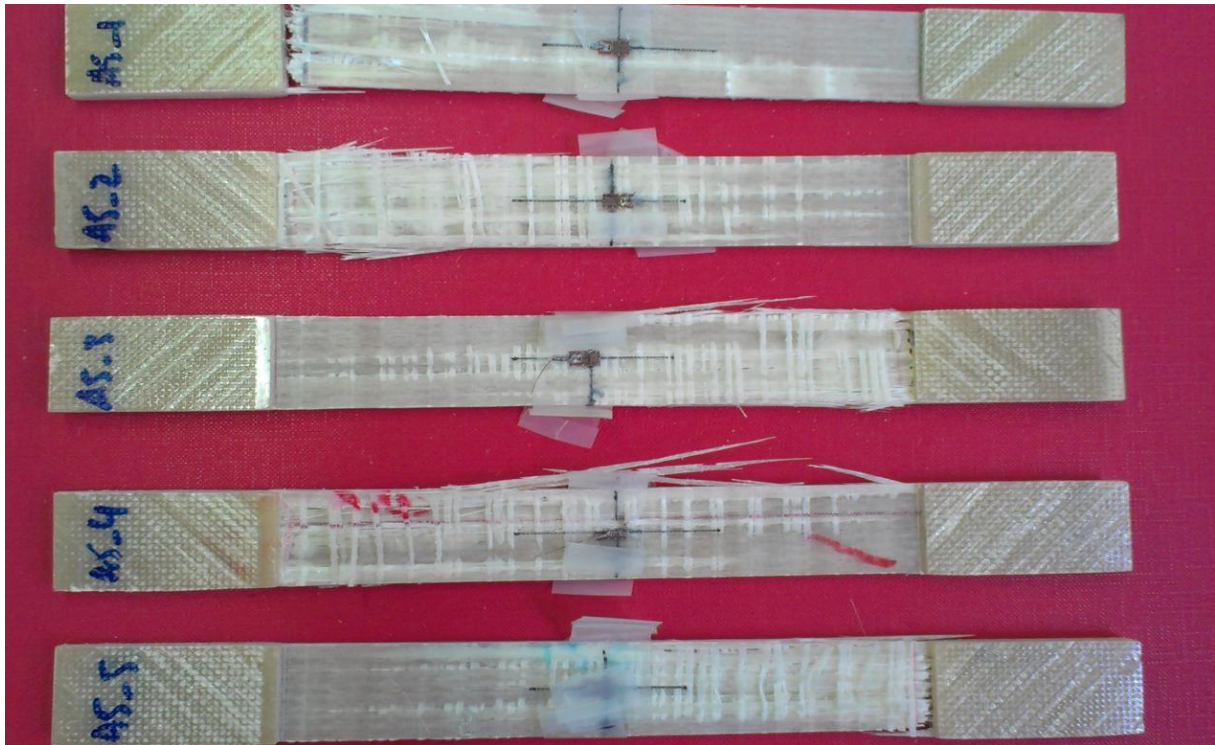
Εικόνα Α 2: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα Α1 (όψη Β)



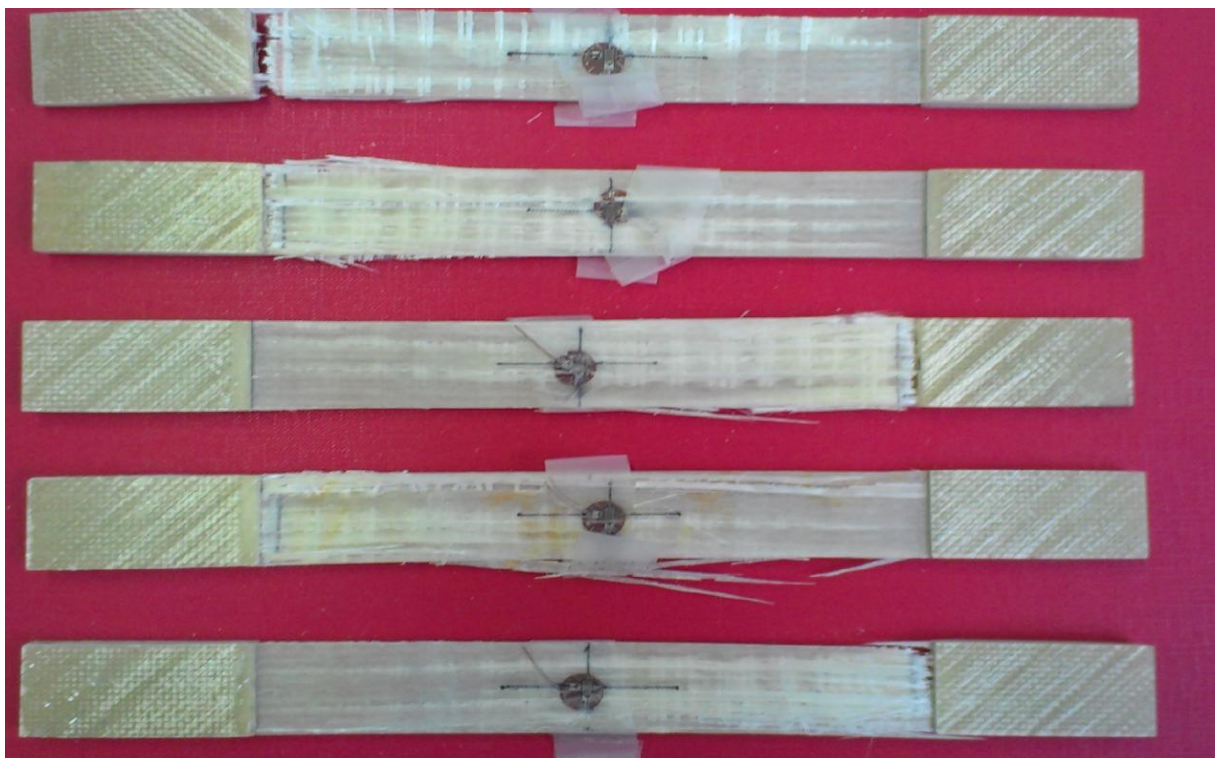
Εικόνα Α 3: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα Α2 (όψη Α)



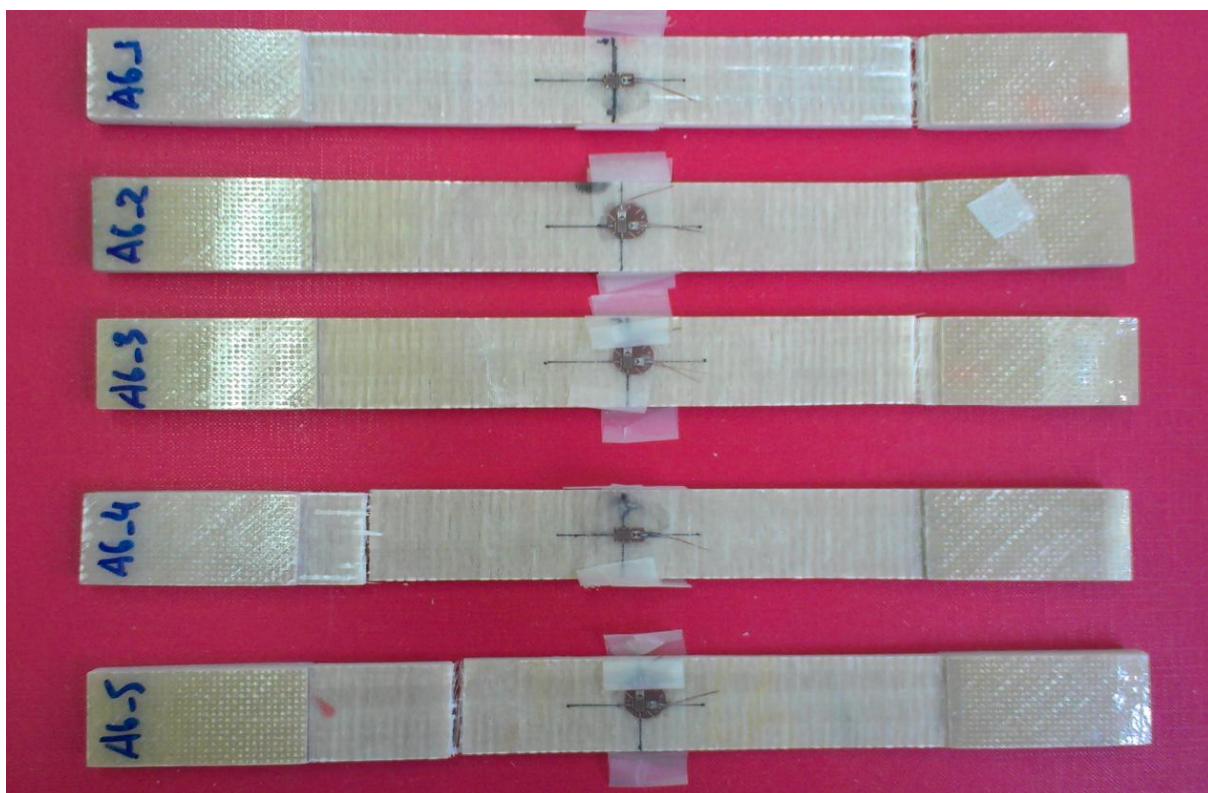
Εικόνα Α 4: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα Α2 (όψη Β)



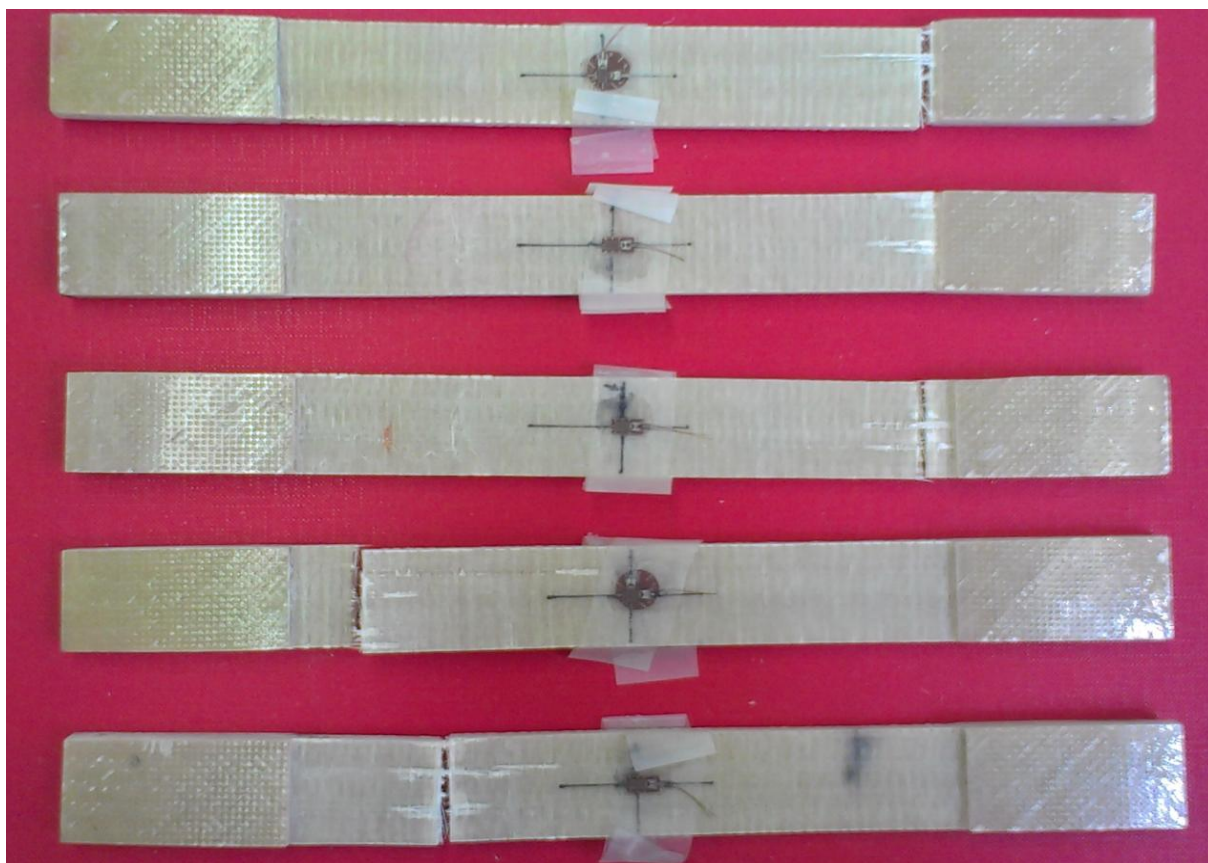
Εικόνα Α .5: Εφελκυστικά δοκίμια,Ομάδα Α5 (όψη Α)



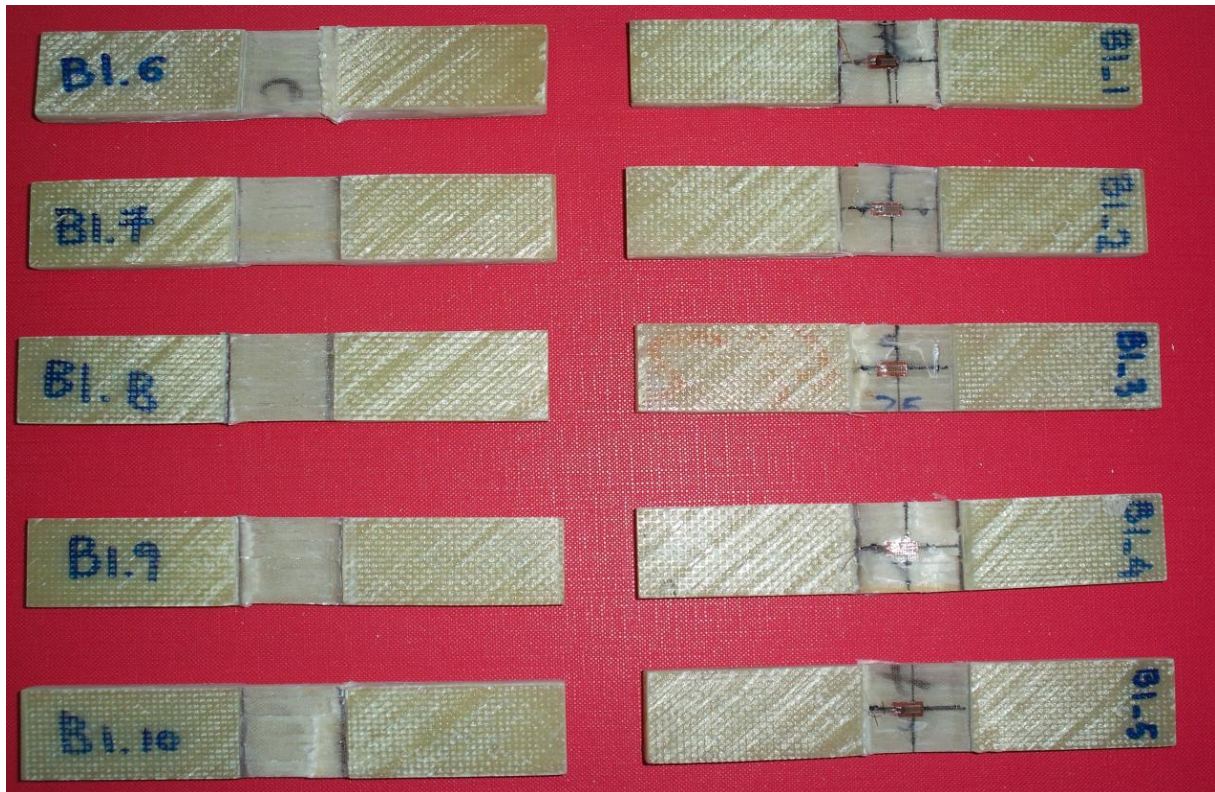
Εικόνα Α 6: Εφελκυστικά δοκίμια,Ομάδα Α5 (όψη Β)



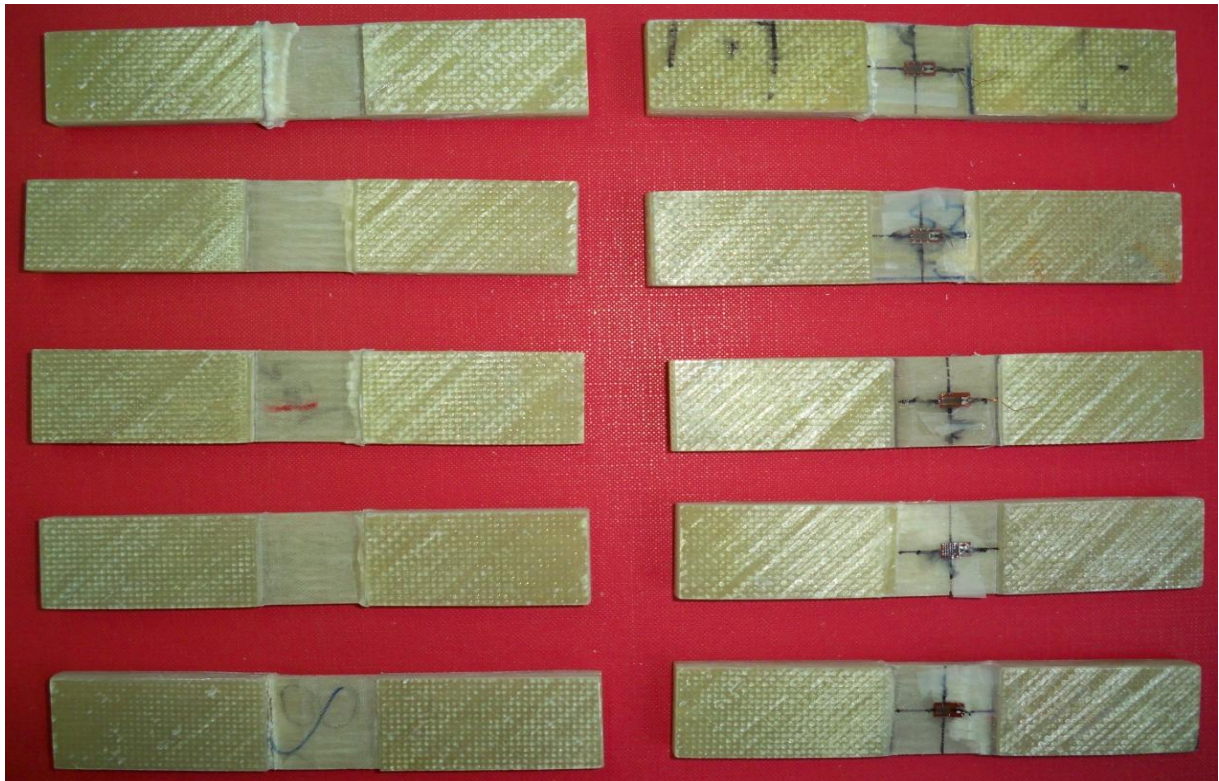
Εικόνα Α 7: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα Α6 (όψη Α)



Εικόνα A8: Εφελκυστικά δοκίμια, Ομάδα A6 (όψη Β)



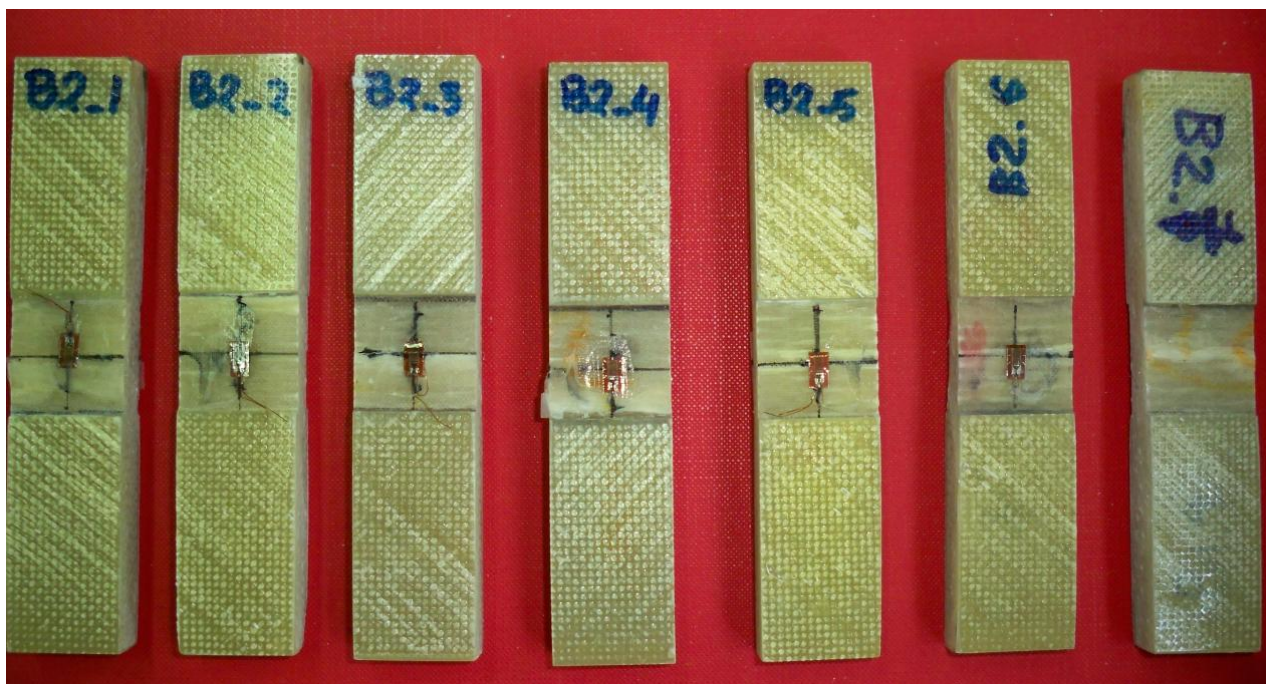
Εικόνα A 9: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B1 (όψη Α)



Εικόνα A 10: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B1 (όψη B)



Εικόνα A 11: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B1 (όψη C)



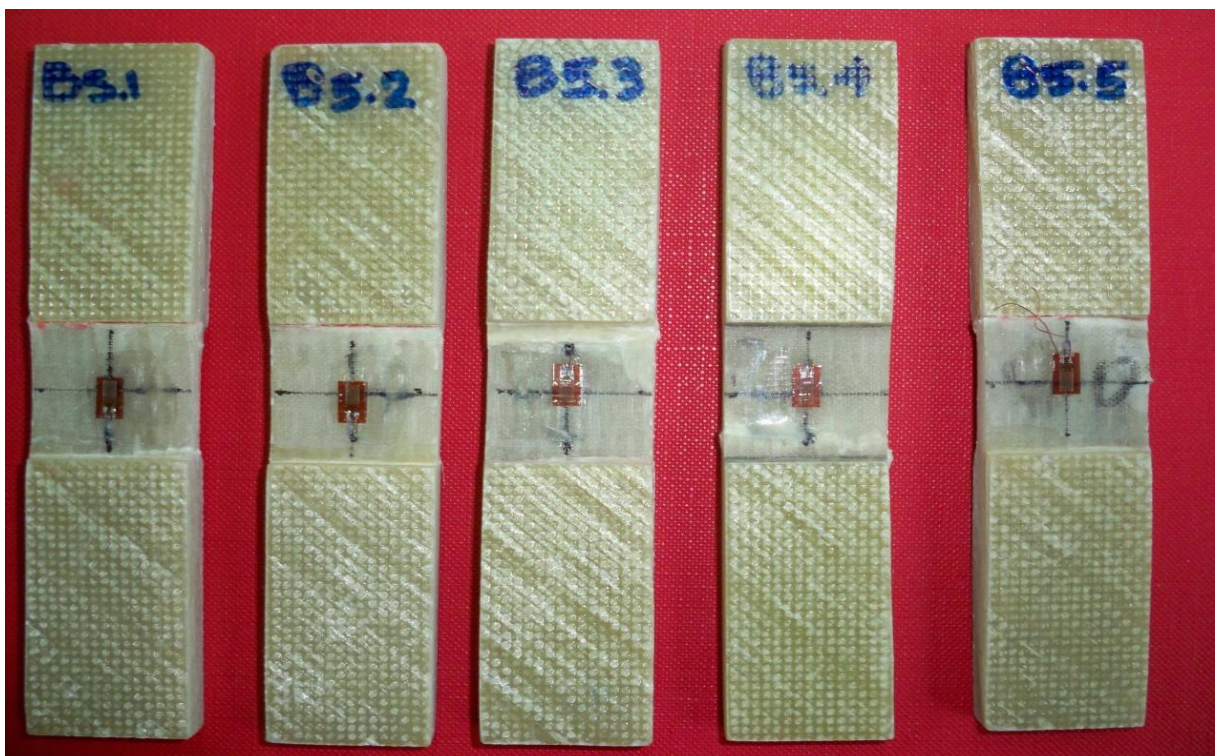
Εικόνα A 12: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B2 (όψη A)



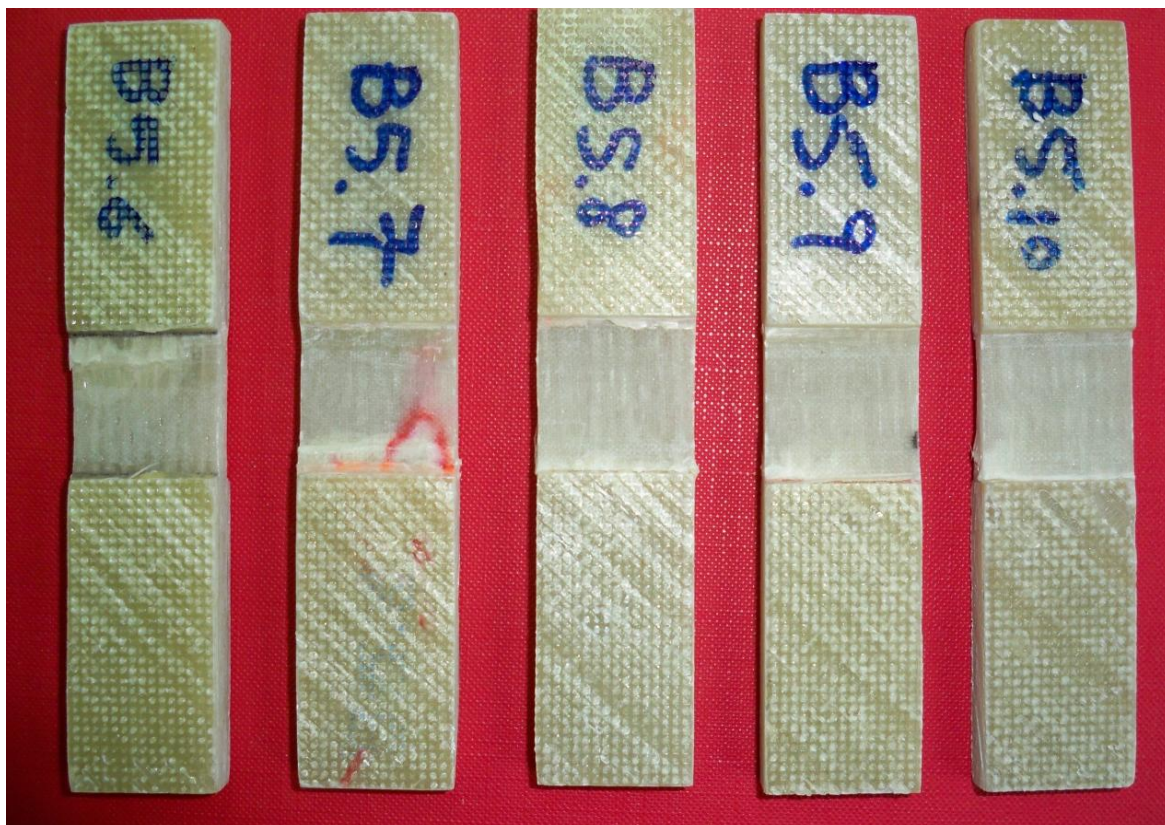
Εικόνα A 13: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B2 (όψη B)



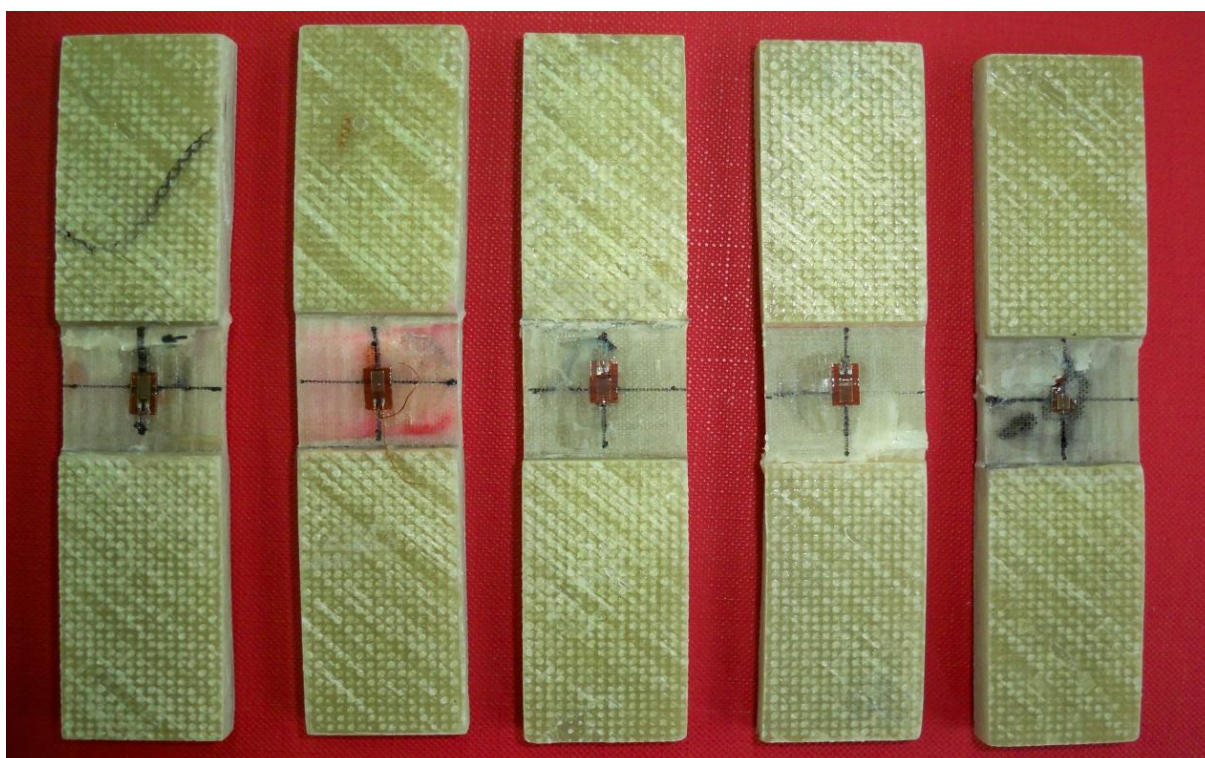
Εικόνα A 14: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B2 (όψη C)



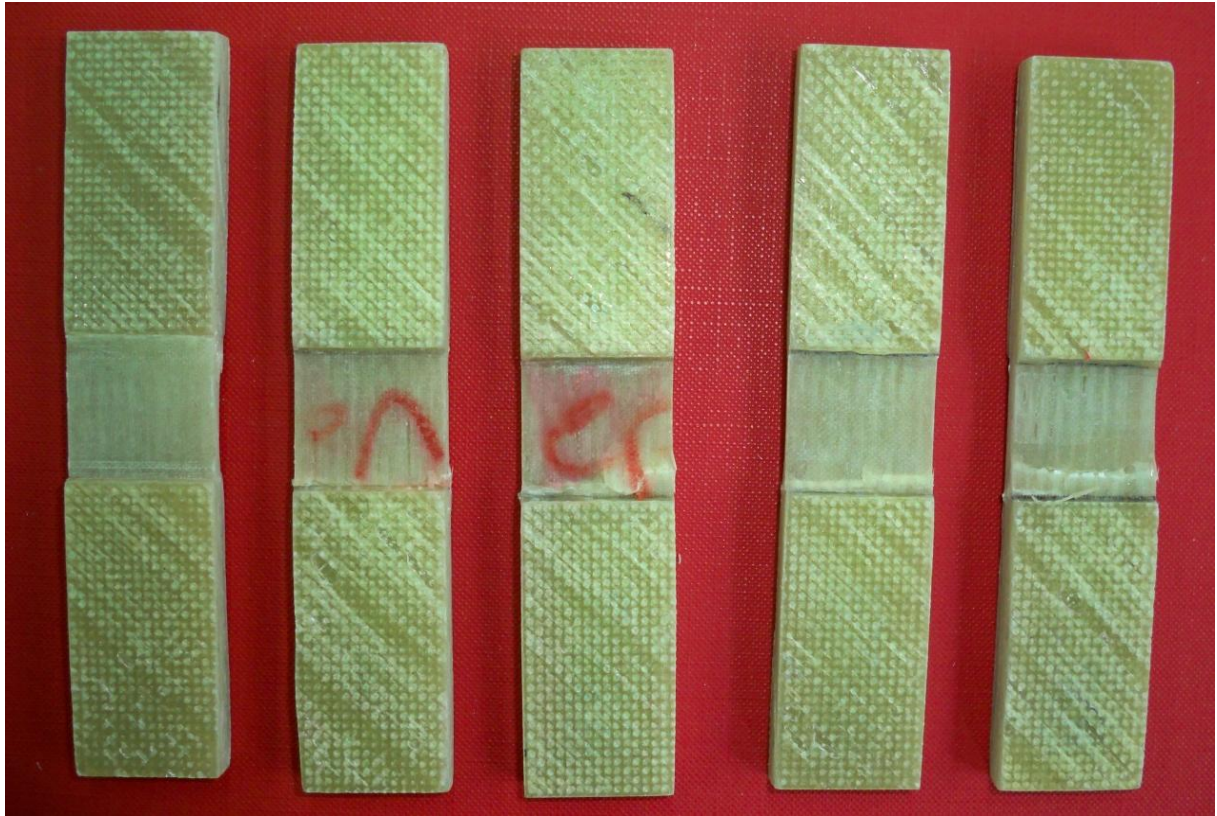
Εικόνα A 15: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B5, 1-5, (όψη A)



Εικόνα A 16: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B5, 6-10, (όψη A)



Εικόνα A 17: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B5, 1-5, (όψη B)



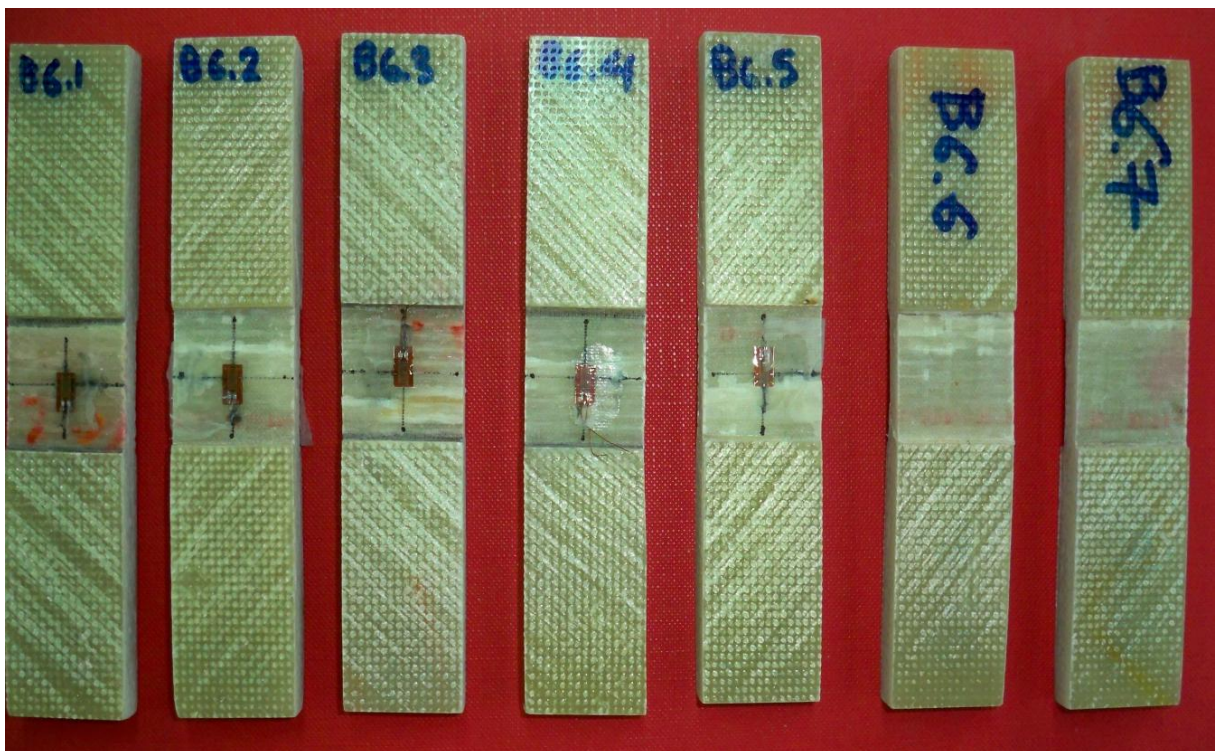
Εικόνα Α 18: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα Β5, 6-10 (όψη Β



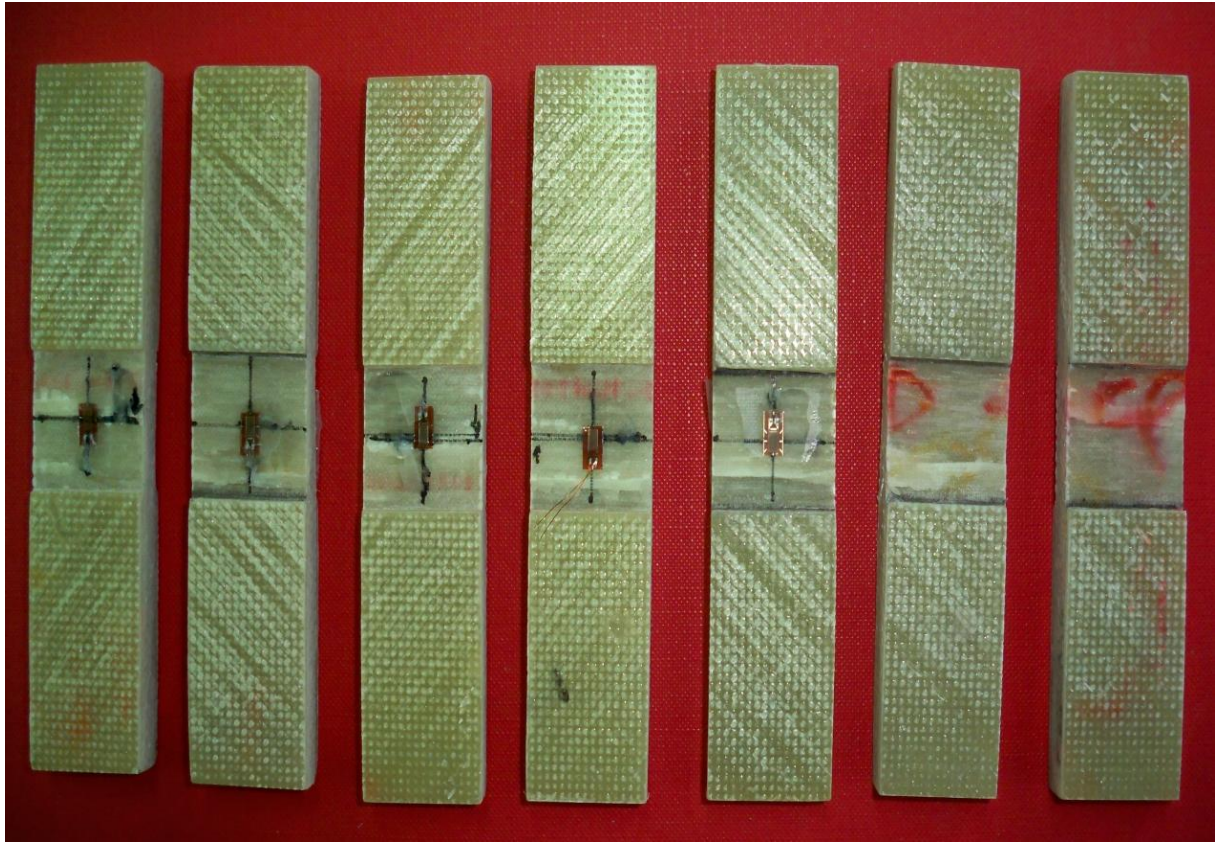
Εικόνα A 19: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B5, 1-5 (όψη C)



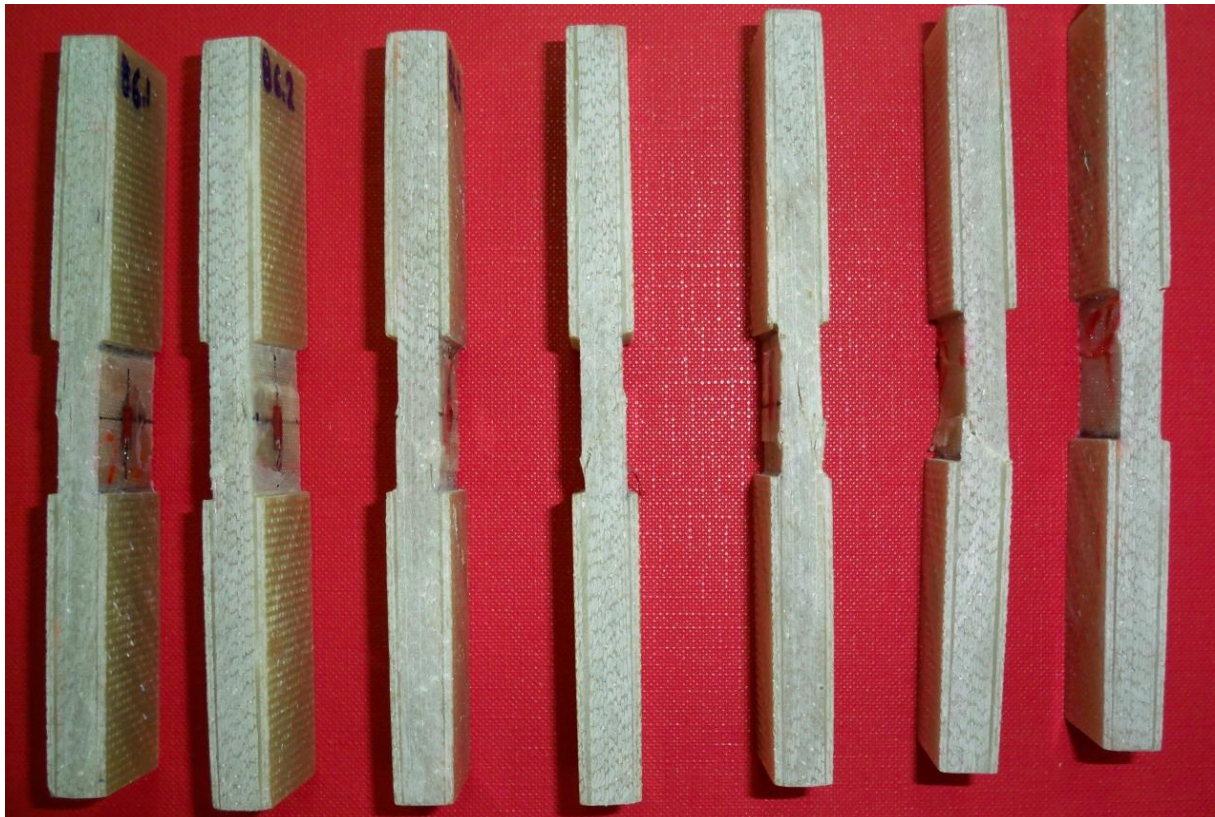
Εικόνα A 20: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα Β5, 6-10 (όψη C)



Εικόνα A21: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα Β6 (όψη Α)



Εικόνα A 22: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα Β6 (όψη Β)



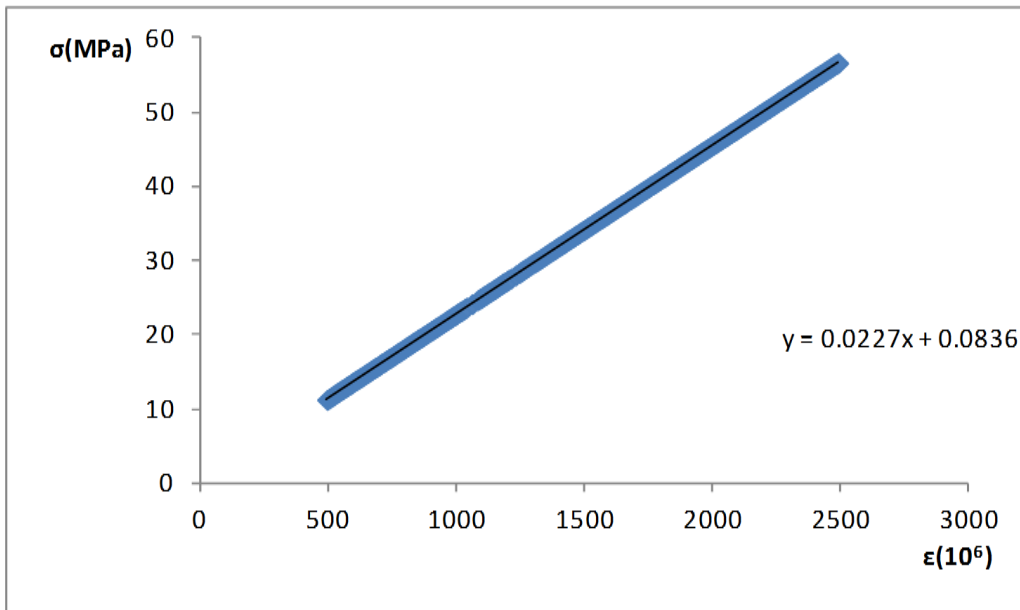
Εικόνα A 23: Θλιπτικά δοκίμια, Ομάδα B6 (όψη C)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

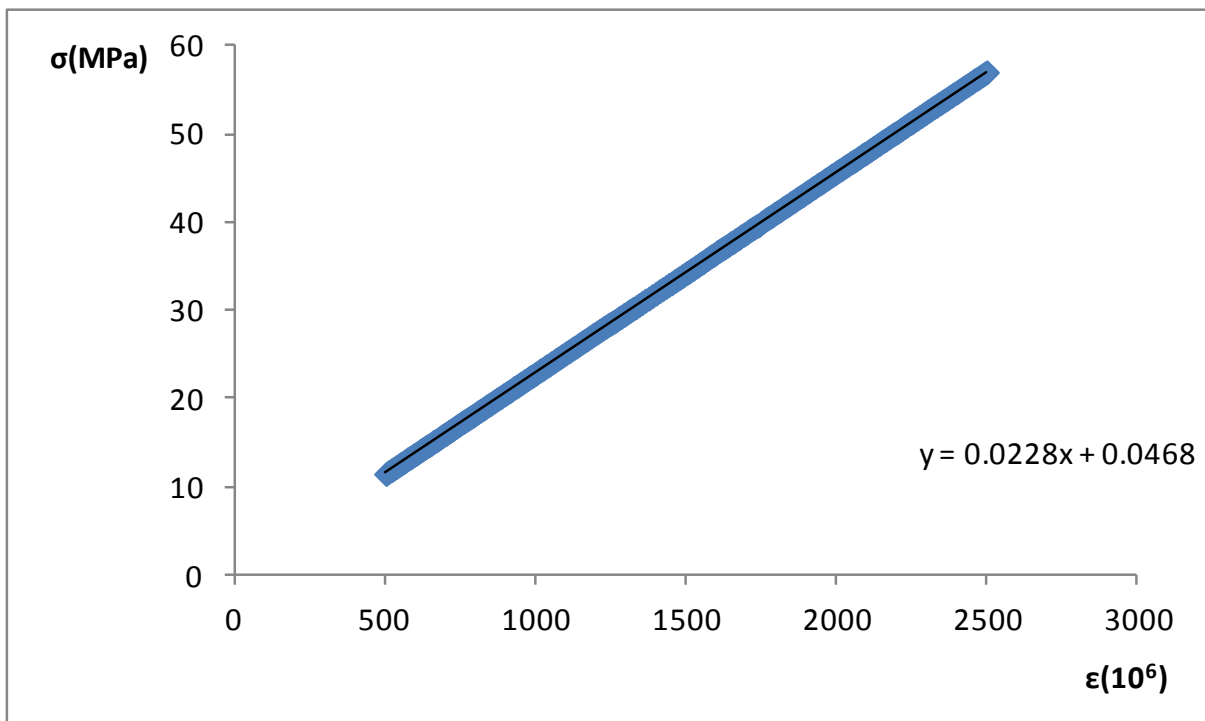
1. Οι ομάδες A αφορούν τα δοκίμια που καταπονούνται σε εφελκυσμό, ενώ οι ομάδες B τα δοκίμια που καταπονούνται σε θλίψη.
2. Οι όψεις A αφορούν την εμπρόσθια όψη των δοκιμίων, οι B την οπίσθια όψη και οι C την πλάγια όψη τους (της οποίας η εικόνα θεωρήθηκε απαραίτητη μόνο στα θλιπτικά δοκίμια, όπου τα αποτελέσματα της θραύσης είναι ευδιάκριτα).
3. Το σύνολο των υποομάδων που αφορά την ομάδα B5 και φέρουν την αρίθμηση (1-5) και (6-10) είναι διότι η συγκεκριμένη ομάδα μπήκε σε αυτές τις υποομάδες, ώστε να είναι πιο ευδιάκριτη η εικόνα και των δέκα. Στην συγκεκριμένη ομάδα χρειάστηκαν 10 δοκίμια συνολικά, όπως και στις άλλες ομάδες B, για να υπάρξουν τα απαραίτητα αποτελέσματα και αυτό γιατί πολλά δοκίμια υπέστησαν θραύση ή διότι

δεν προέκυψαν τα απαραίτητα αποτελέσματα, ώστε να μελετηθεί σωστά η πειραματική διαδικασία.

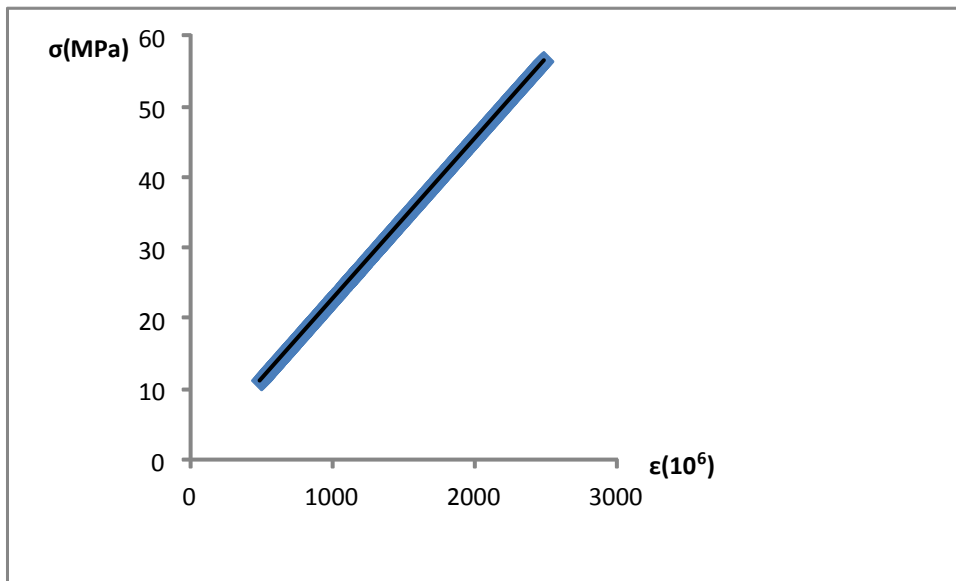
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'



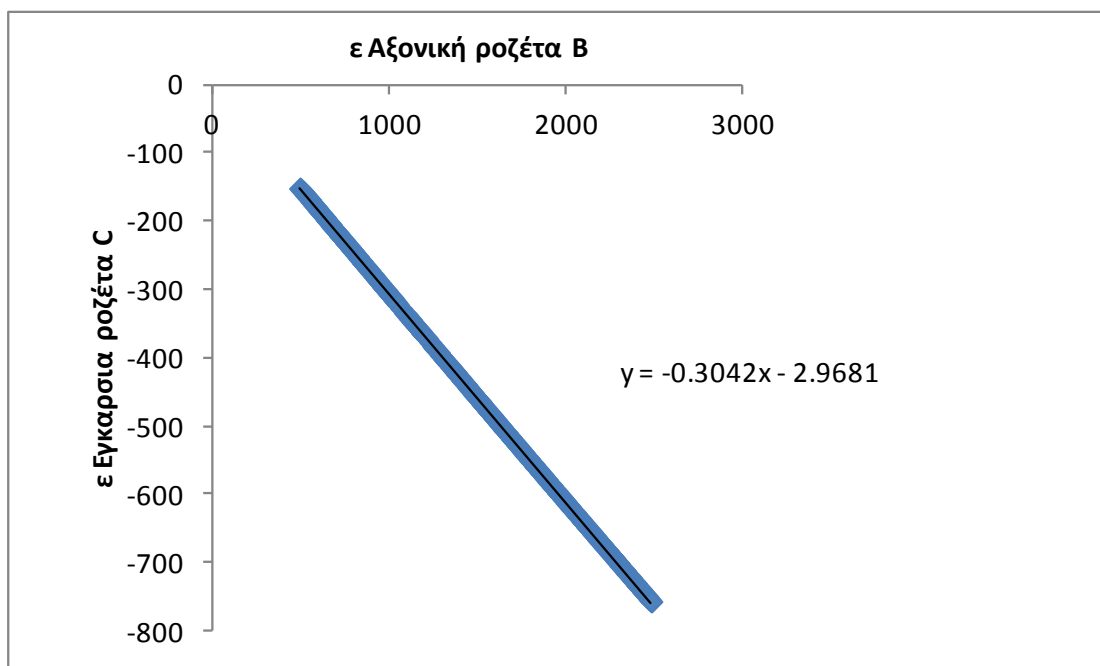
Εικόνα Β 4.1: Διάγραμμα σ - ϵ Α1-1



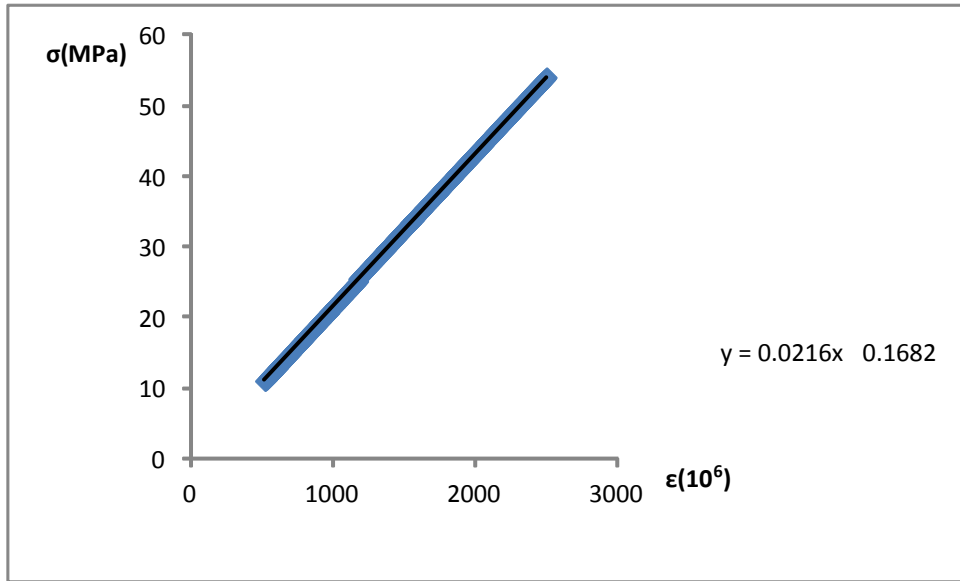
Εικόνα Β1.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α1-1



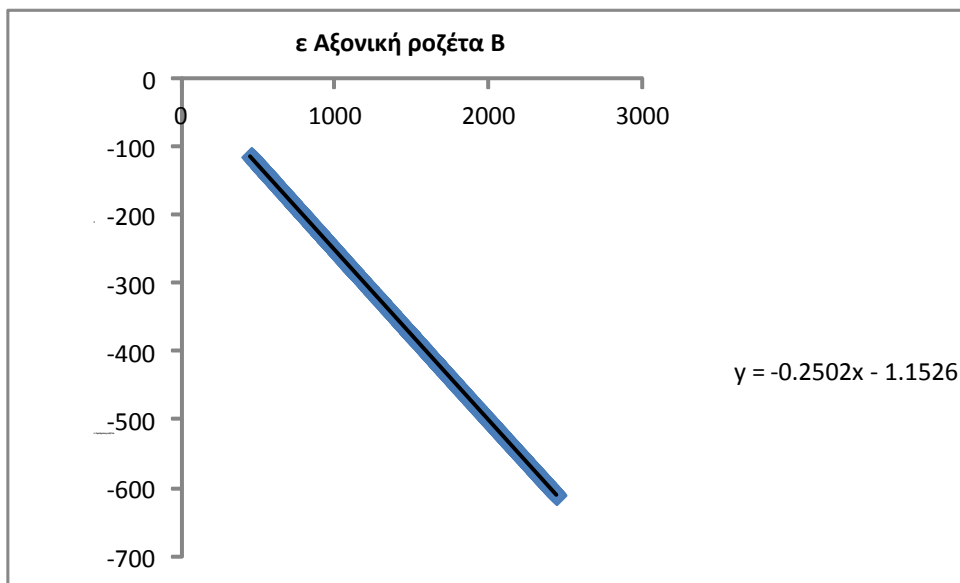
Εικόνα Β 1.3: Διάγραμμα σ - ϵ A1-2



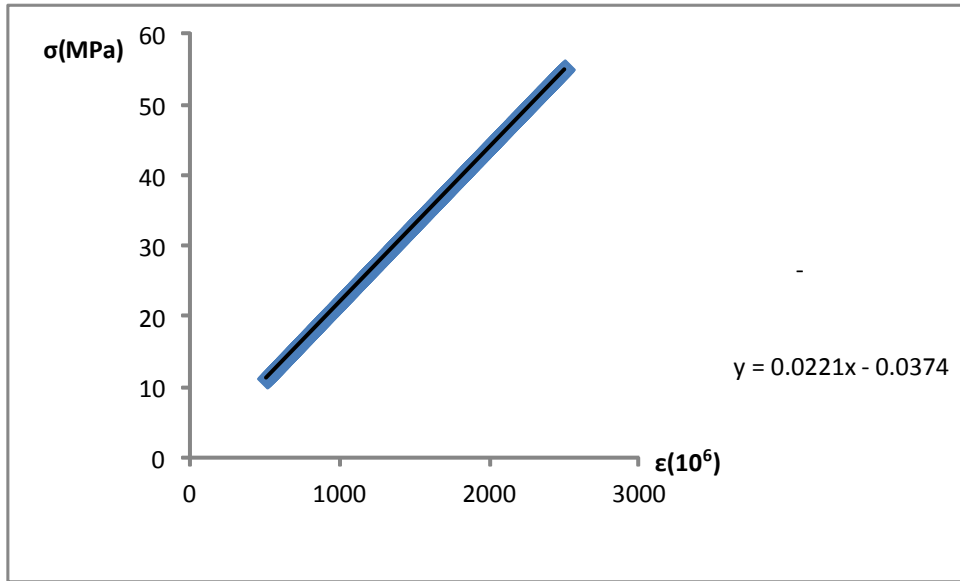
Εικόνα Β 1.4: Διάγραμμα παραμορφώσεων A1-2



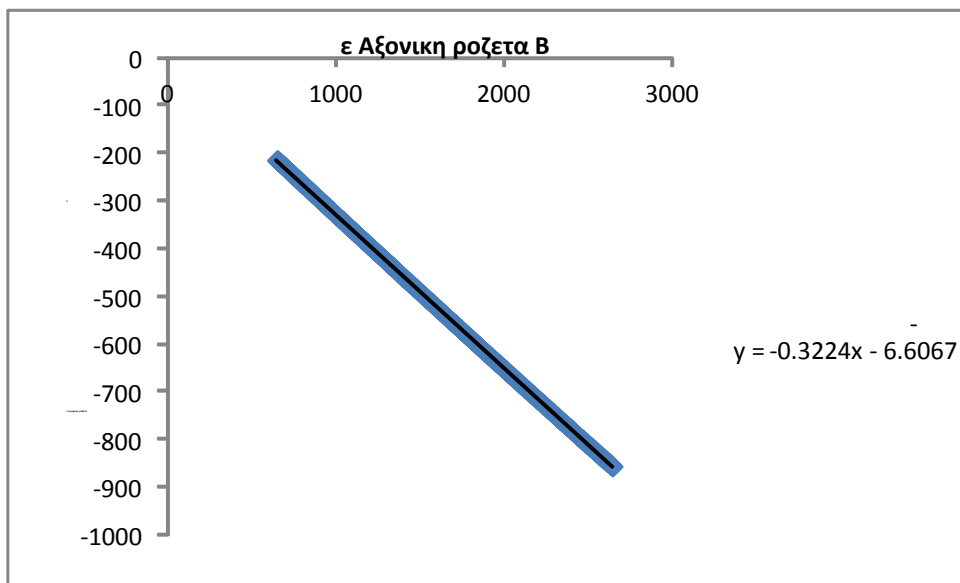
Εικόνα Β 1.5: Διάγραμμα σ - ϵ A1-3



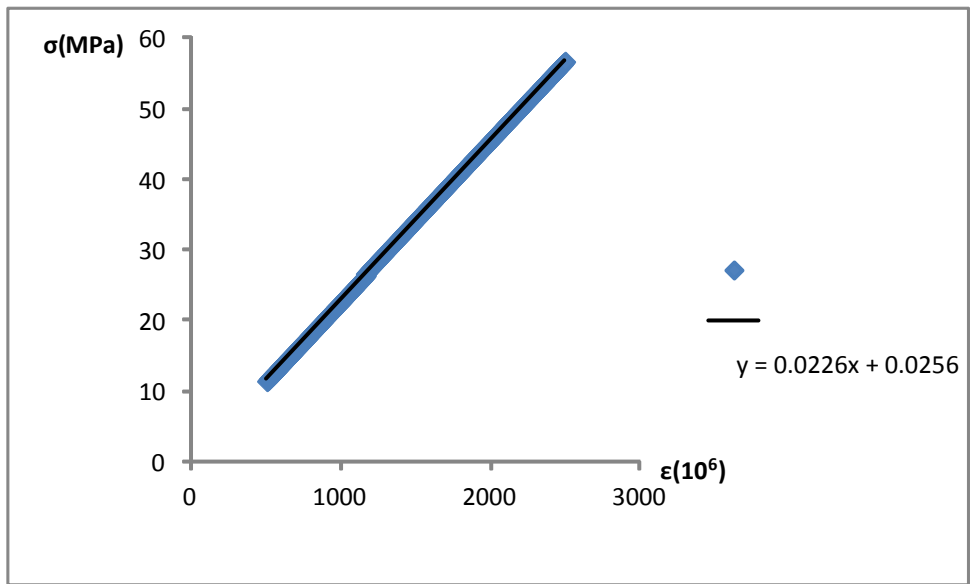
Εικόνα Β 1.6: Διάγραμμα παραμορφώσεων A1-3



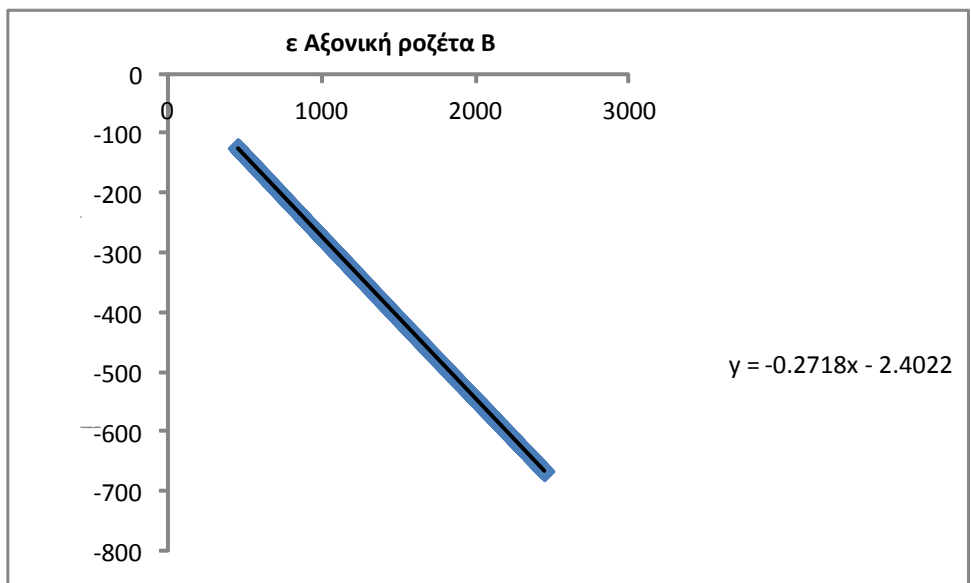
Εικόνα Β 1.7: Διάγραμμα σ-ε Α1-4



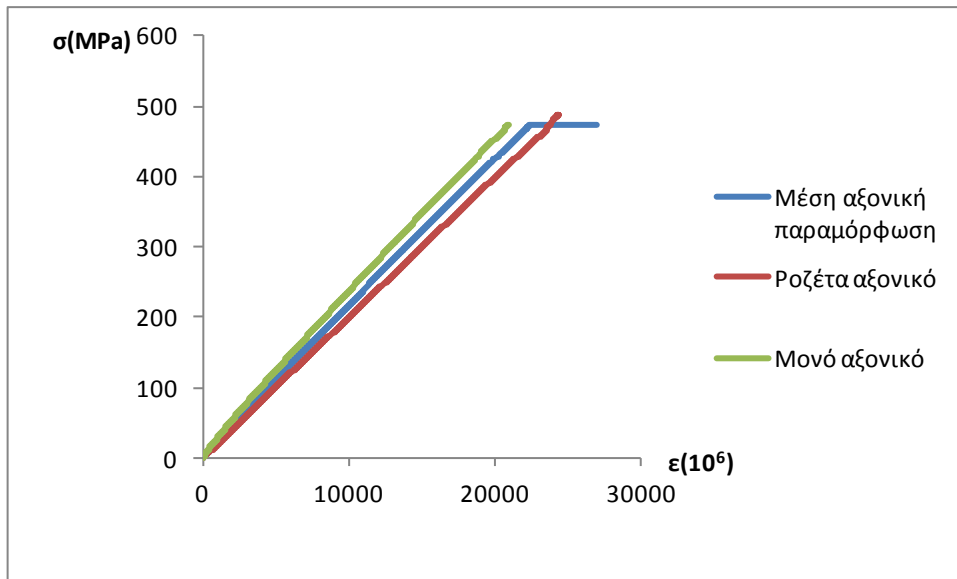
Εικόνα Β 1.8: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α1-4



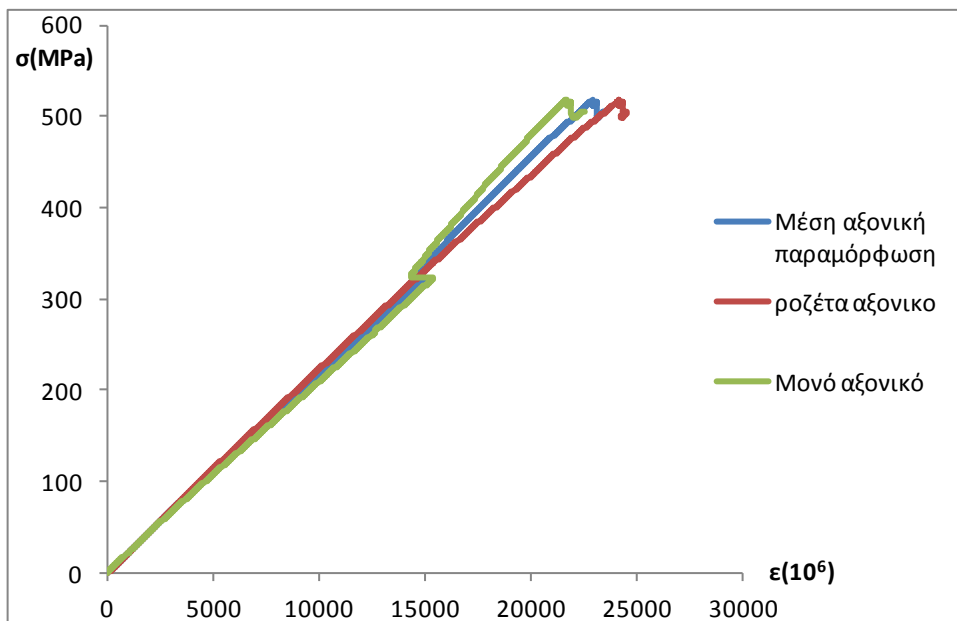
Εικόνα Β 1.9: Διάγραμμα σ-ε Α1-5



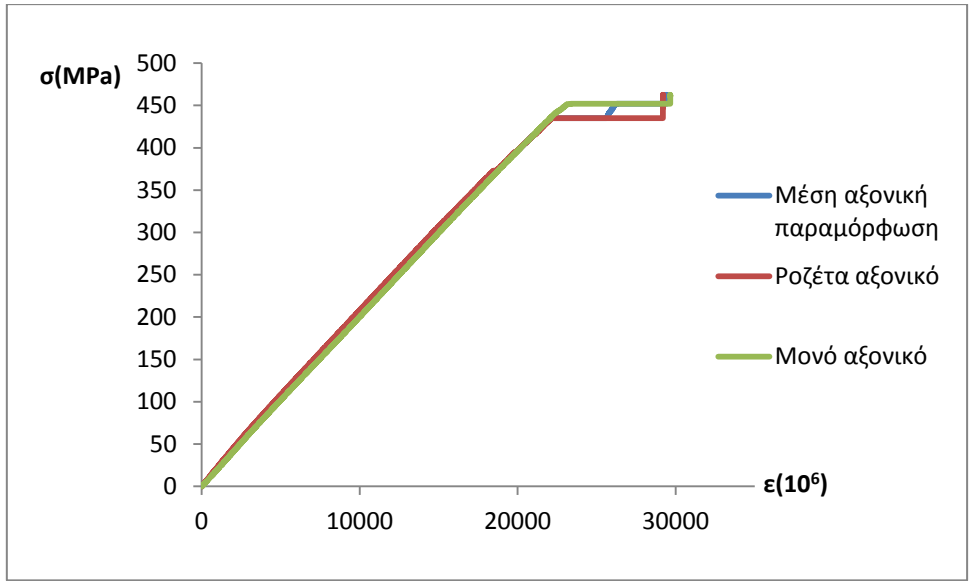
Εικόνα Β 1.10: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α1-5



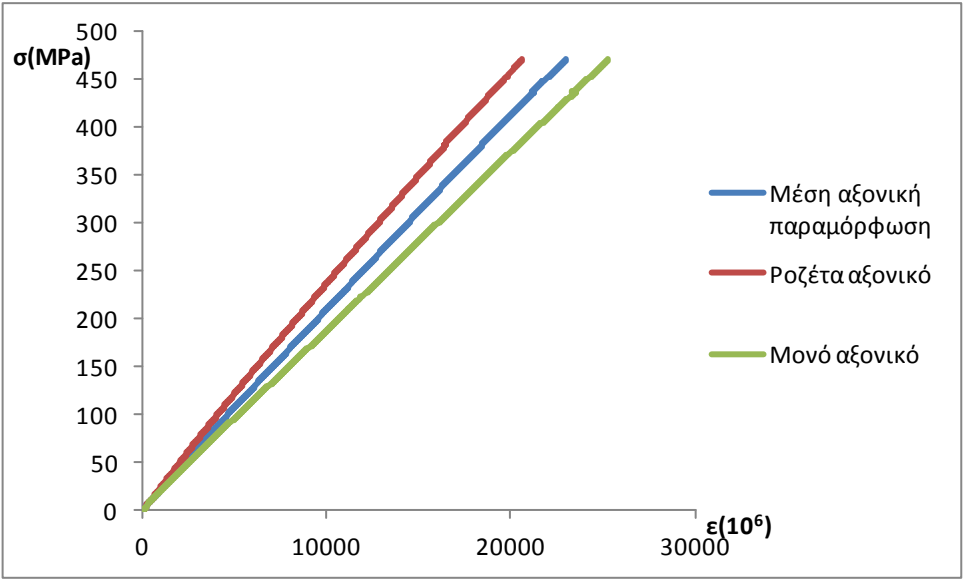
Εικόνα Β 1.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A1-1



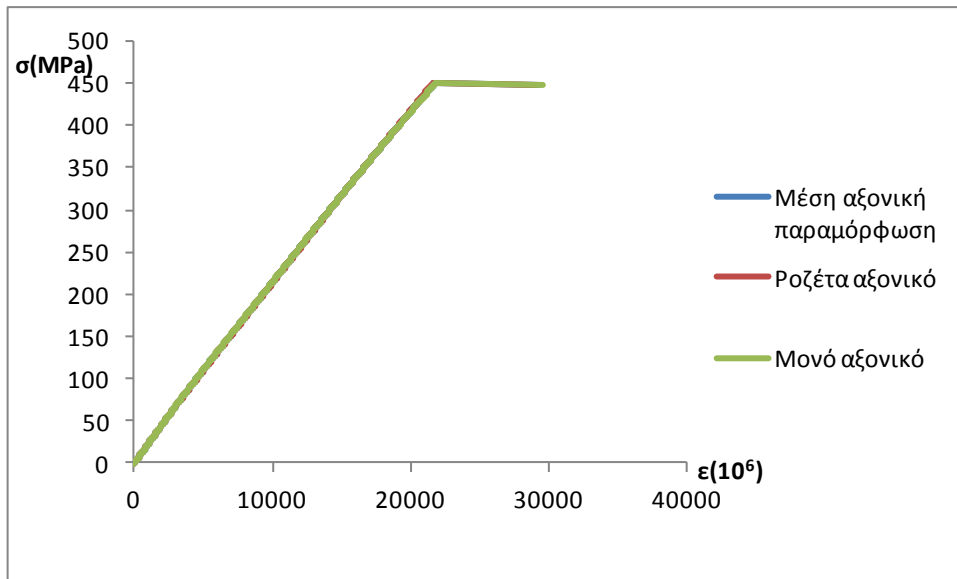
Εικόνα Β 1.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A1-2



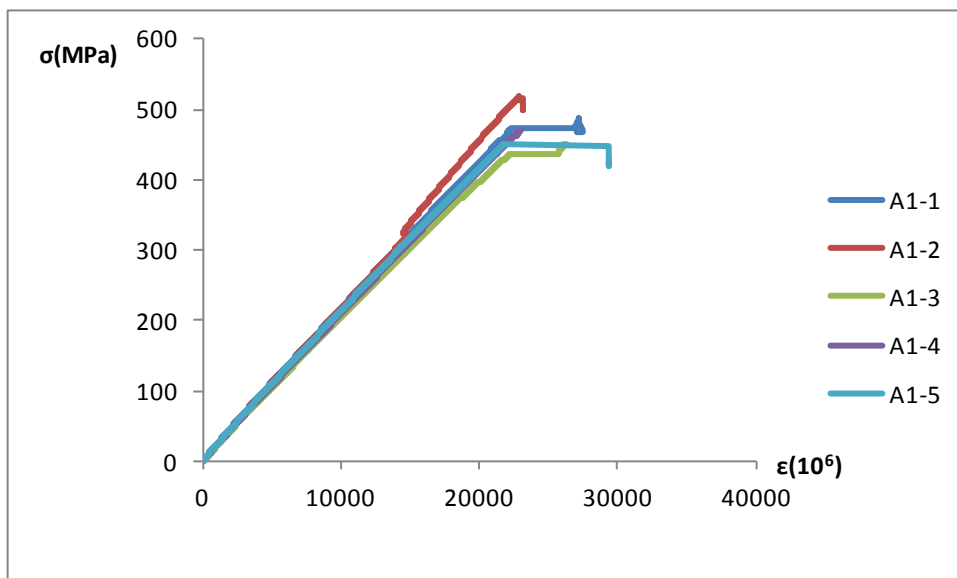
Εικόνα Β 1.13: Συνολικό διάγραμμα σ-ε Α1-3



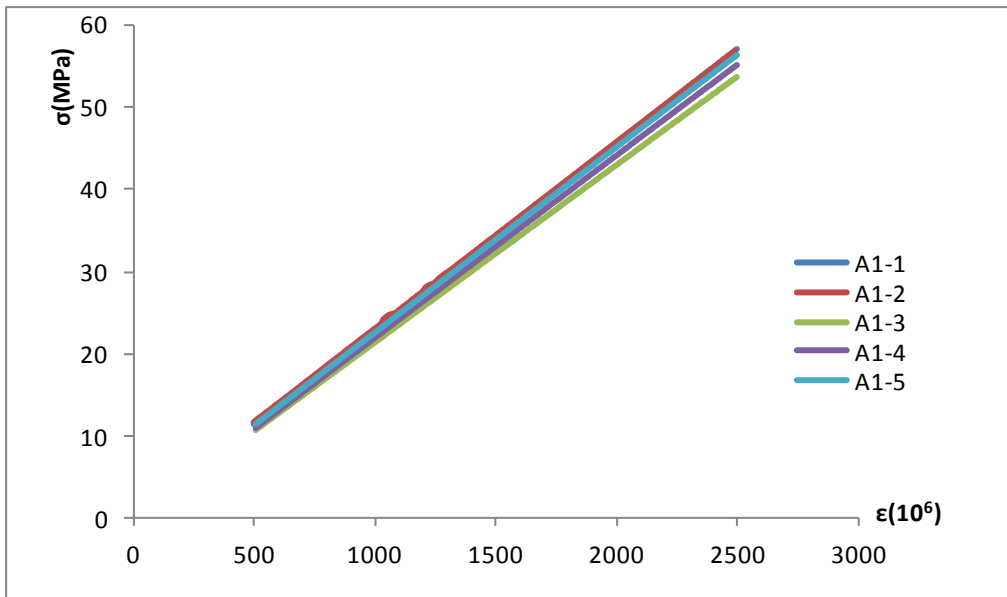
Εικόνα Β 1.14: Συνολικό διάγραμμα σ-ε Α1-4



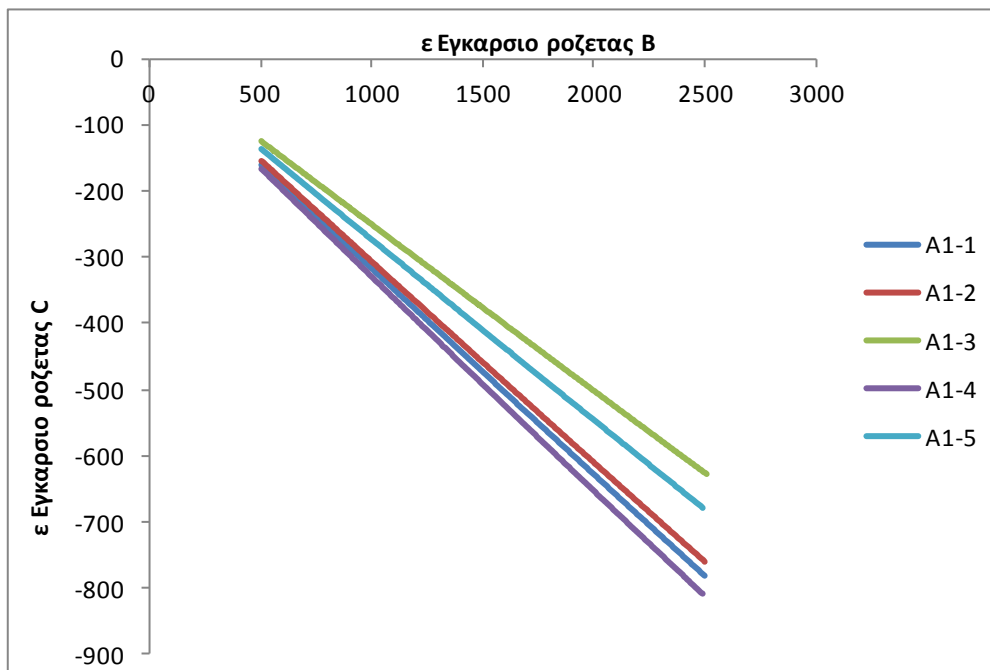
Εικόνα Β 1.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A1-5



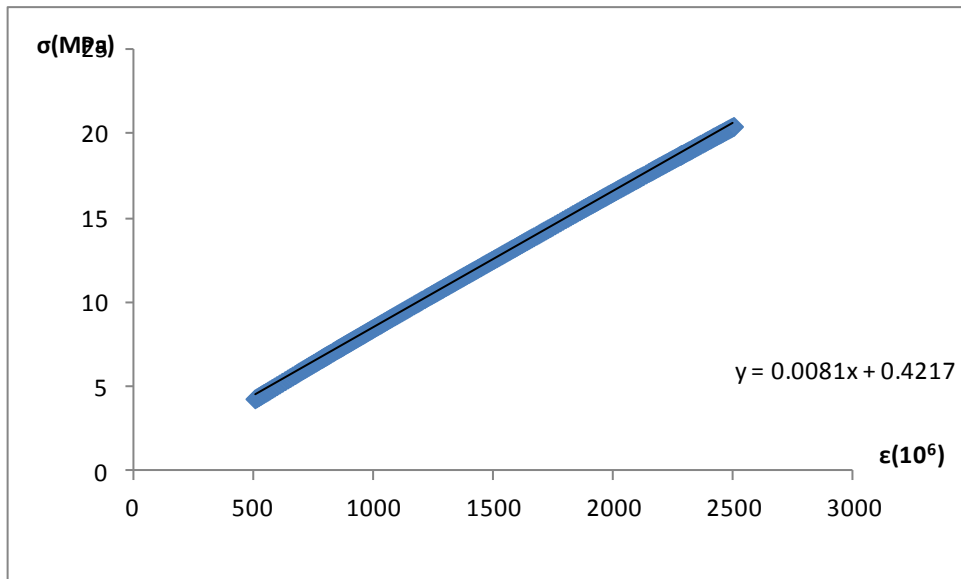
Εικόνα Β 1.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A1



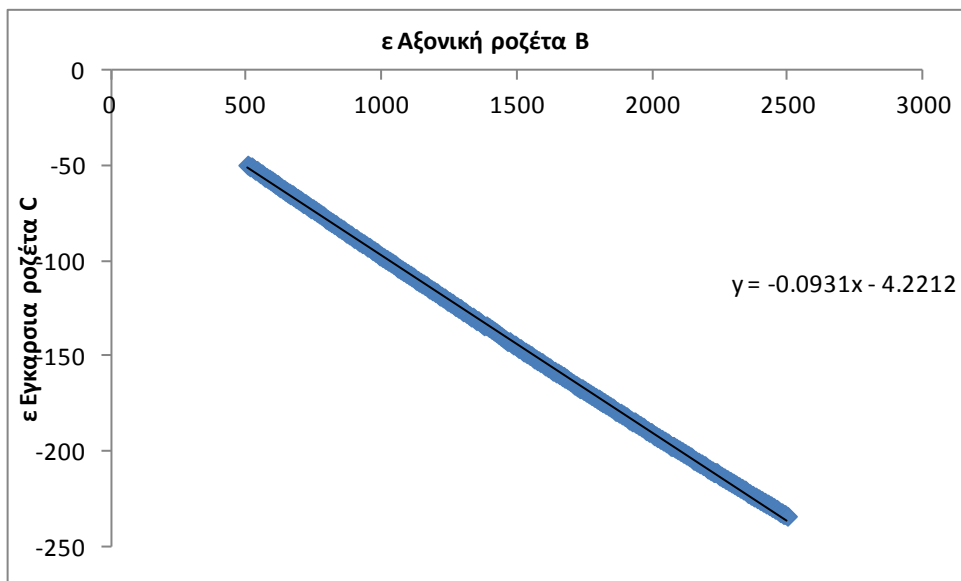
Εικόνα Β 1.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A1 (500-2500)



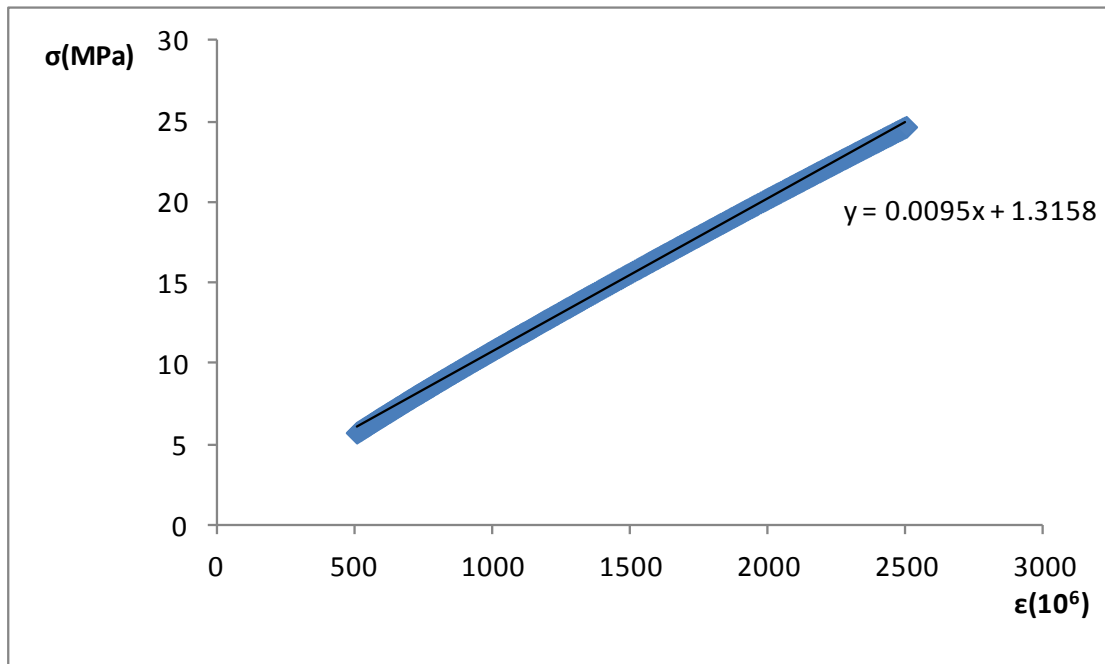
Εικόνα Β 1.18: Συνολικό διάγραμμα παραμορφώσεων A1



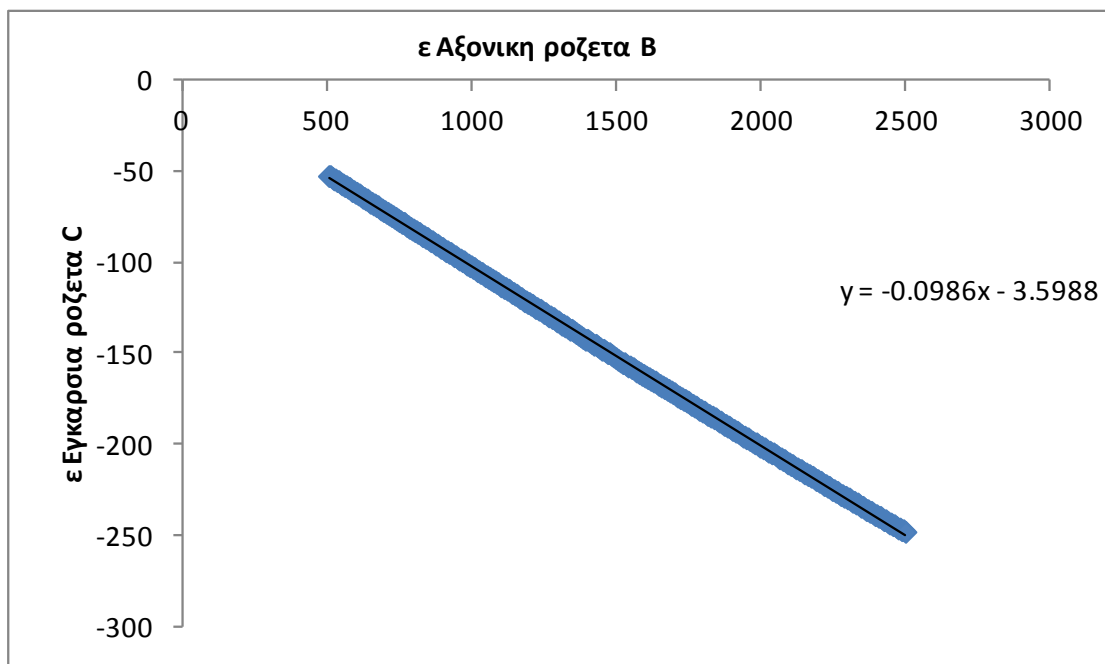
Εικόνα Β 2.1: Διάγραμμα σ-ε Α2-1



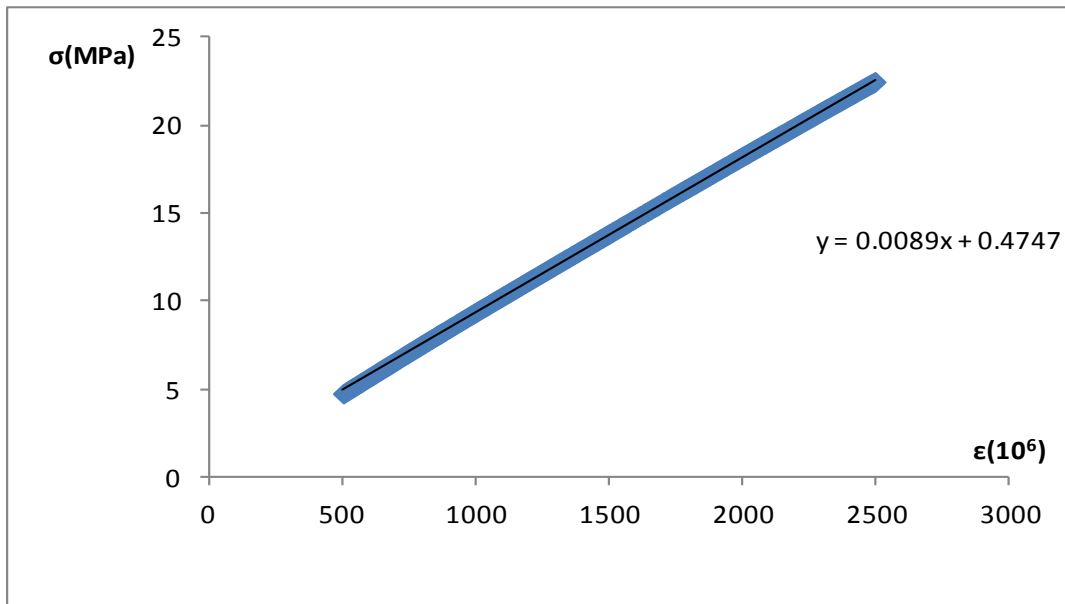
Εικόνα Β 2.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α2-1



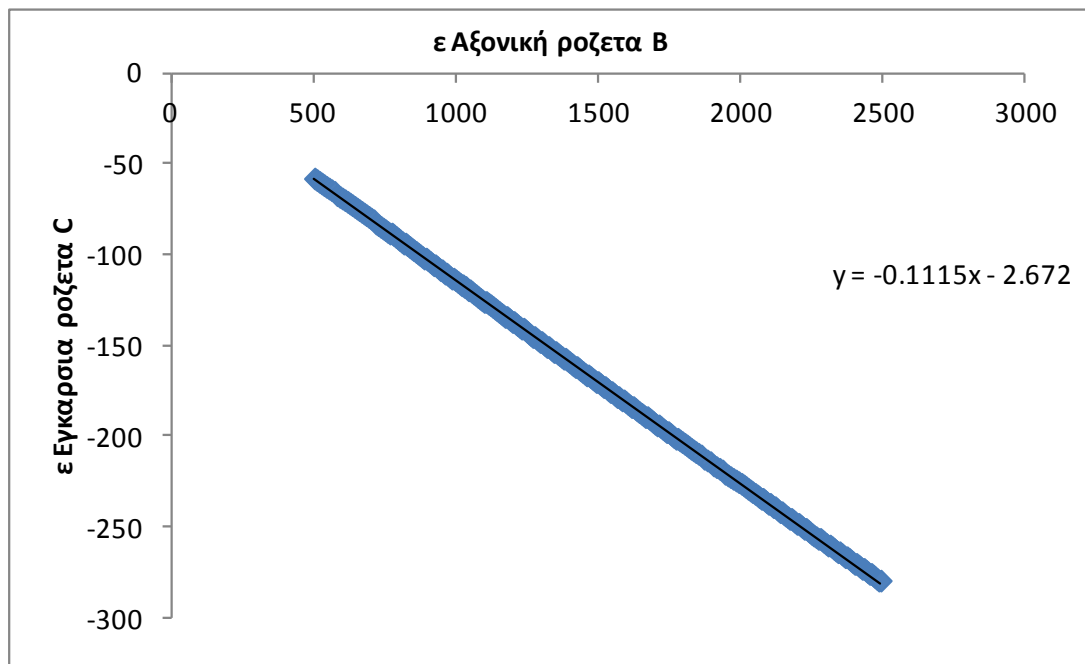
Εικόνα Β 2.3: Διάγραμμα σ-ε Α2-2



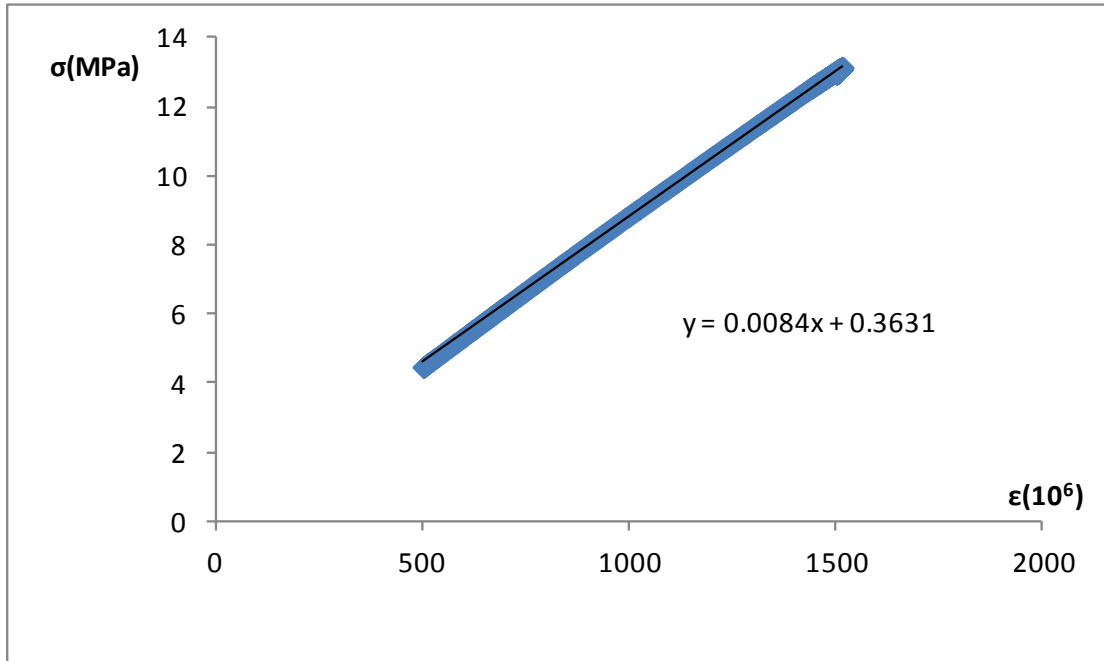
Εικόνα Β 2.4: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α2-2



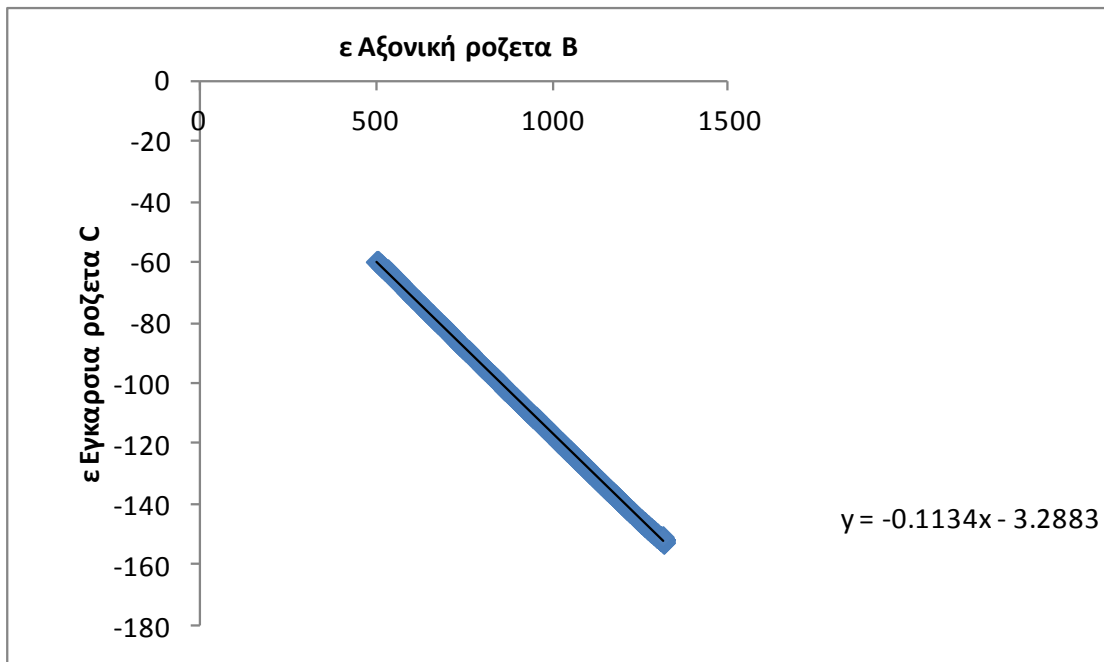
Εικόνα Β 2.5: Διάγραμμα σ - ϵ A2-3



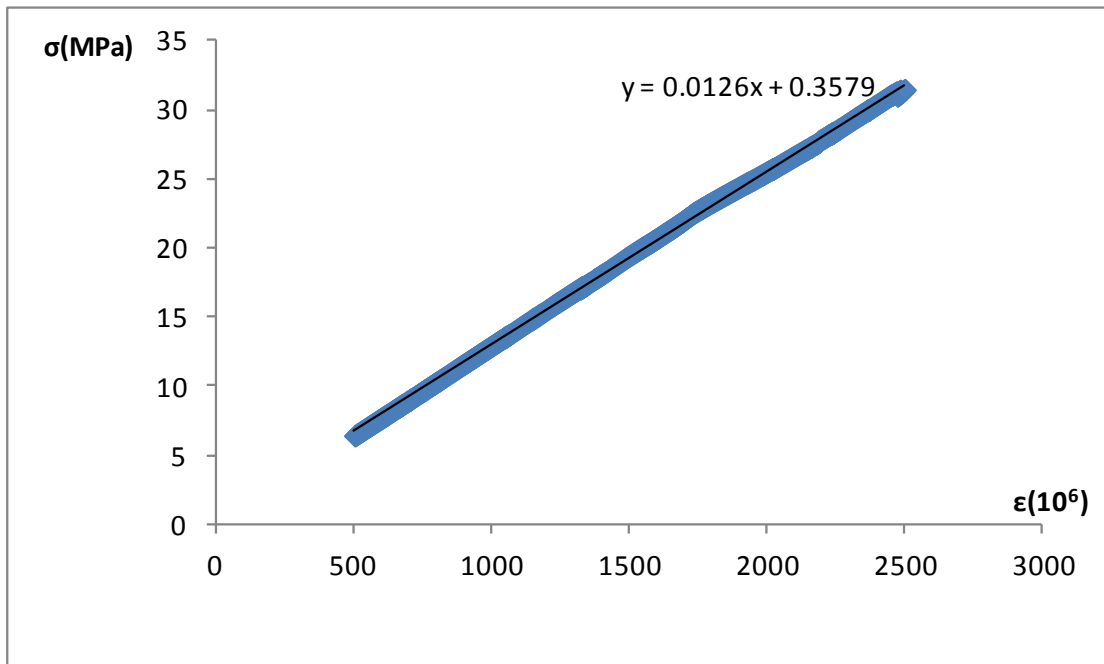
Εικόνα Β 2.6: Διάγραμμα παραμορφώσεων A2-3



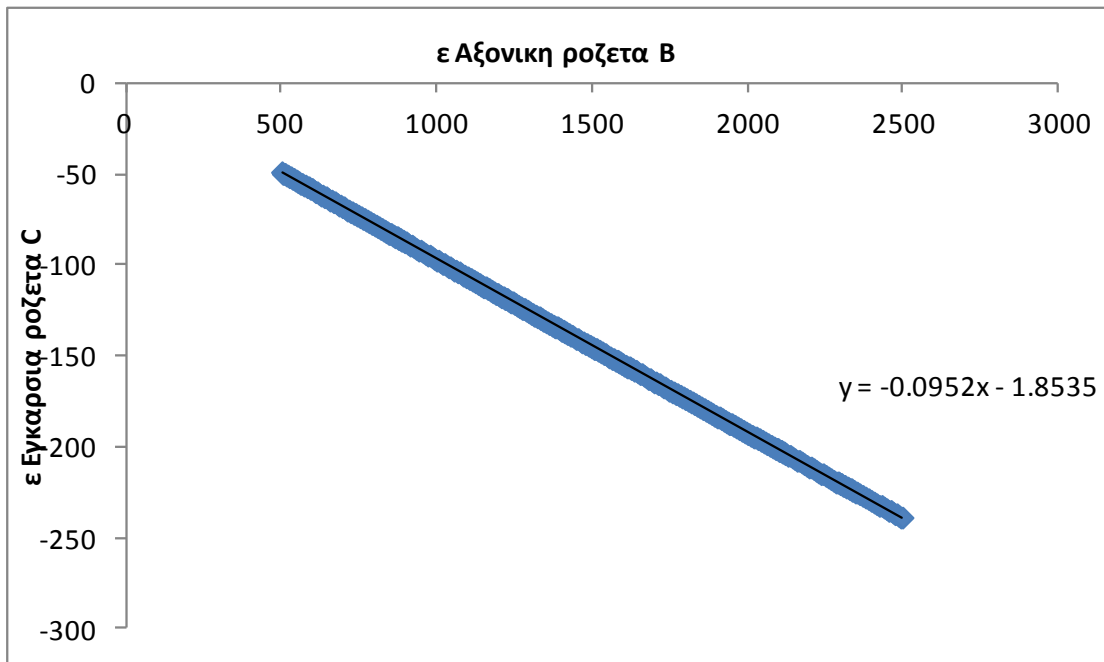
Εικόνα Β.2.7: Διάγραμμα σ - ϵ A2-5



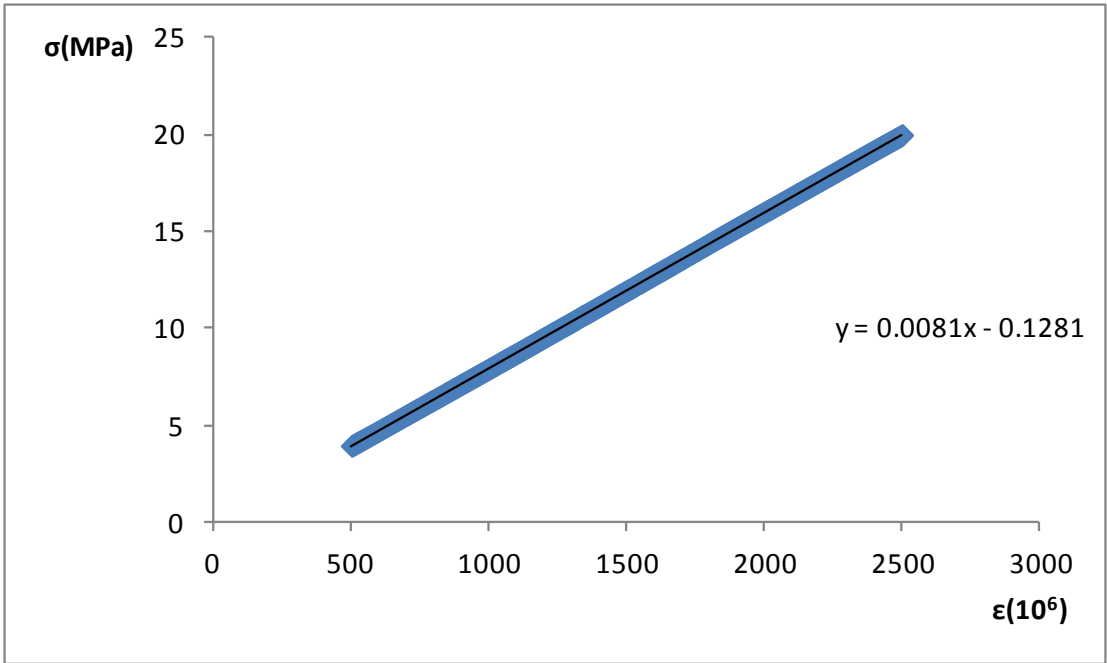
Εικόνα Β 2.8: Διάγραμμα παραμορφώσεων A2-5



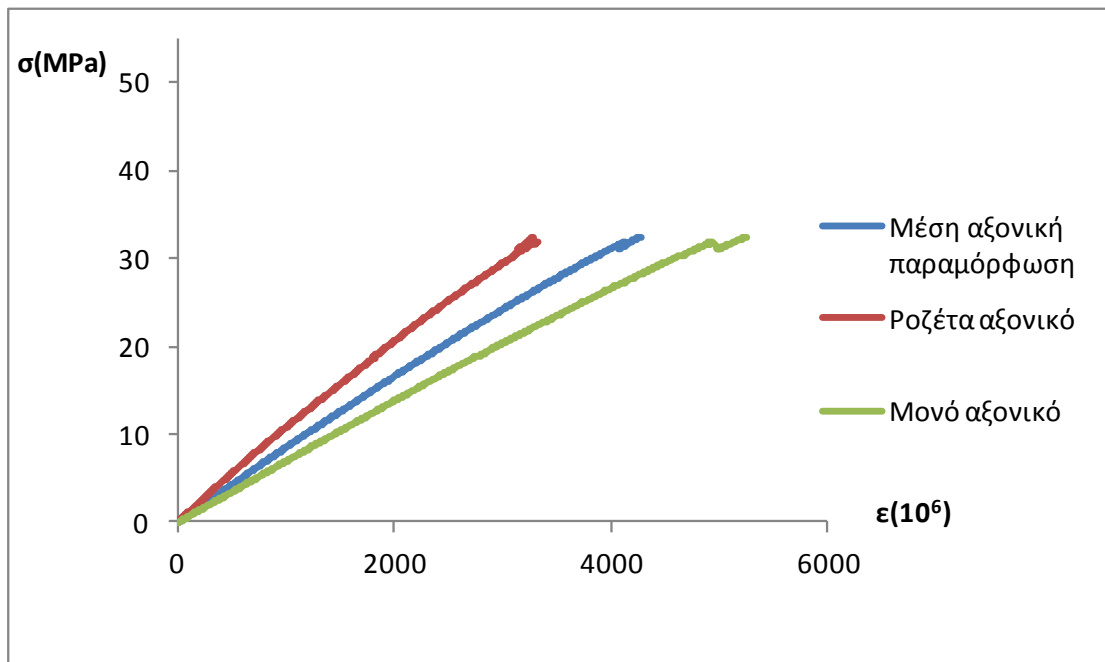
Εικόνα Β 2.8: Διάγραμμα σ-ε Α2-6



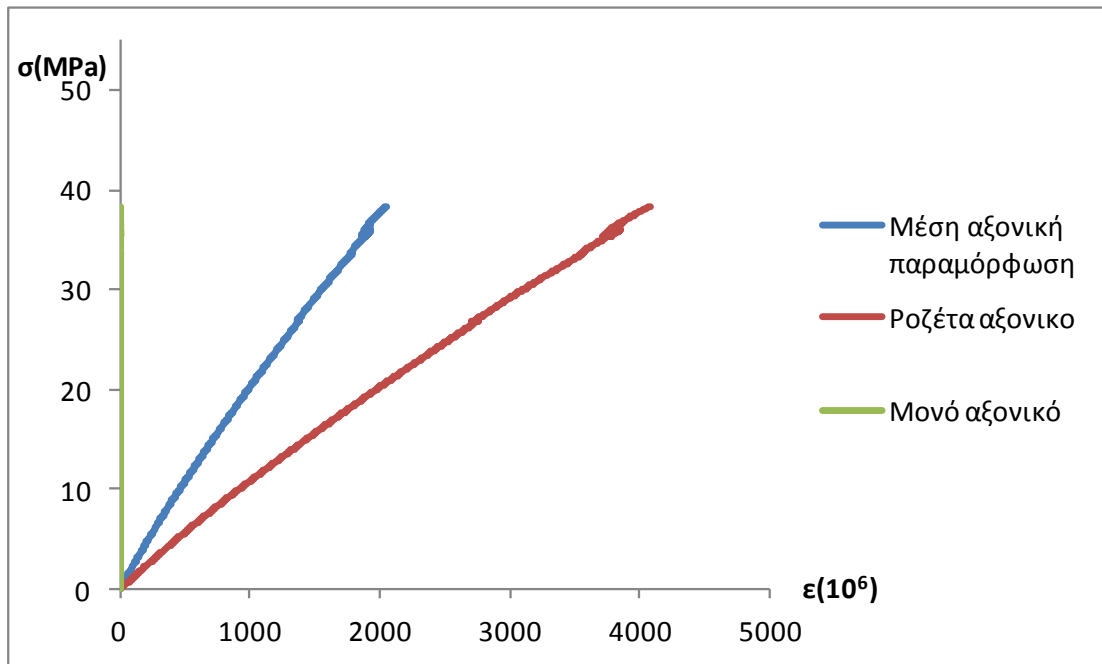
Εικόνα Β 2.9: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α2-6



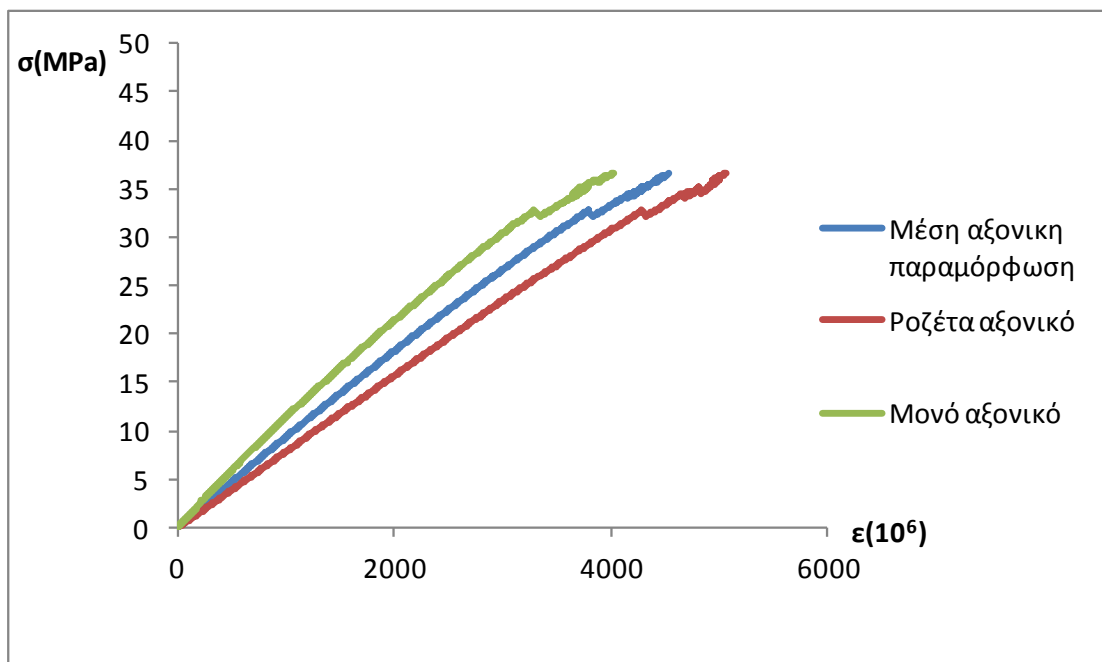
Εικόνα Β 2.10: Διάγραμμα σ-ε Α2-7



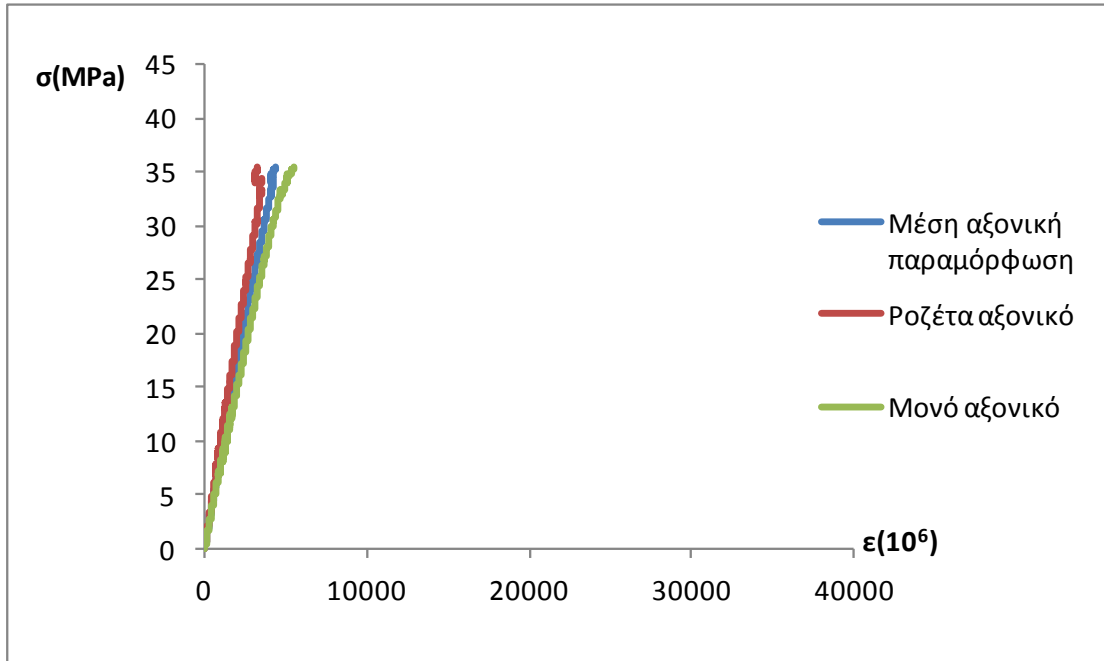
Εικόνα Β 2.11: Συνολικό διάγραμμα σ-ε Α2-1



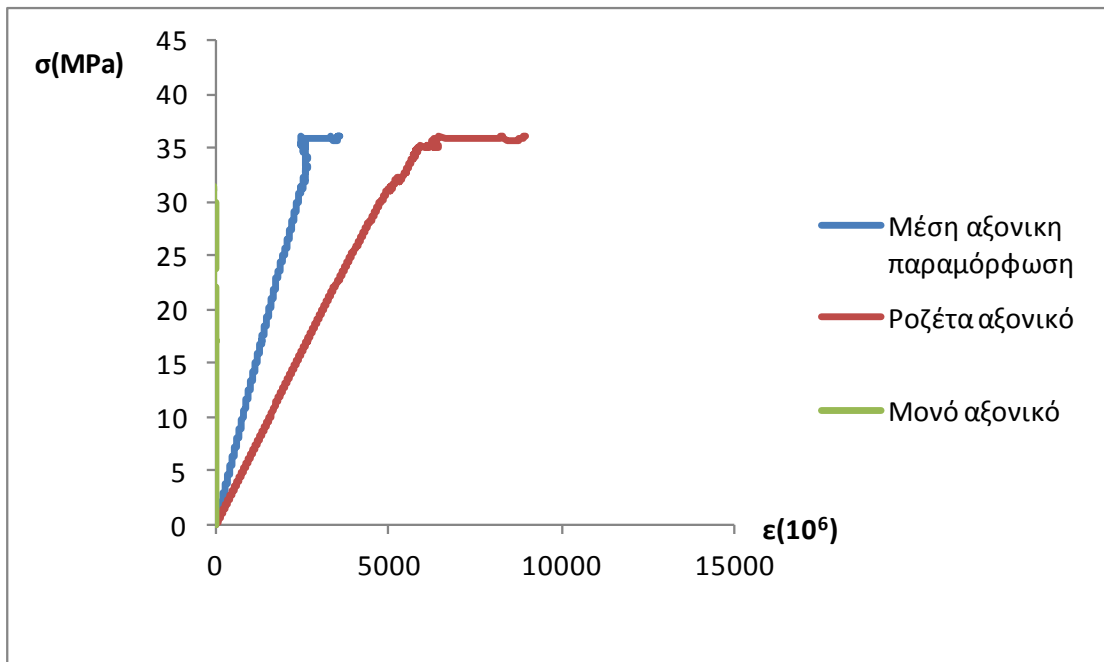
Εικόνα Β 2.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A2-2



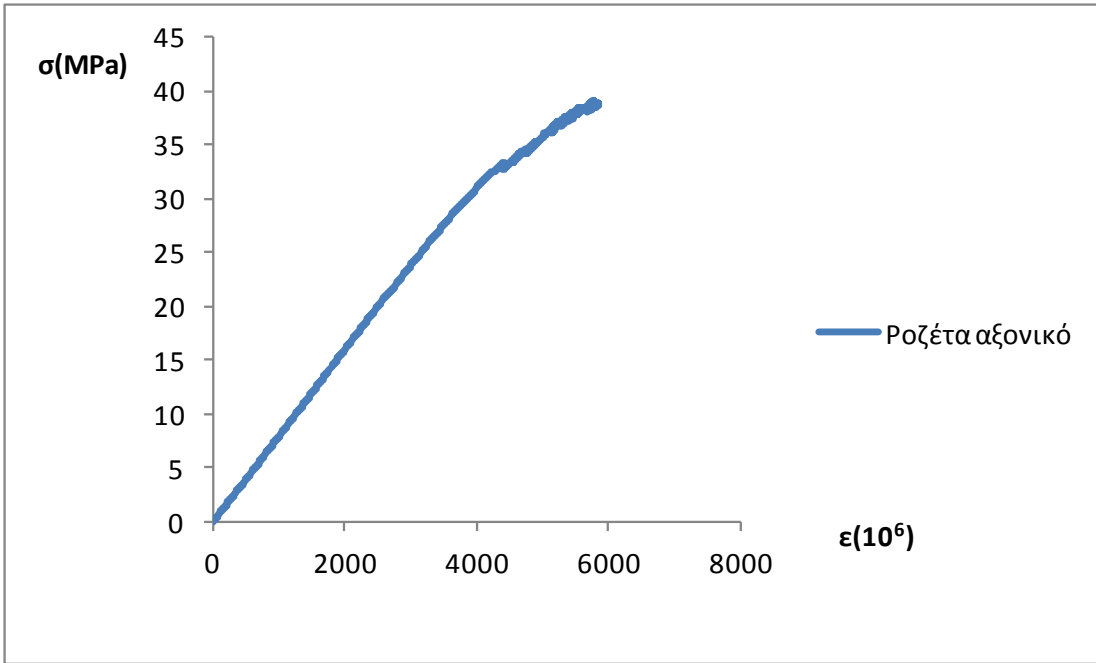
Εικόνα Β 2.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A2-3



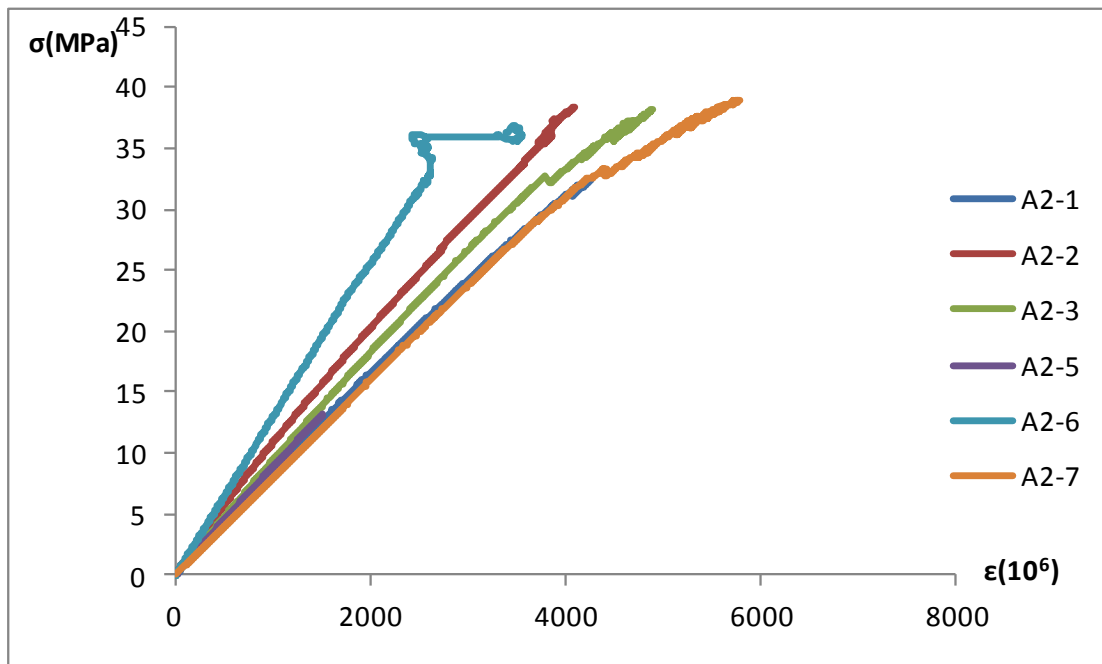
Εικόνα Β 2.14: Συνολικό διάγραμμα σ-ε A2-5



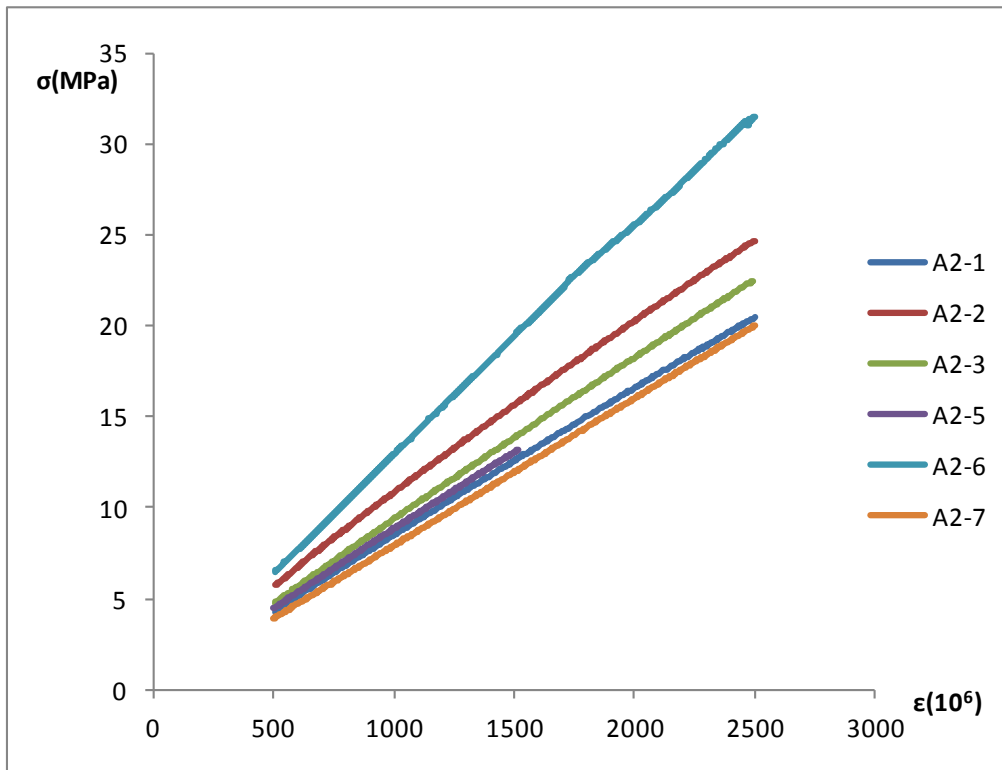
Εικόνα Β 2.15: Συνολικό διάγραμμα σ-ε A2-6



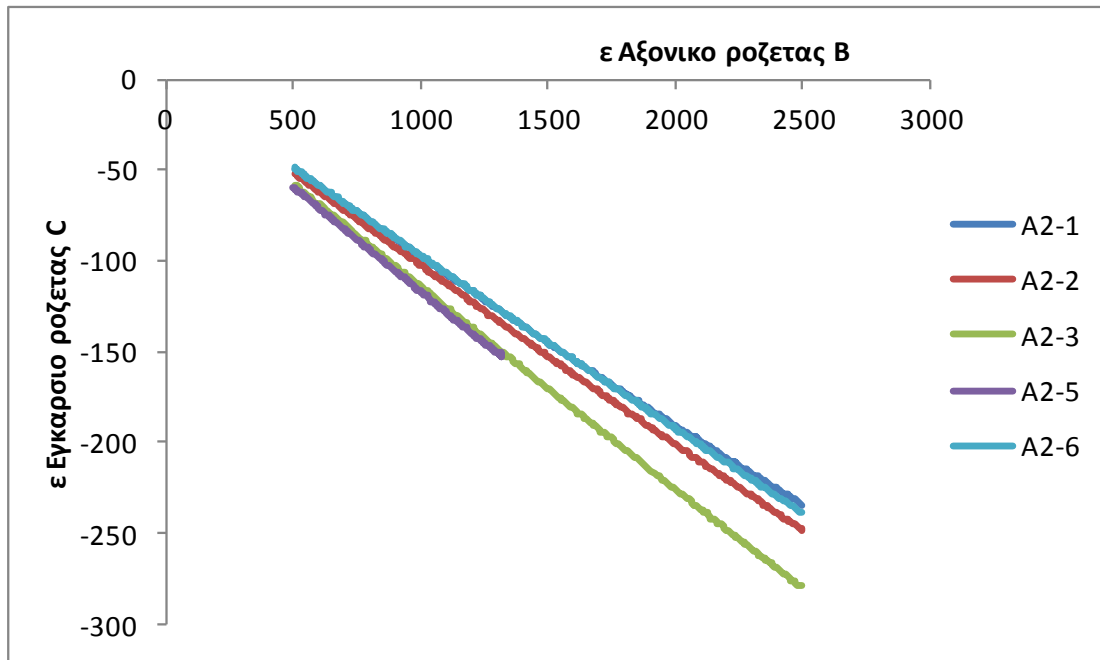
Εικόνα Β 2.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A2-7



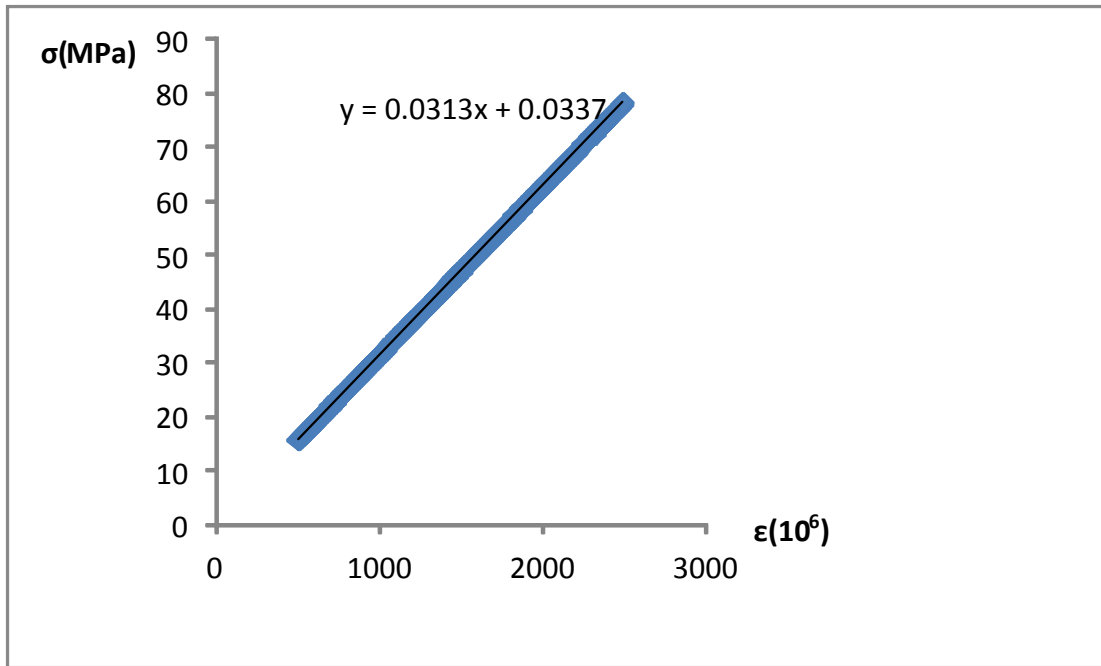
Εικόνα Β 2.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A2



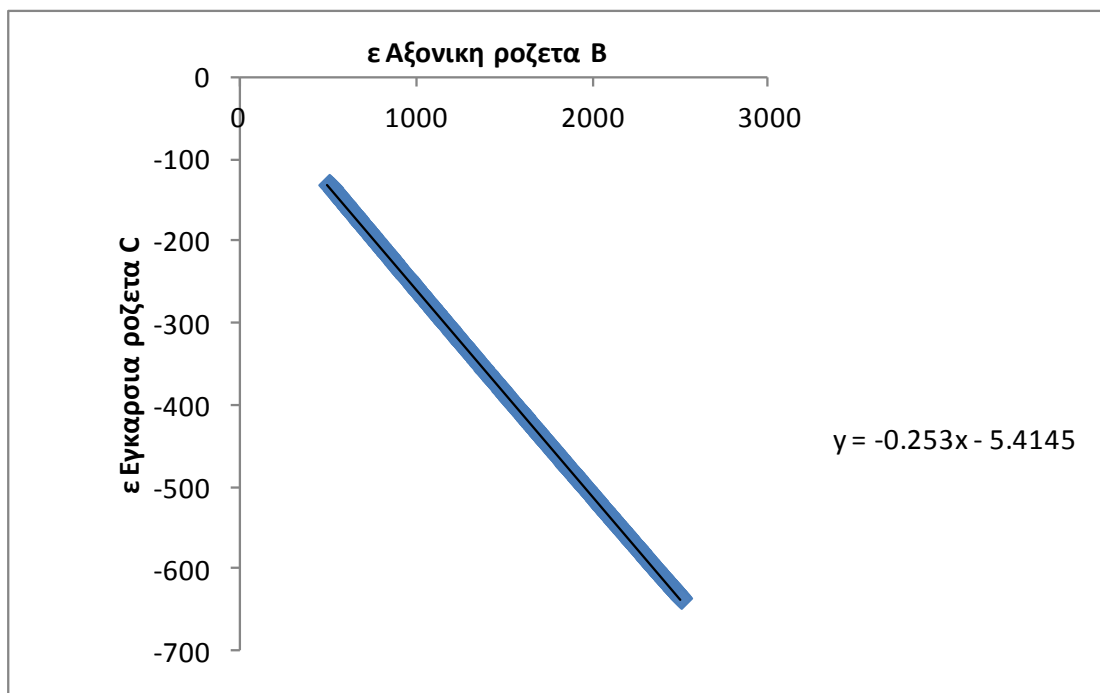
Εικόνα Β 2.18: Συνολικό διάγραμμα σ-ε A2 (500-2500)



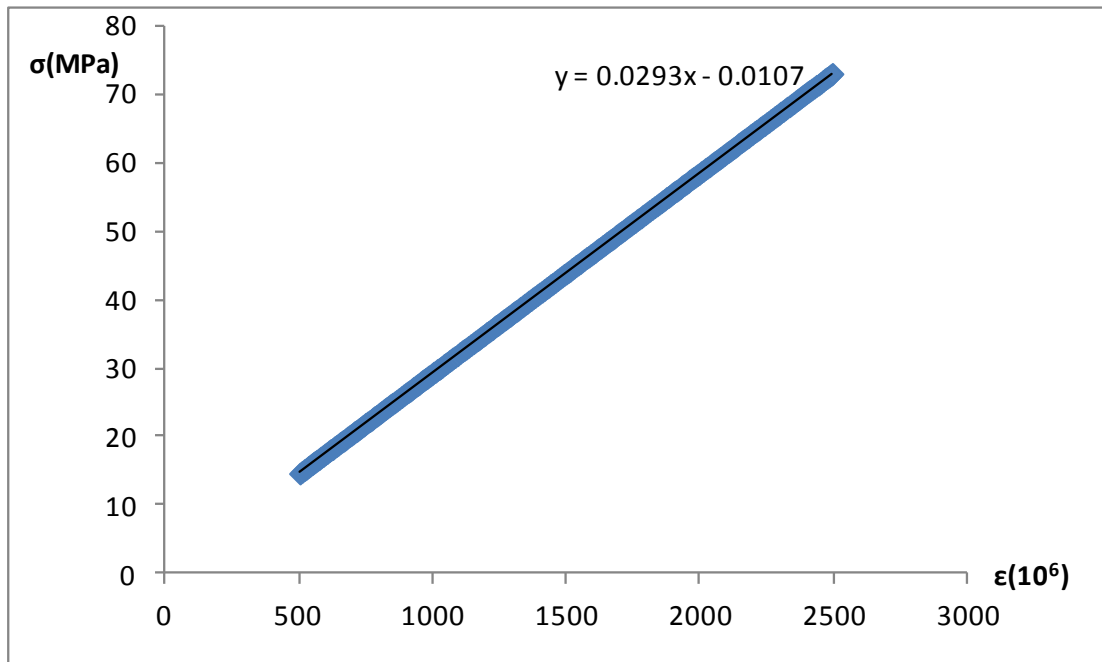
Εικόνα Β 2.19: Συνολικό διάγραμμα παραμορφώσεων A2



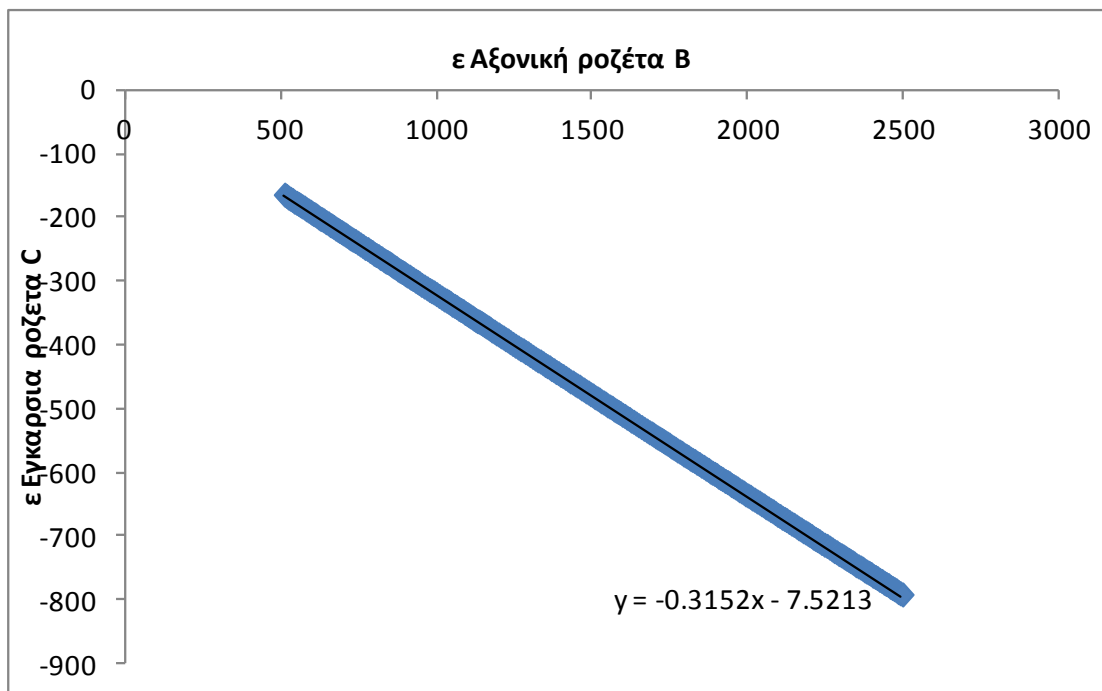
Εικόνα Β 3.1: Διάγραμμα σ-ε Α5-1



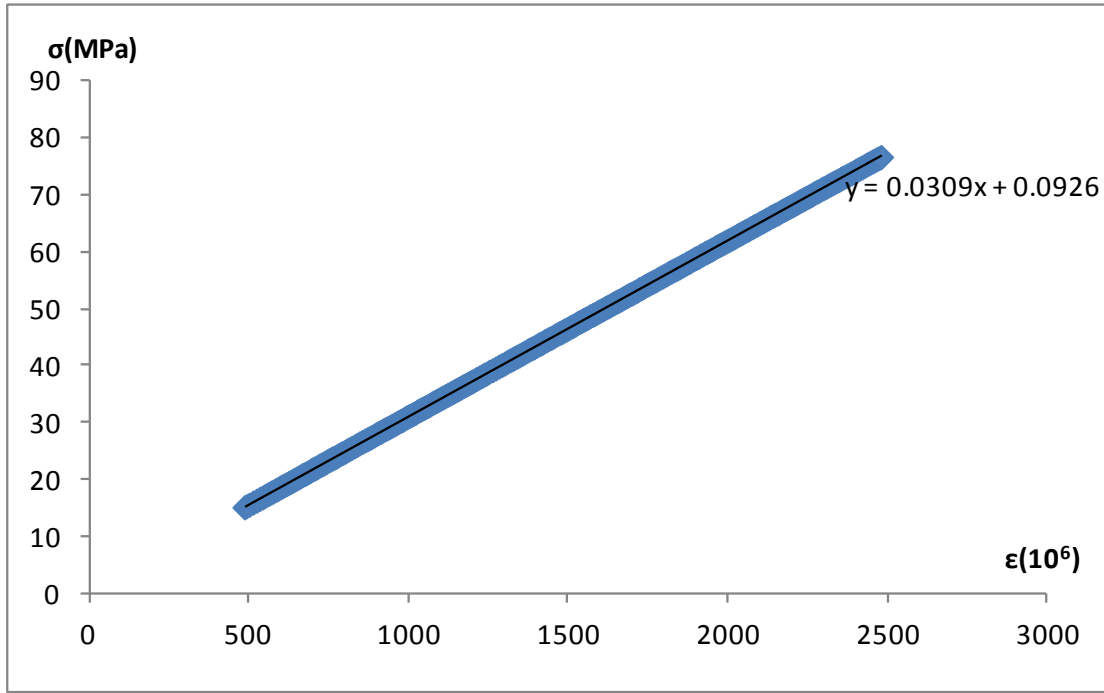
Εικόνα Β 3.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α5-



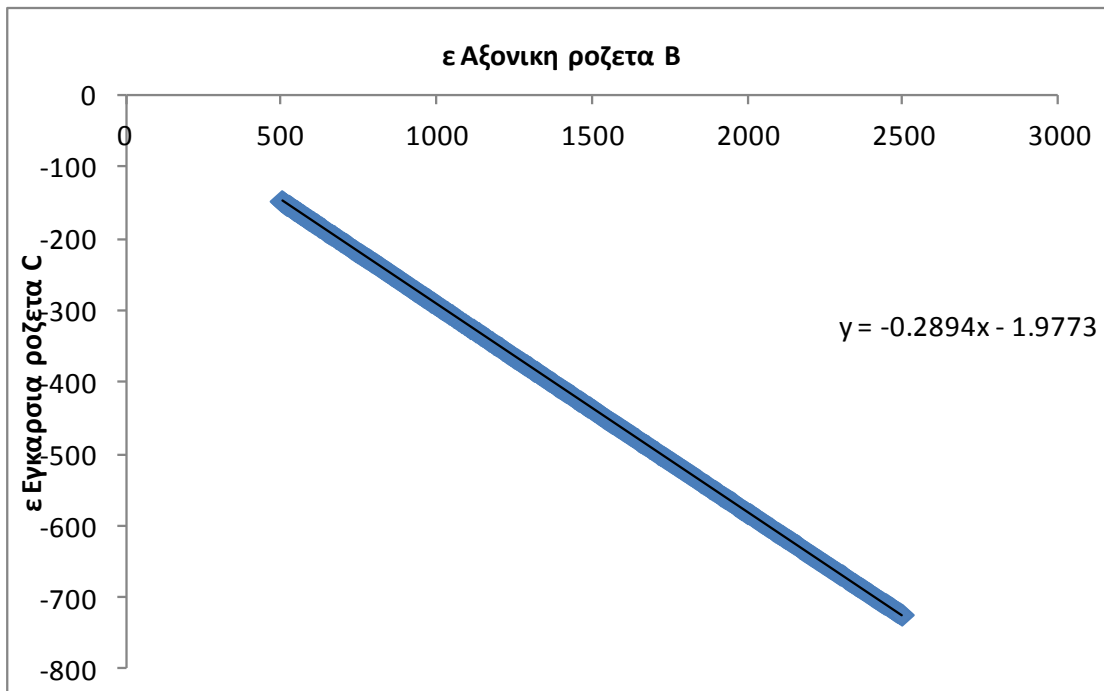
Εικόνα Β 3.3: Διάγραμμα σ - ϵ A5-2



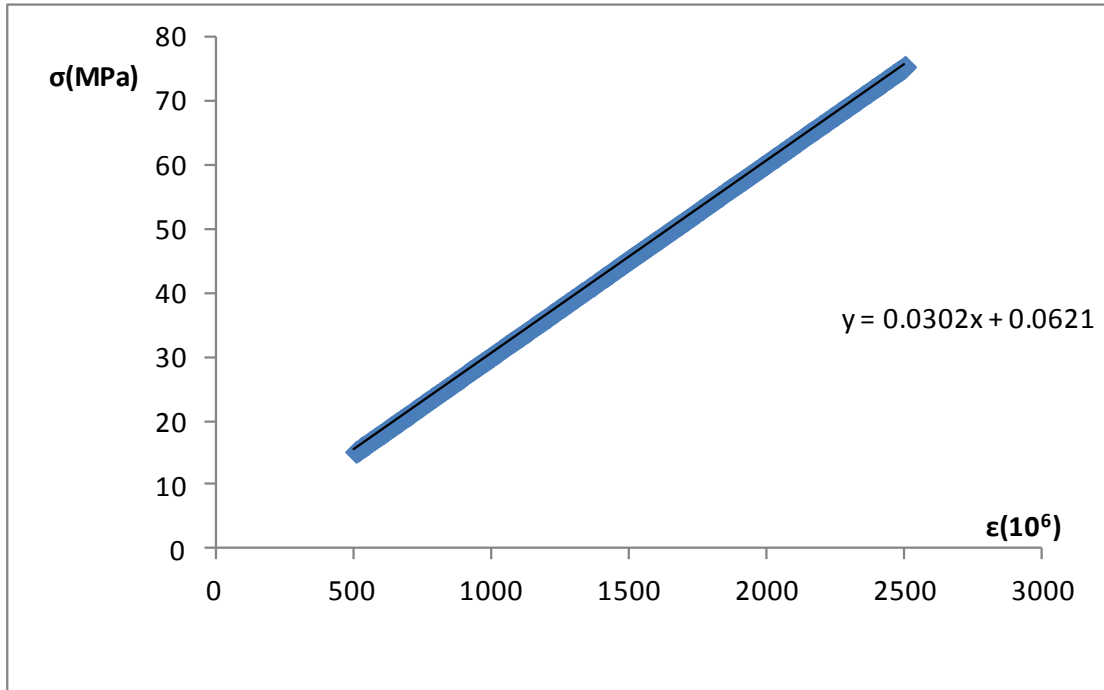
Εικόνα Β 3.4: Διάγραμμα παραμορφώσεων A5-2



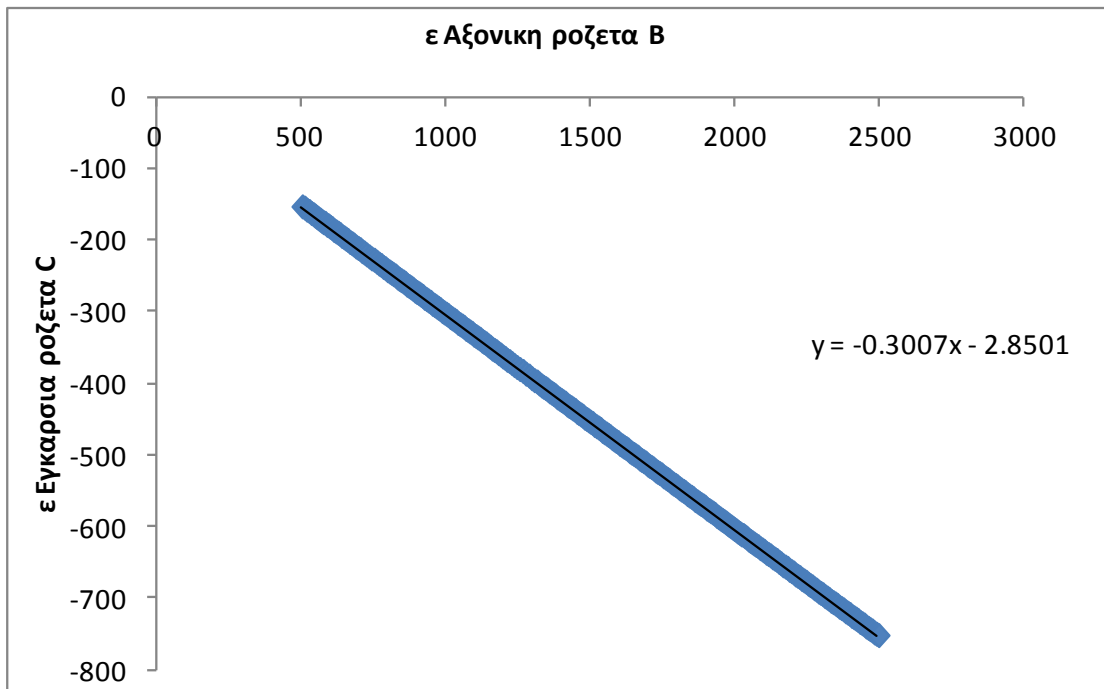
Εικόνα Β 3.5: Διάγραμμα σ-ε Α5-3



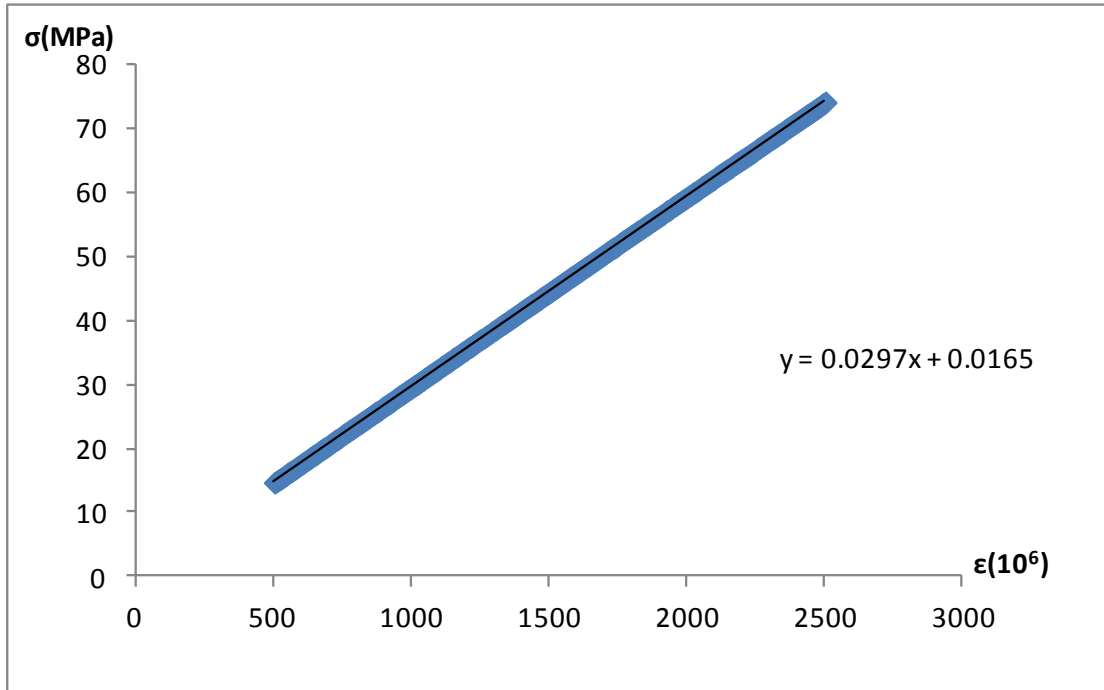
Εικόνα Β 3.6: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α5-3



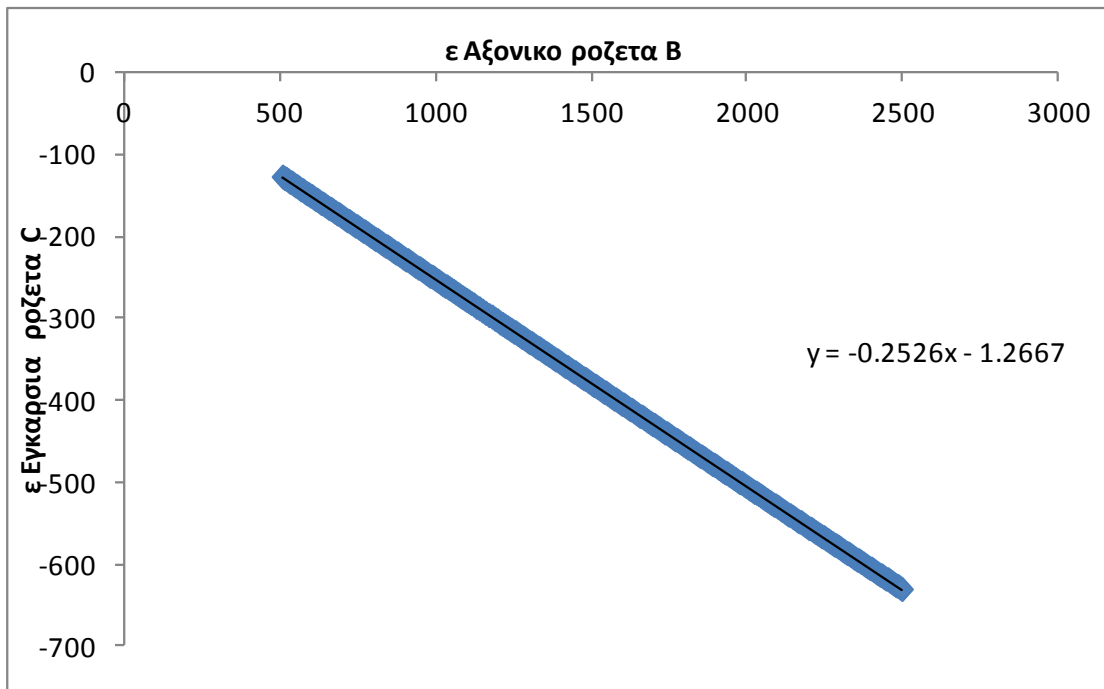
Εικόνα Β 3.7: Διάγραμμα σ - ϵ A5-4



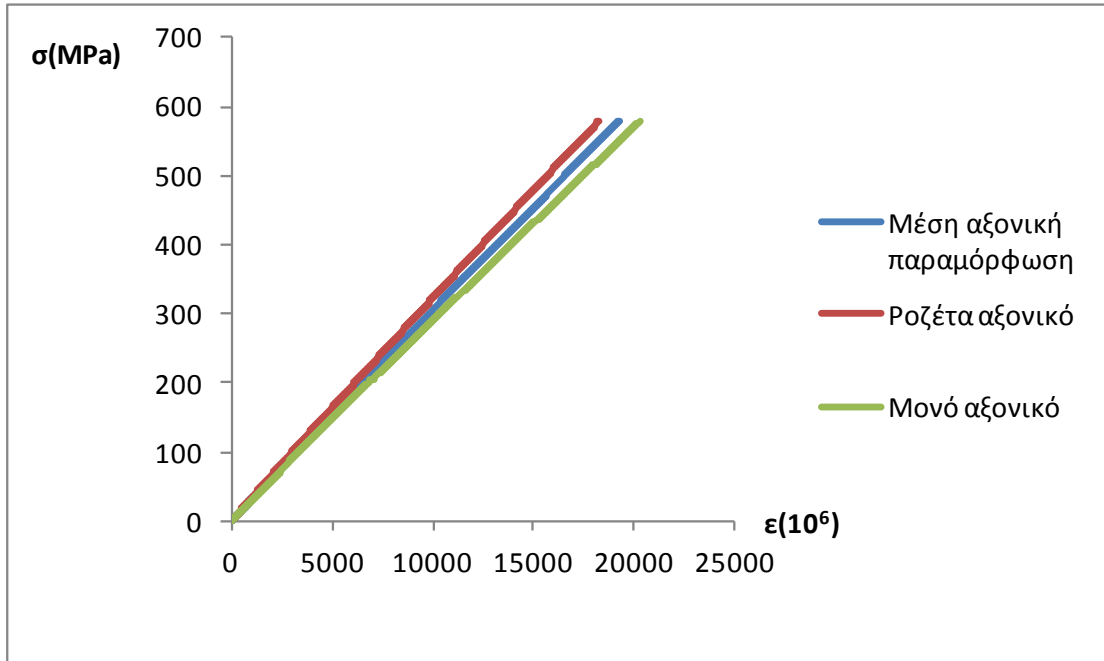
Εικόνα Β 3.8: Διάγραμμα παραμορφώσεων A5-4



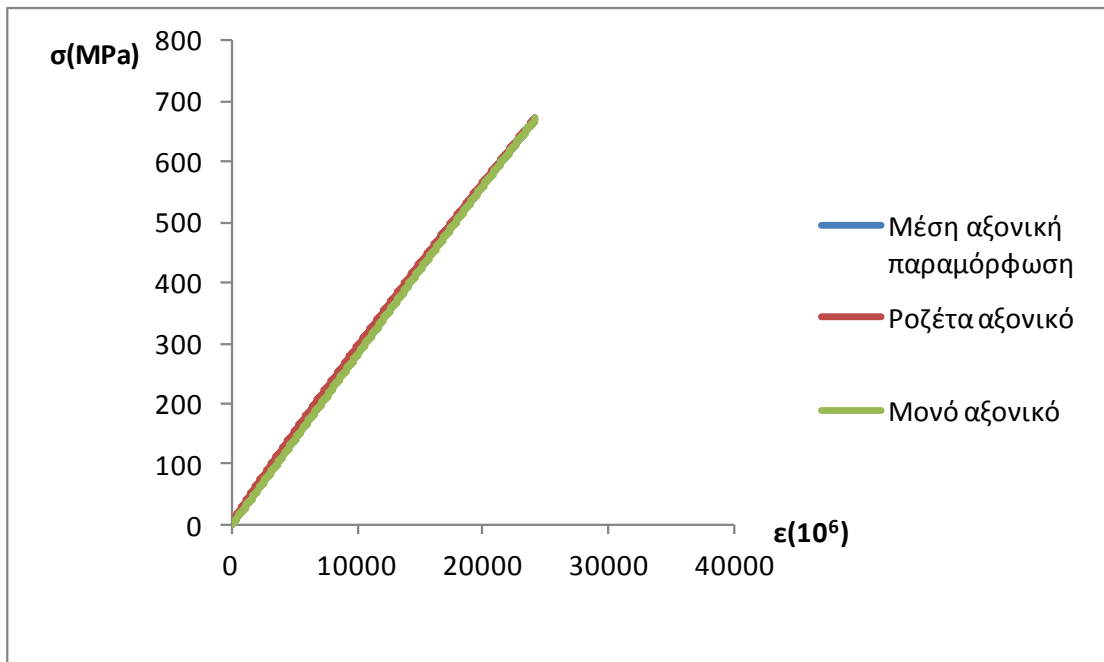
Εικόνα Β 3.9: Διάγραμμα σ-ε Α5-5



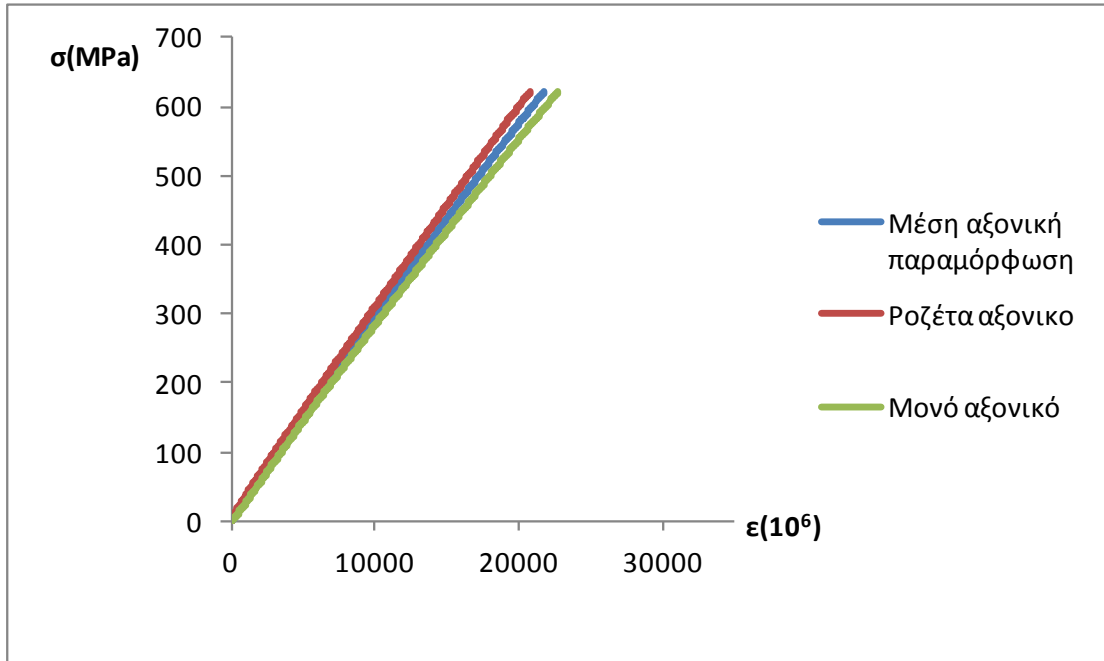
Εικόνα Β 3.10: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α5-5



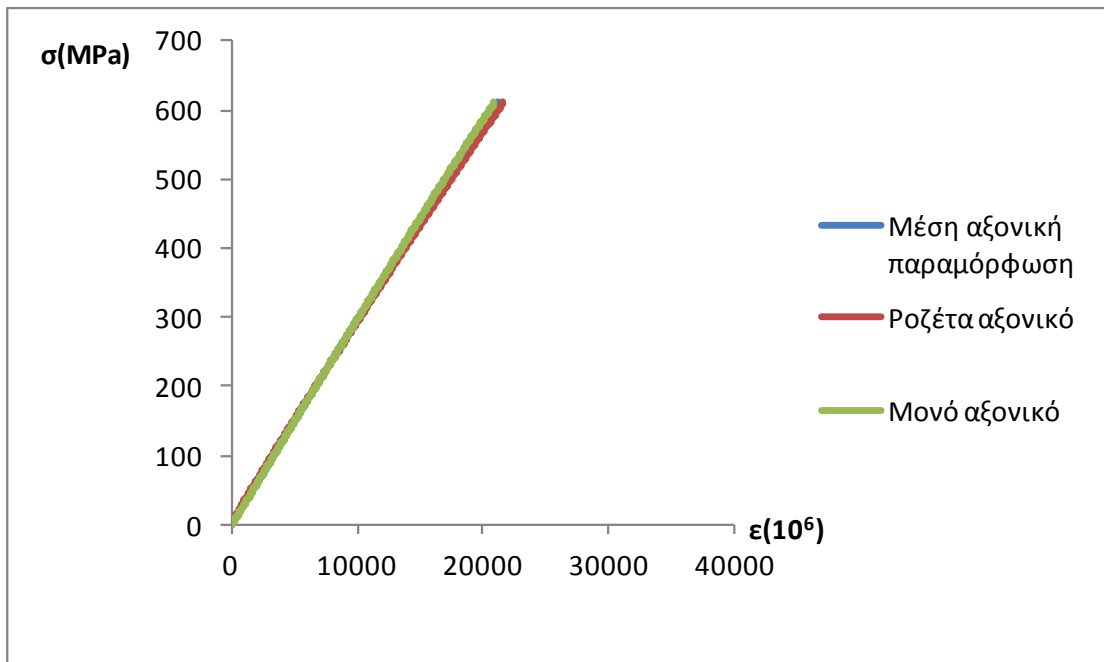
Εικόνα Β 3.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5-1



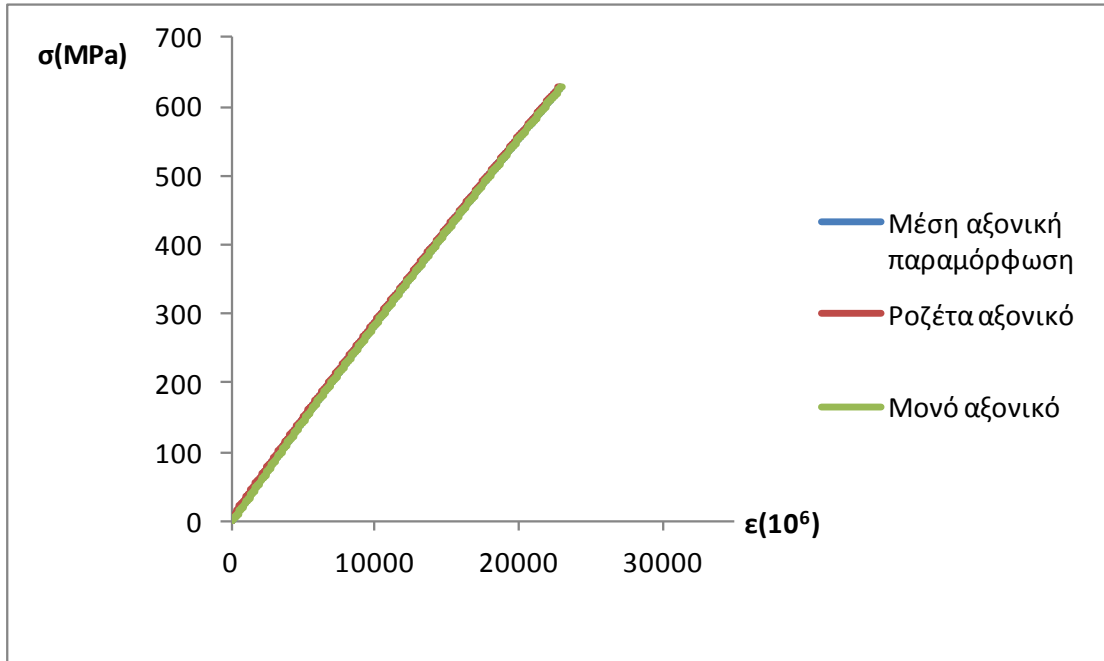
Εικόνα Β 3.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5-2



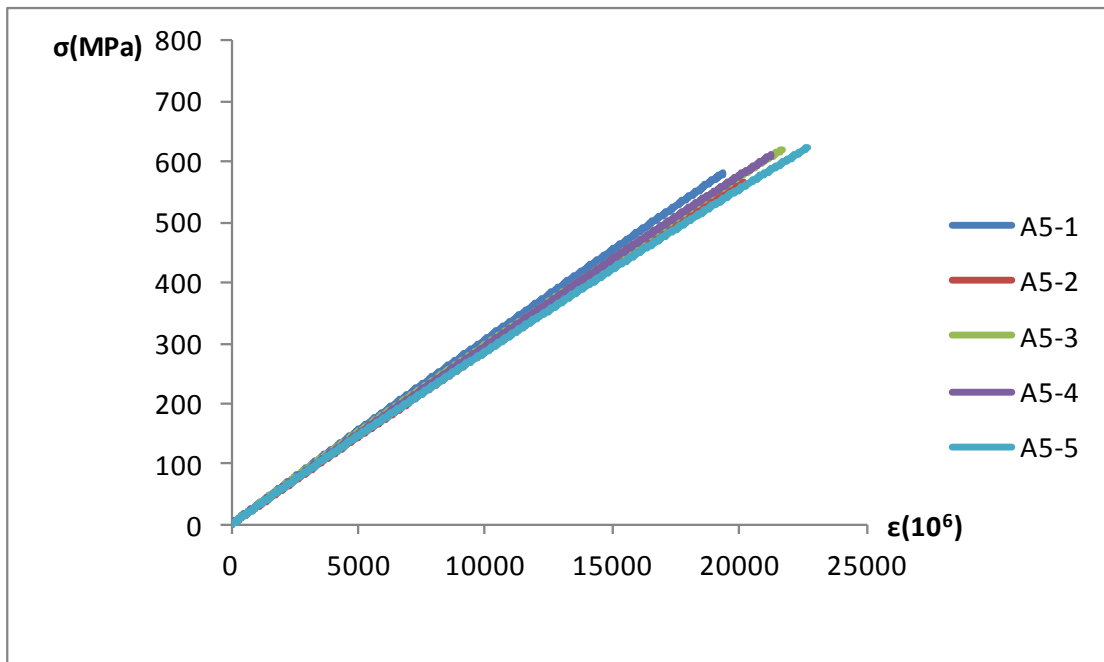
Εικόνα Β 3.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5-3



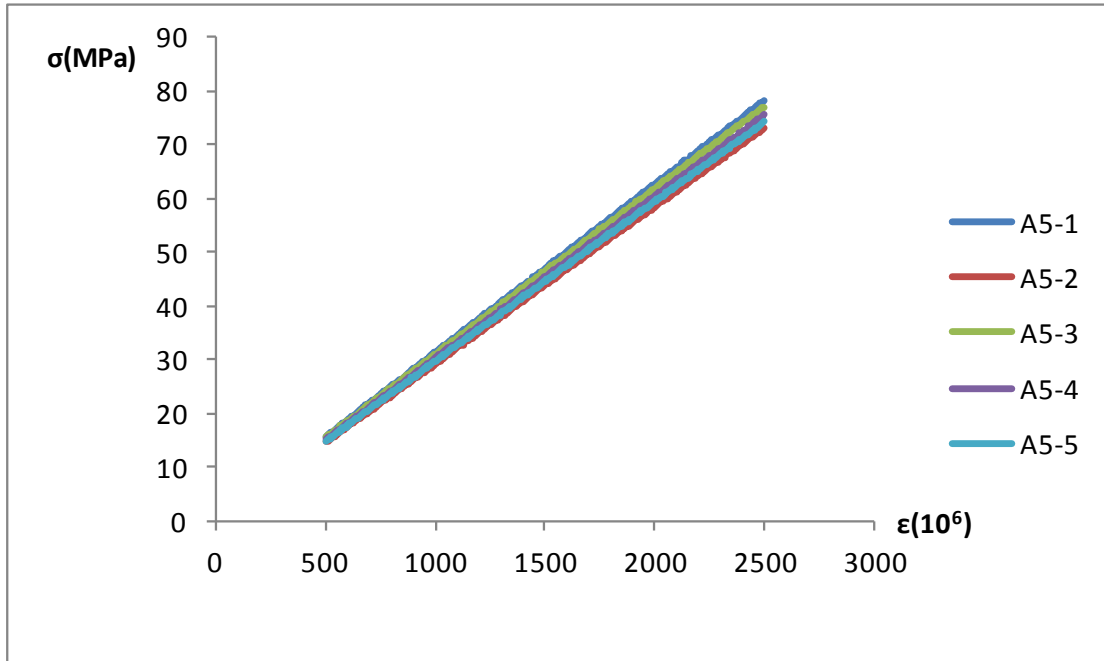
Εικόνα Β 3.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5-4



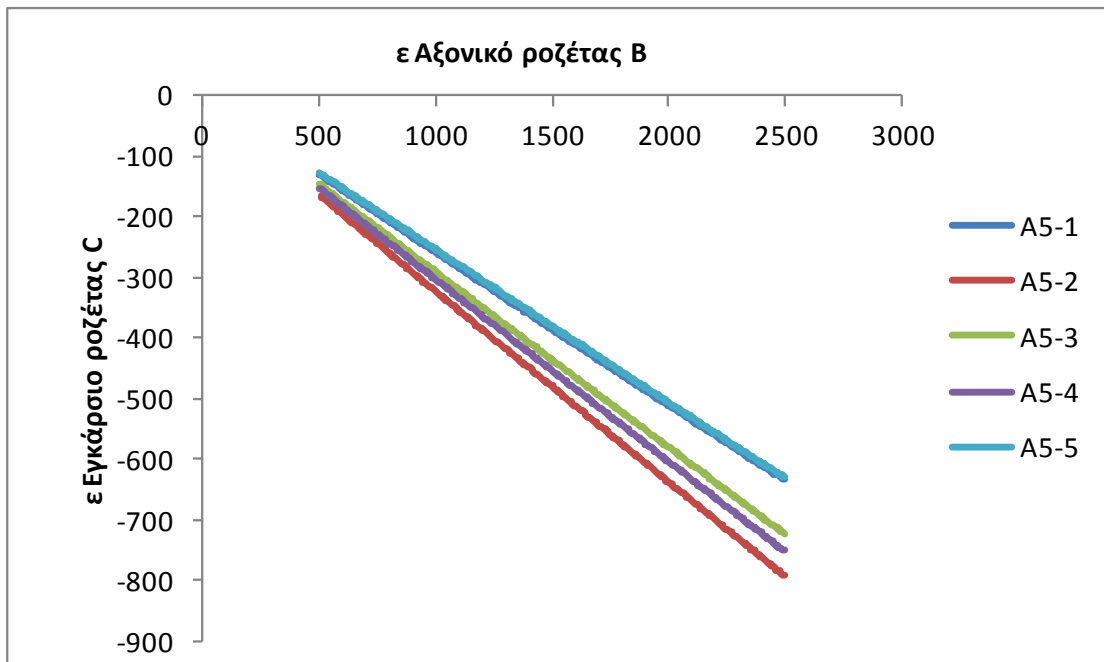
Εικόνα Β 3.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5-5



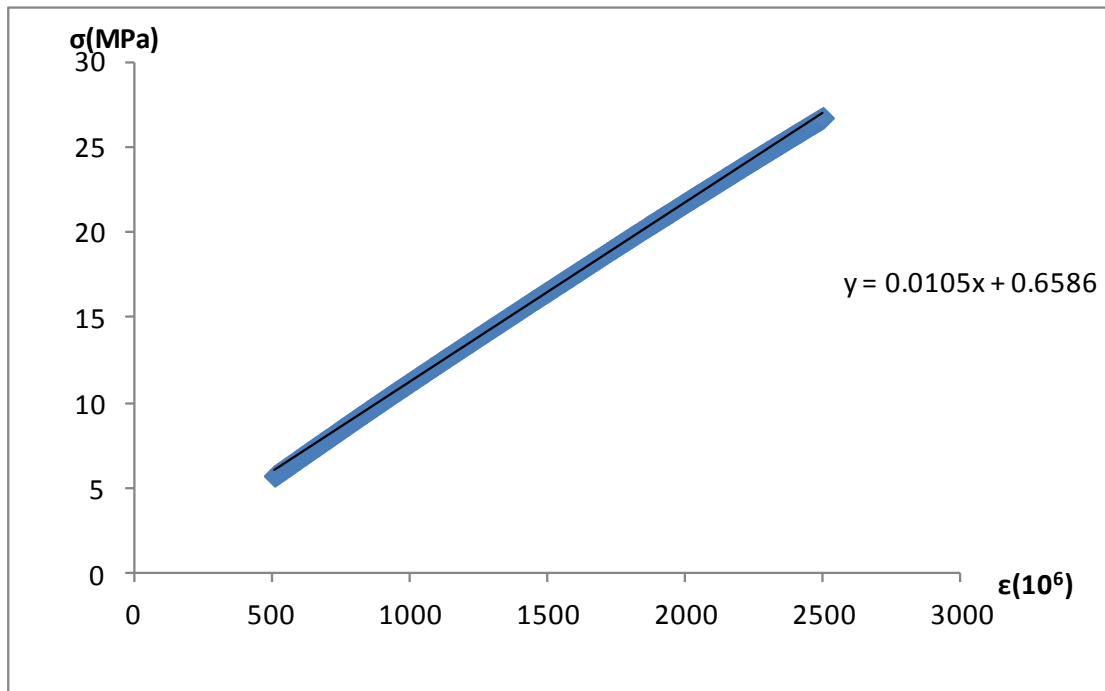
Εικόνα Β 3.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5



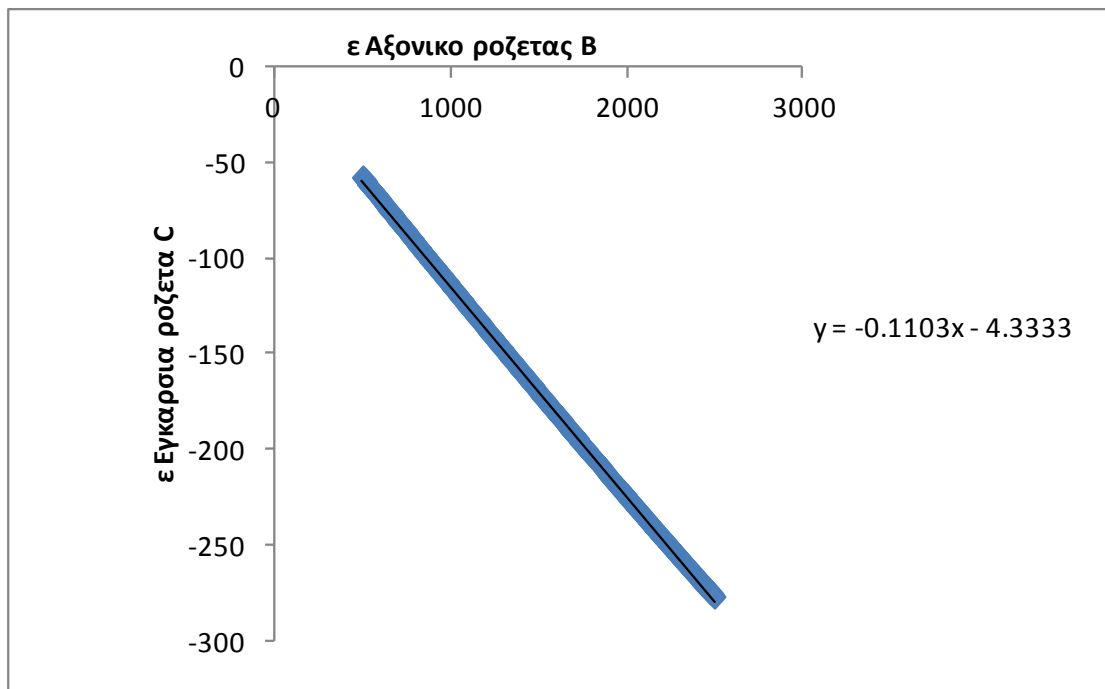
Εικόνα Β 3.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A5 (500-2500)



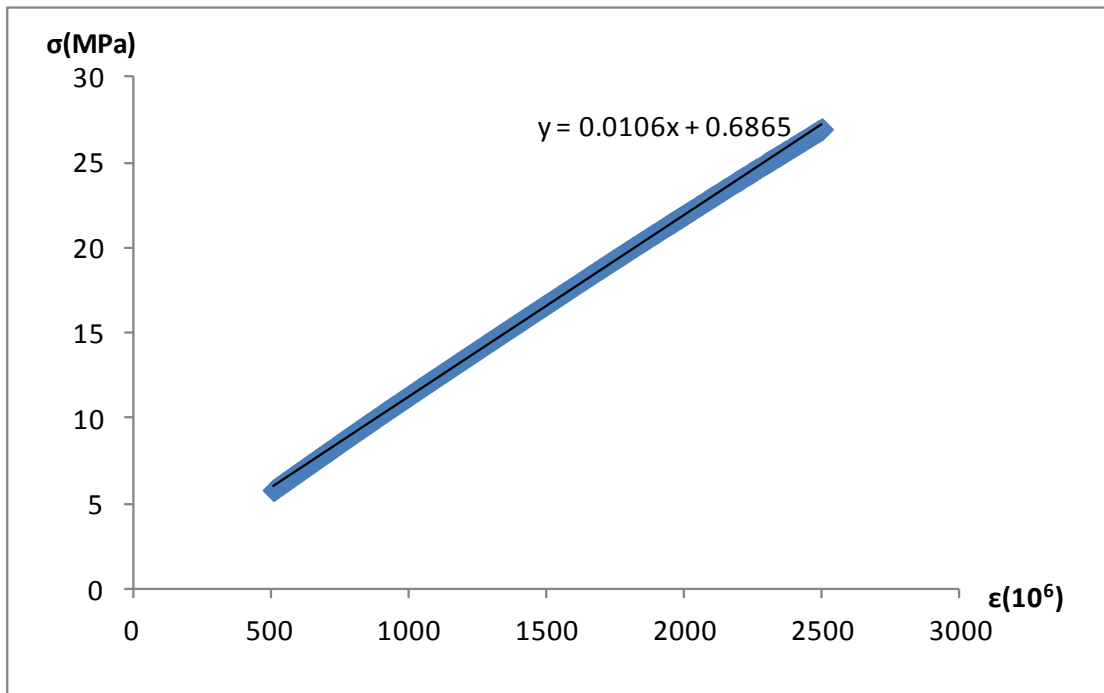
Εικόνα Β 3.18: Συνολικό διάγραμμα παραμορφώσεων A5



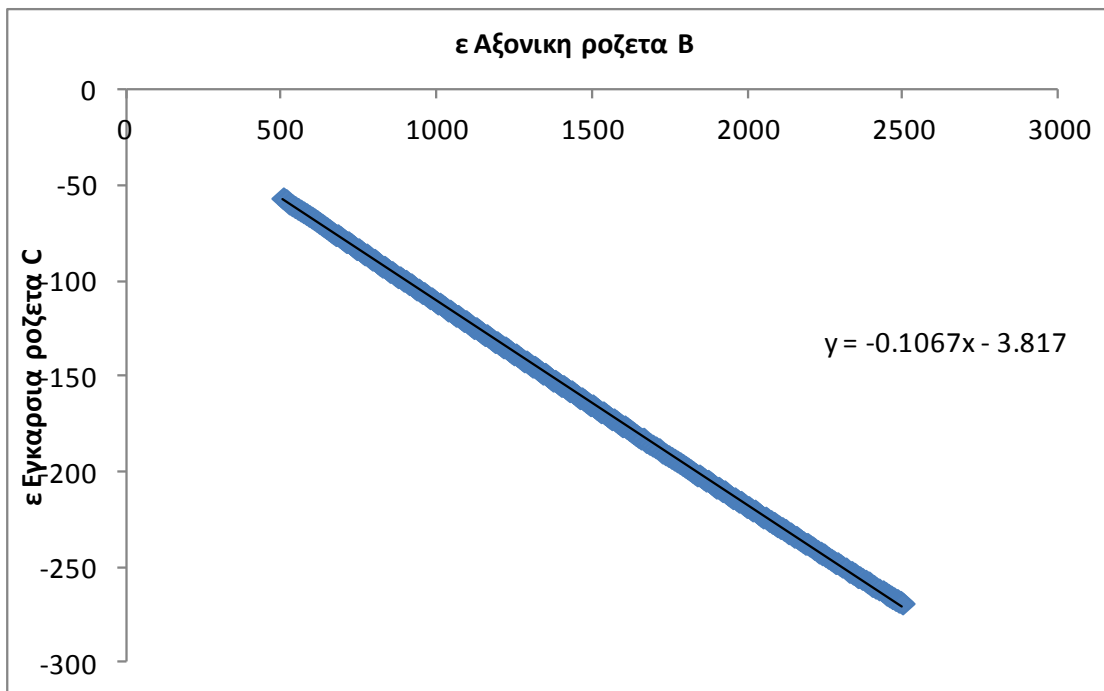
Εικόνα Β 3.19: Διάγραμμα σ-ε Α6-1



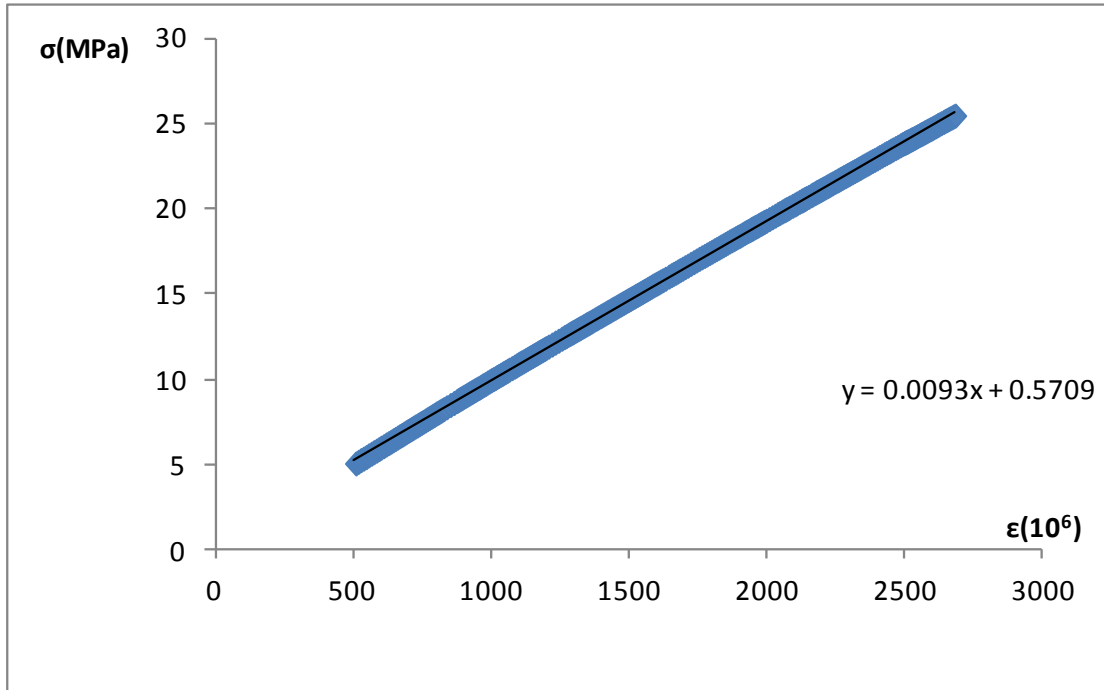
Εικόνα Β 4.1: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α6-1



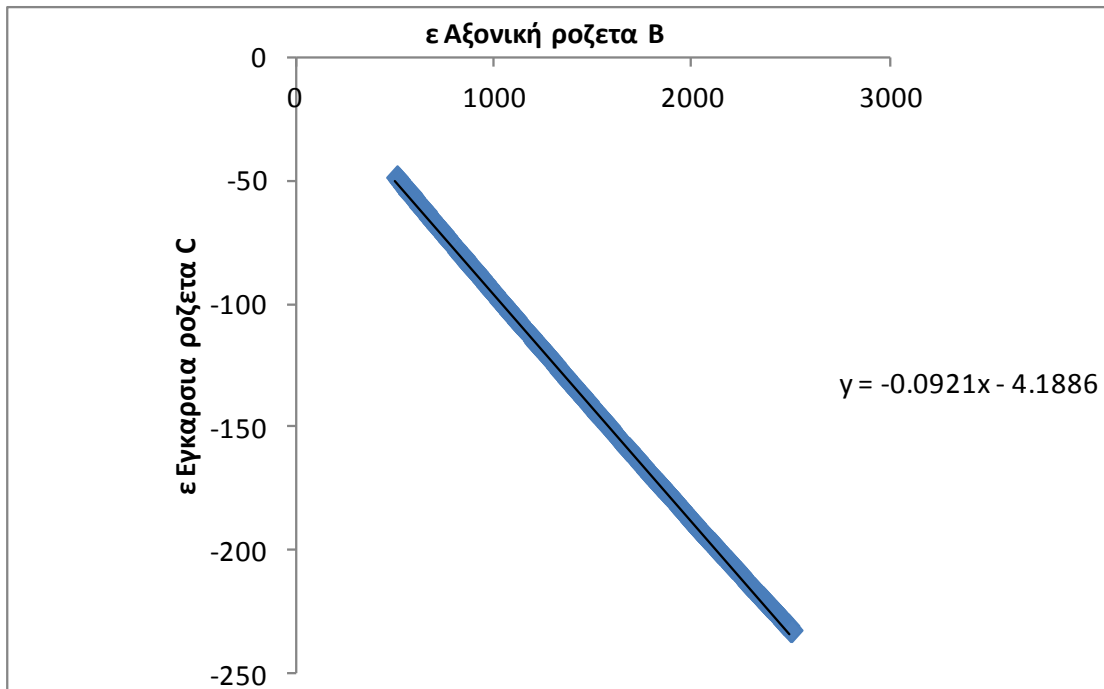
Εικόνα Β 4.2: Διάγραμμα σ-ε Α6-2



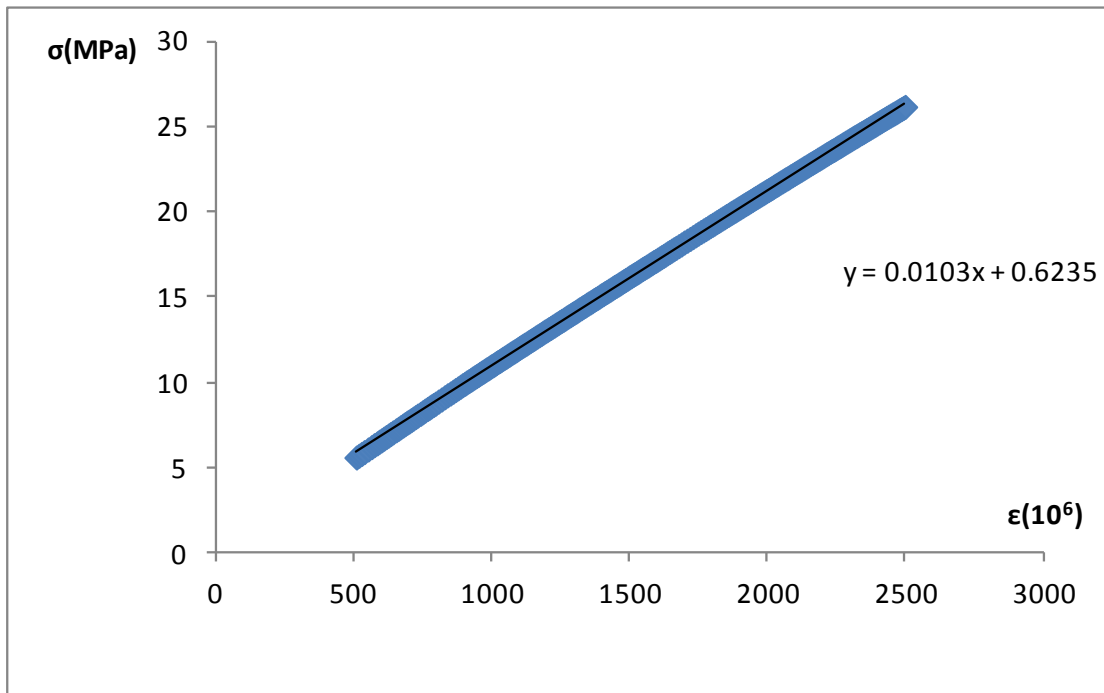
Εικόνα Β 4.3: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α6-2



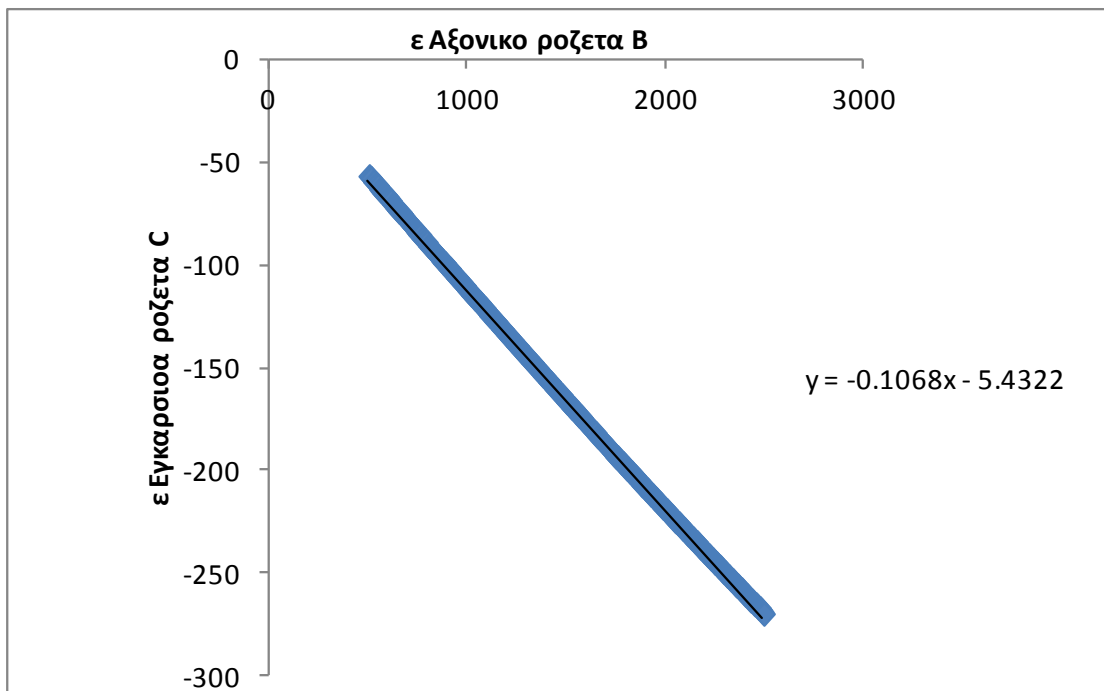
Εικόνα Β 4.4: Διάγραμμα σ-ε Α6-3



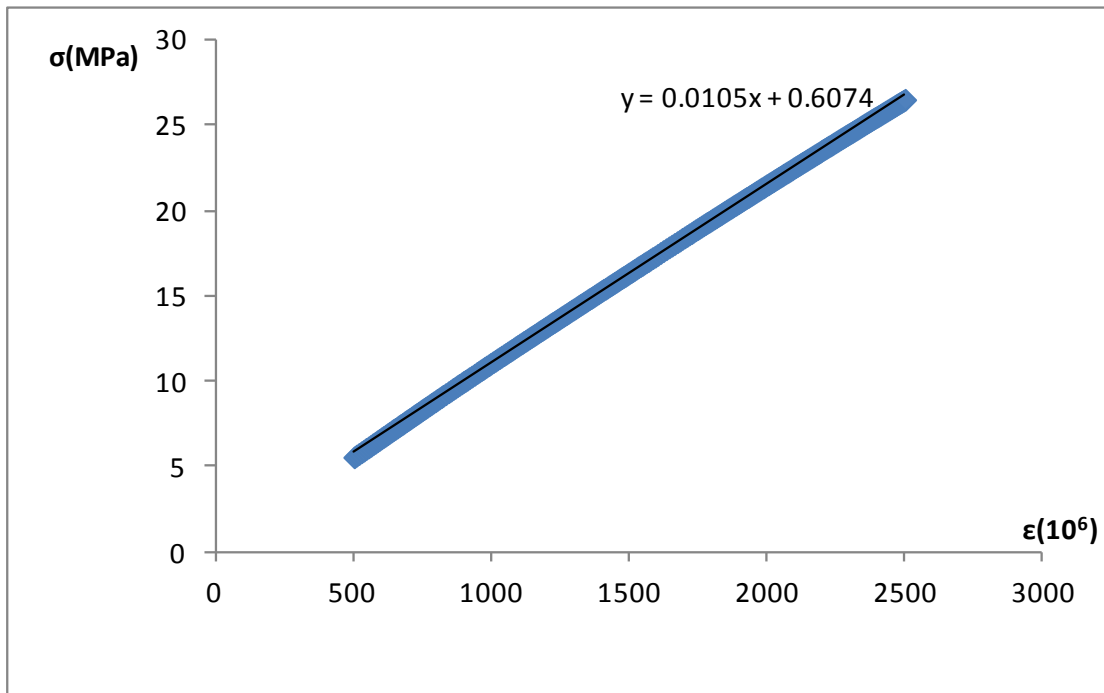
Εικόνα Β 4.5: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α6-3



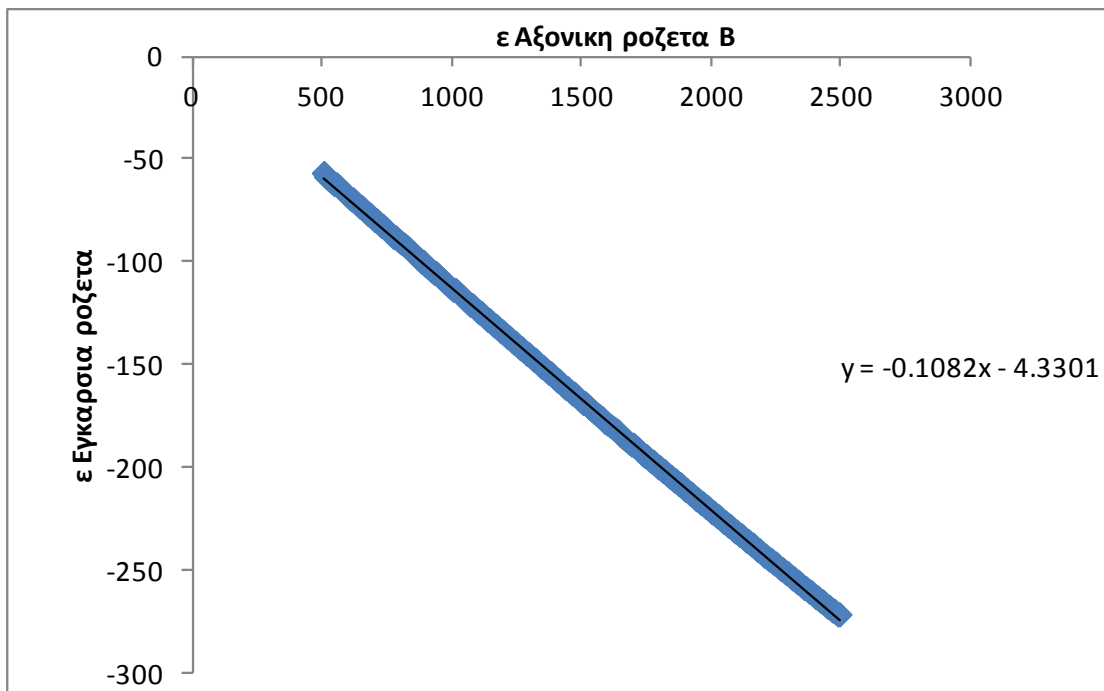
Εικόνα Β 4.6: Διάγραμμα σ-ε Α6-4



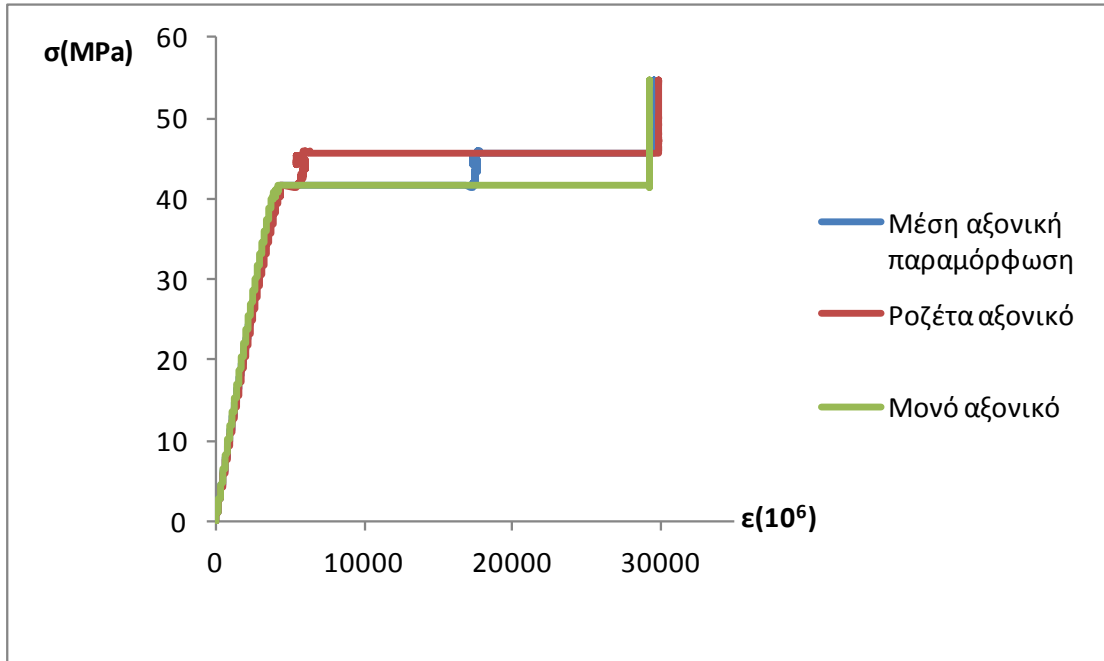
Εικόνα Β 4.7: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α6-4



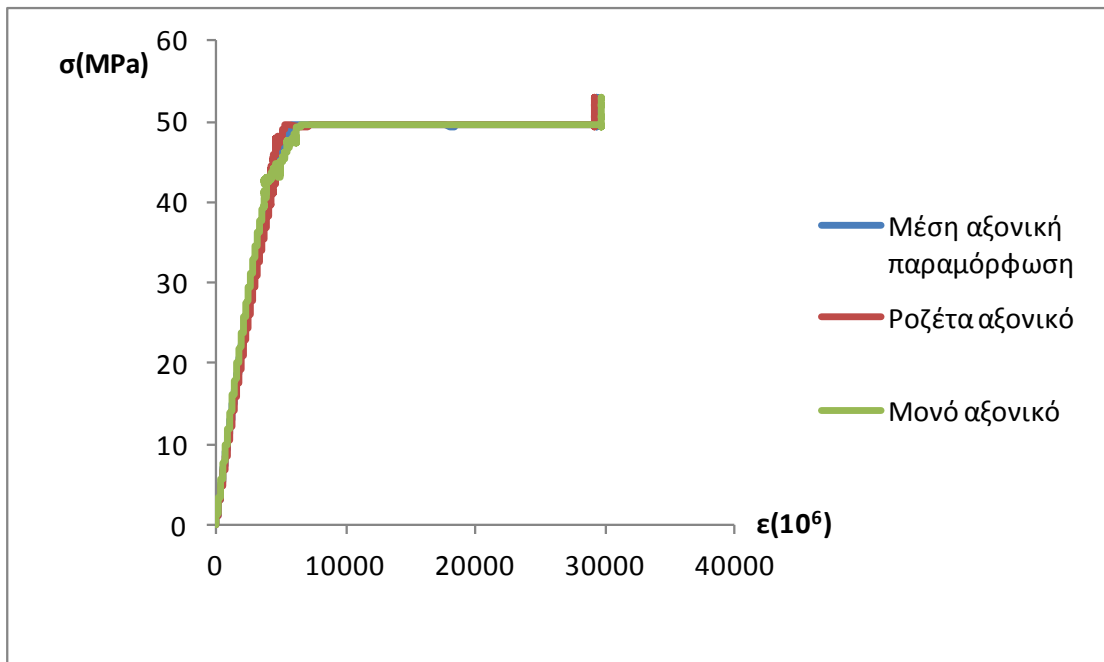
Εικόνα Β 4.8: Διάγραμμα σ - ϵ Α6-5



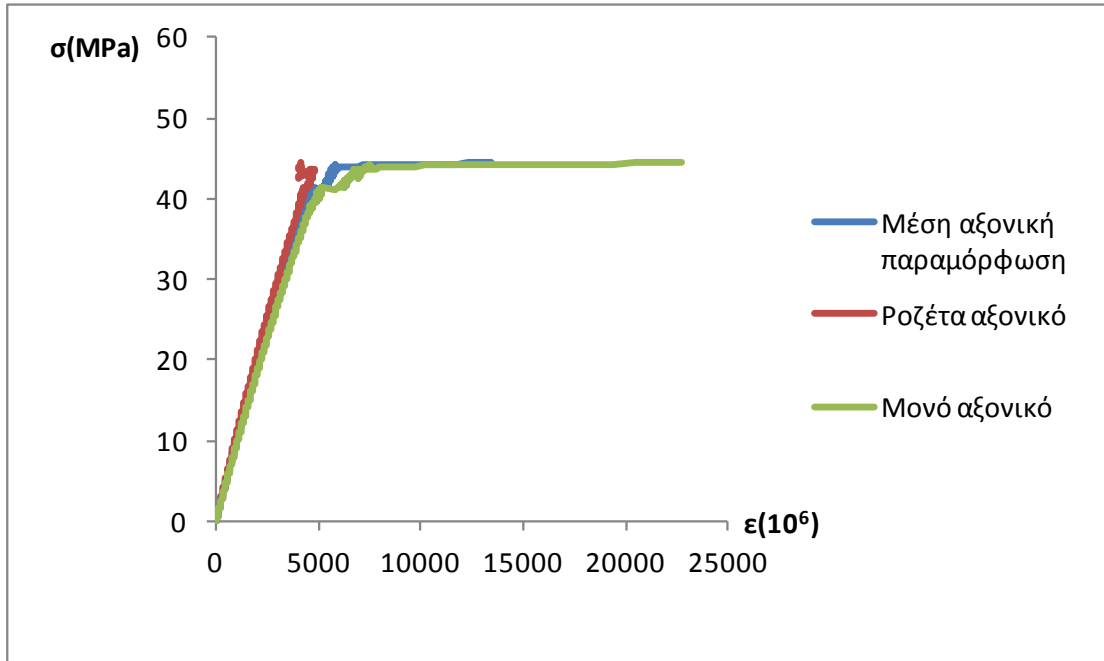
Εικόνα Β 4.9: Διάγραμμα παραμορφώσεων Α6-5



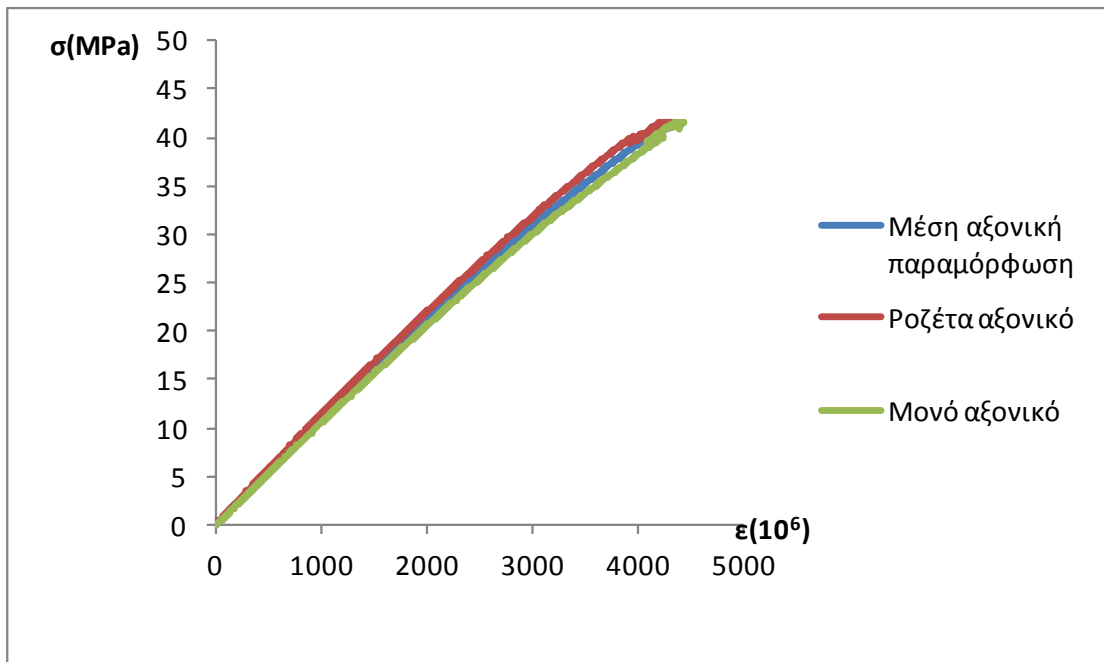
Εικόνα Β 4.10: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Α6-1



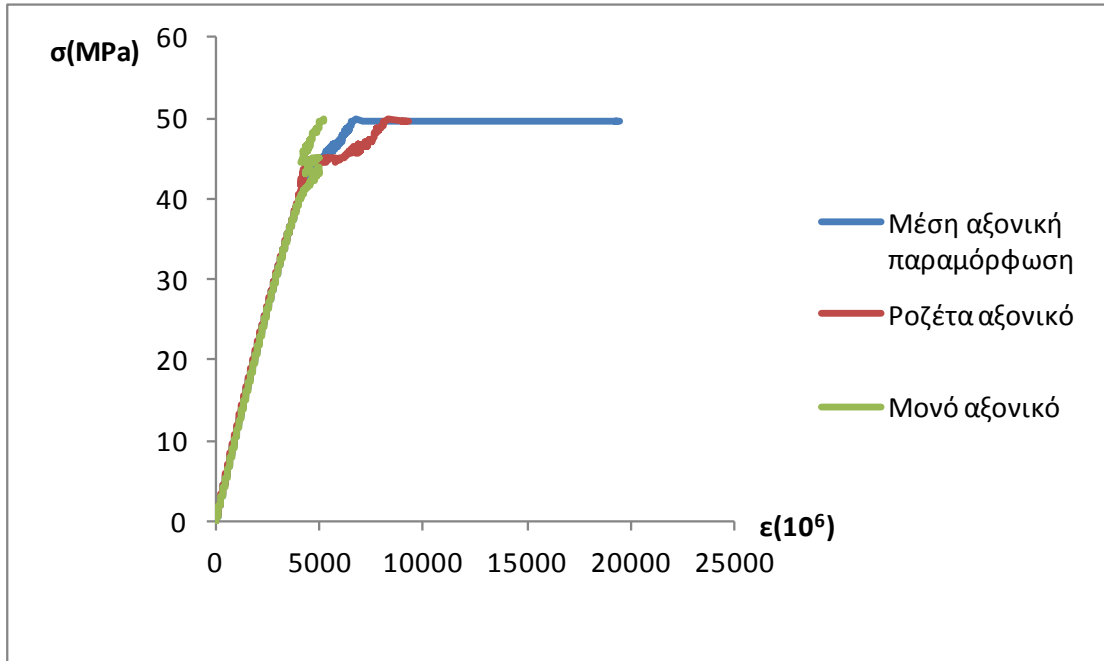
Εικόνα Β 4.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Α6-2



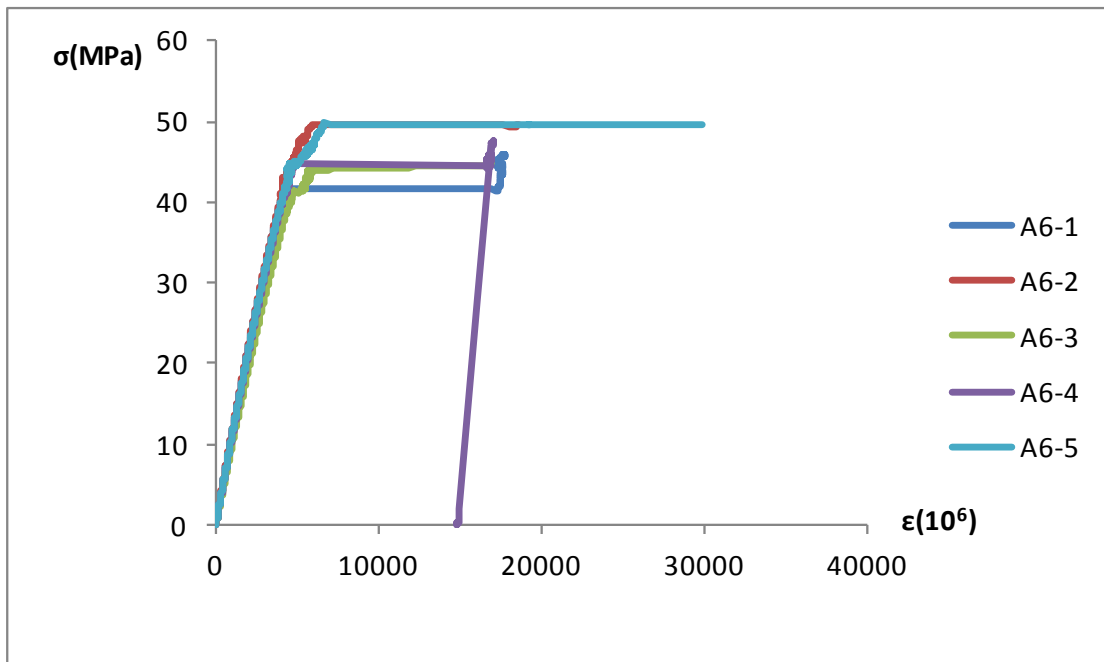
Εικόνα Β 4.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Α6-3



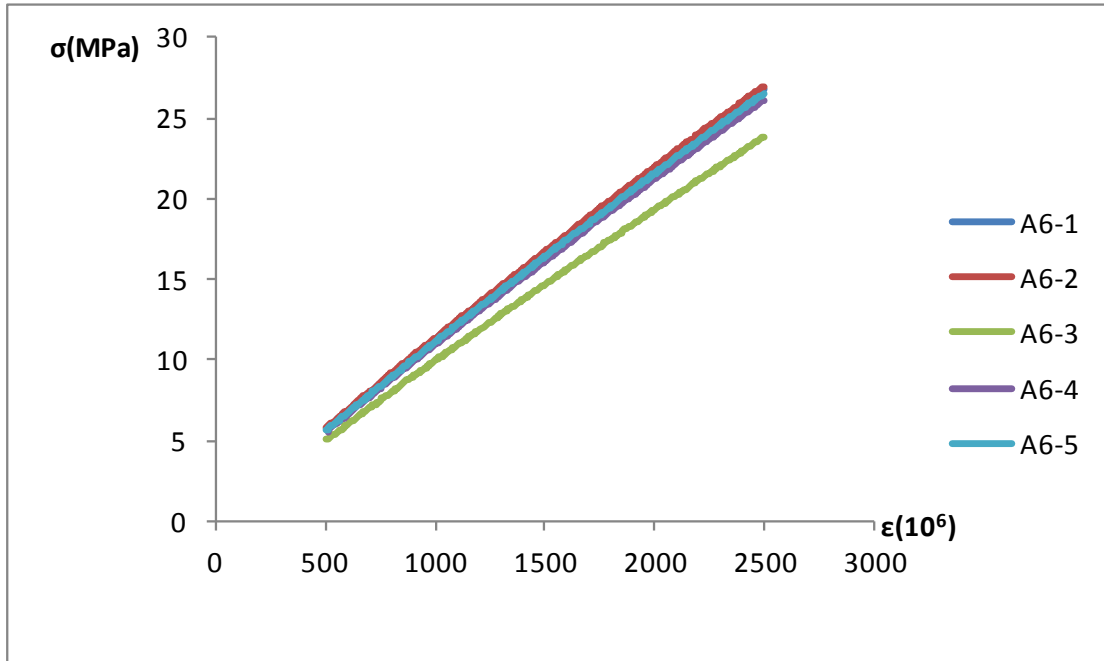
Εικόνα Β 4.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Α6-4



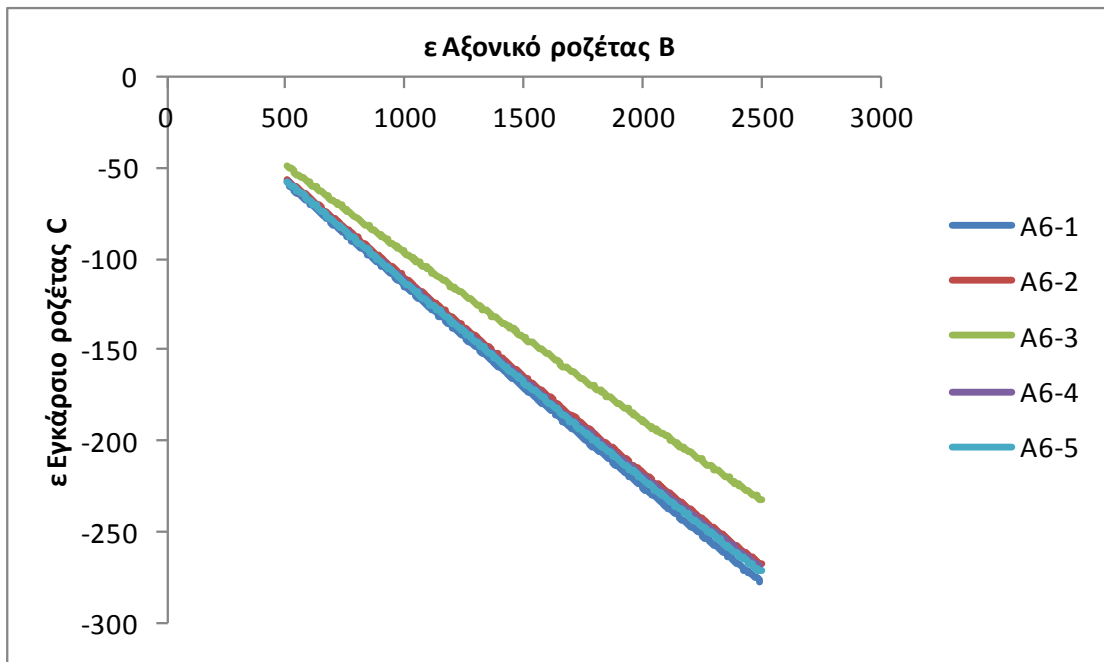
Εικόνα Β 4.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A6-5



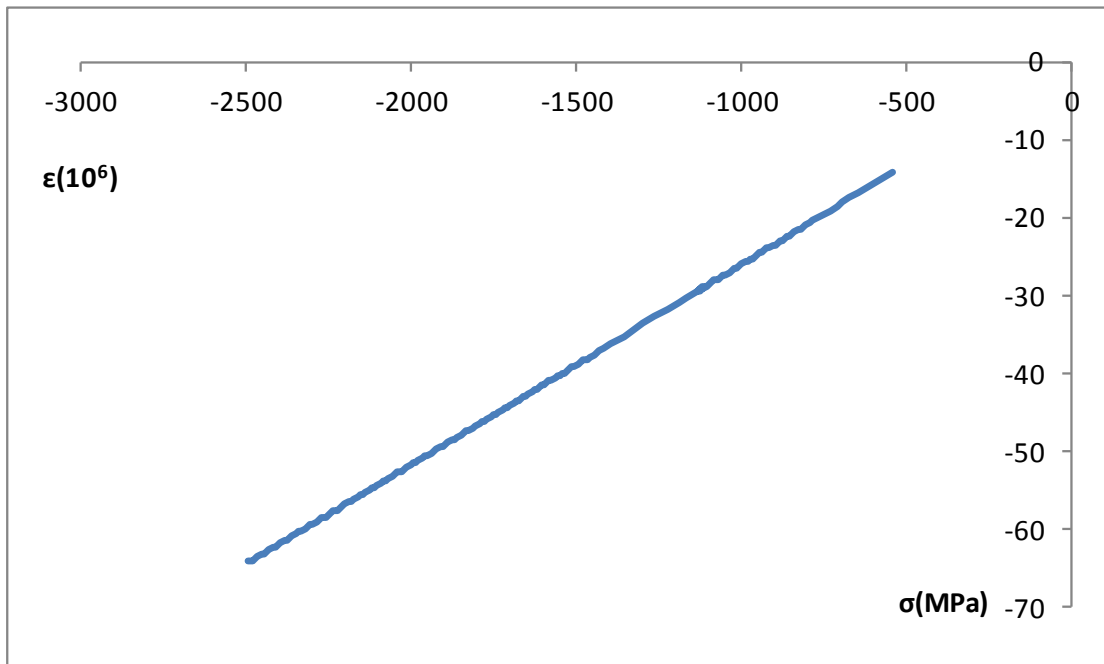
Εικόνα Β 4.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A6



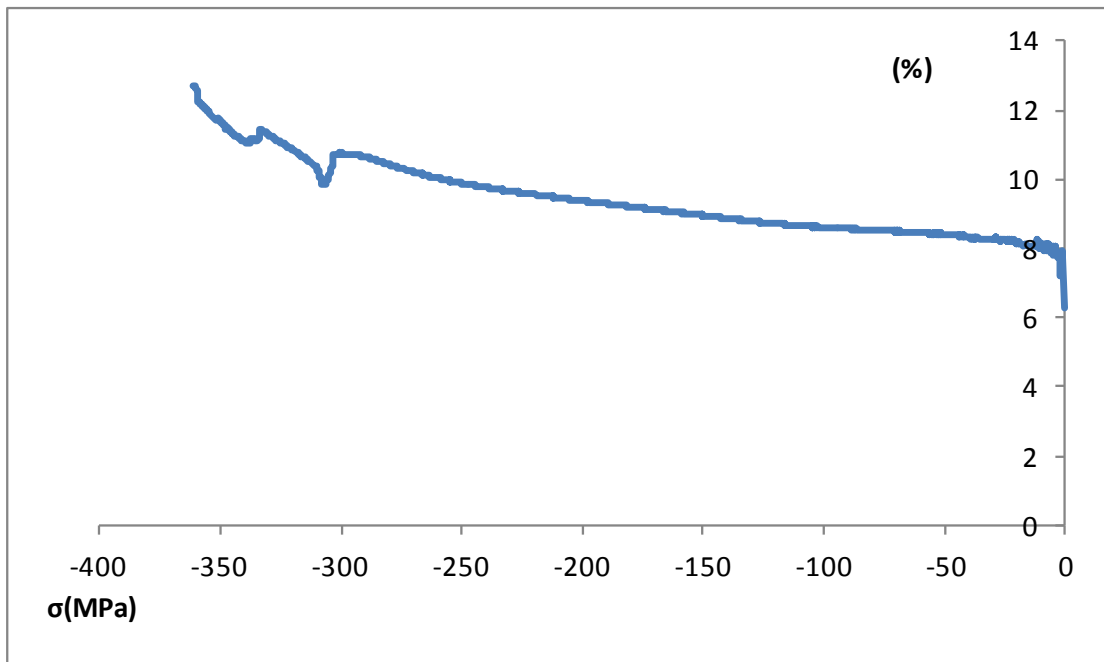
Εικόνα Β.4.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ A6 (500-2500)



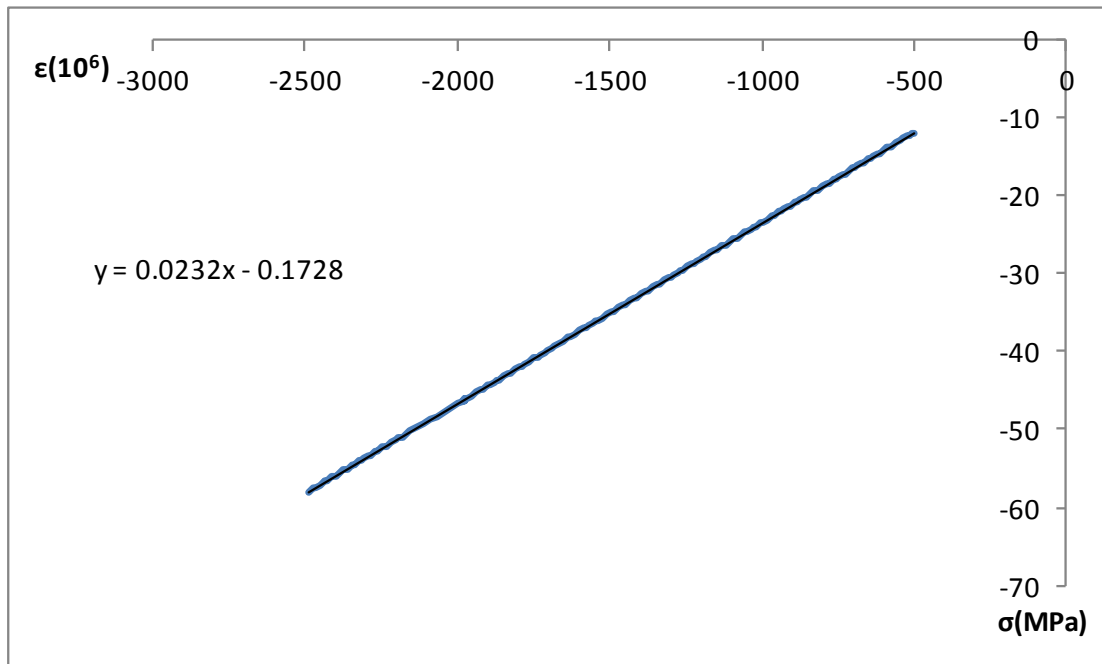
Εικόνα Β 4.15: Συνολικό διάγραμμα παραμορφώσεων A6



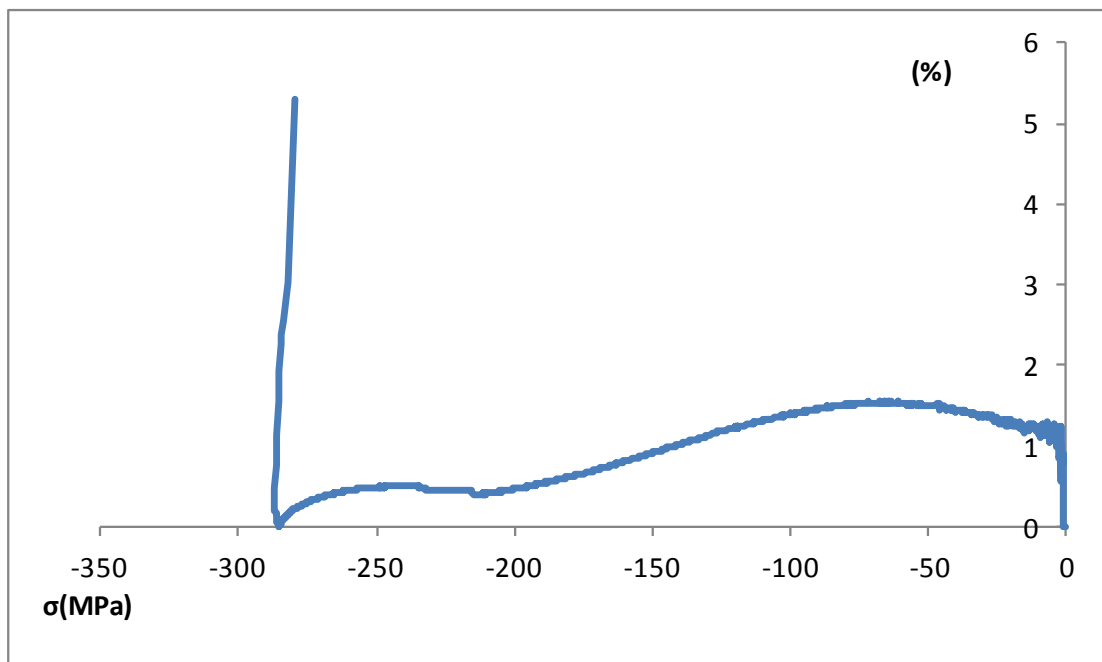
Εικόνα Β 5.1: Διάγραμμα σ - ε Β1-1



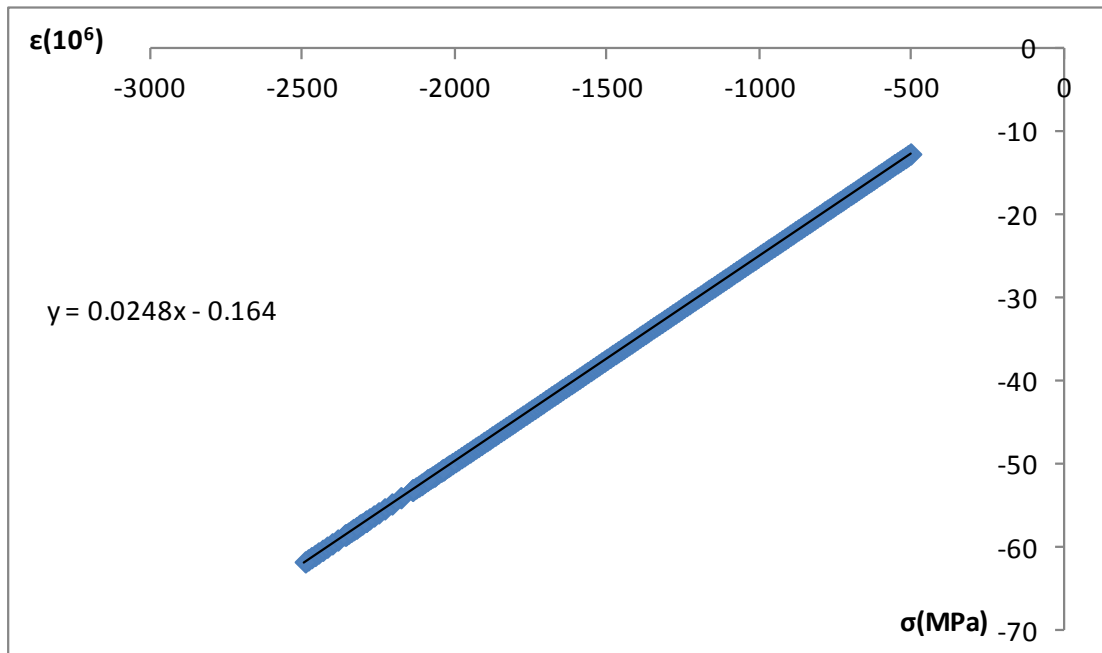
Εικόνα Β 5.2: Διάγραμμα τάσης- λυγισμού Β1-1



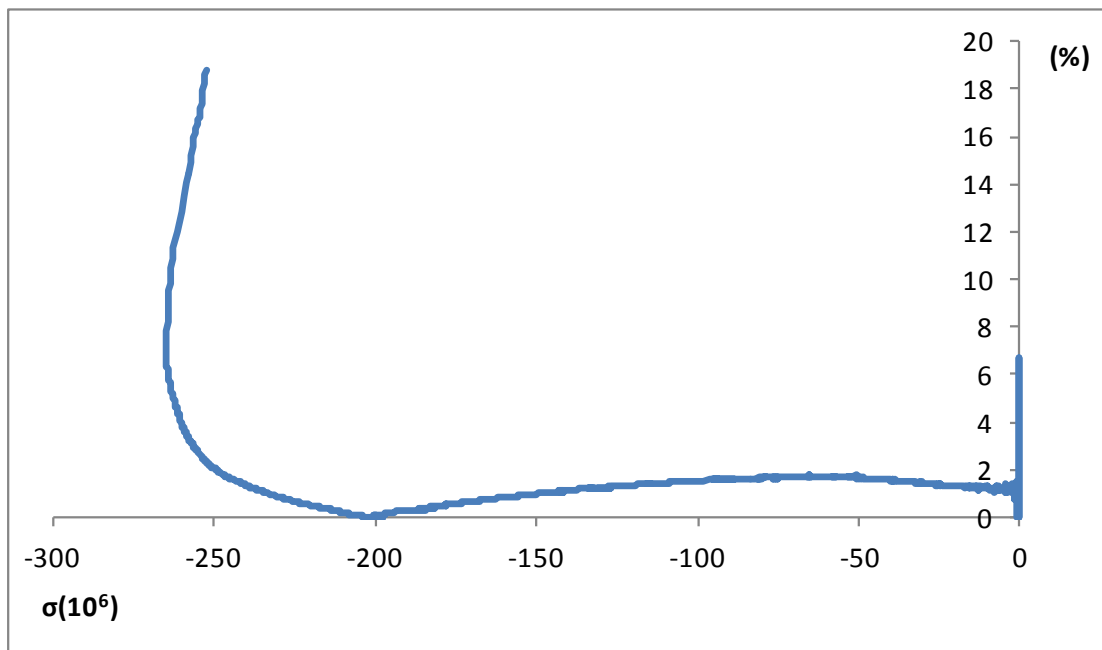
Εικόνα Β 5.3: Διάγραμμα σ - ϵ Β1-2



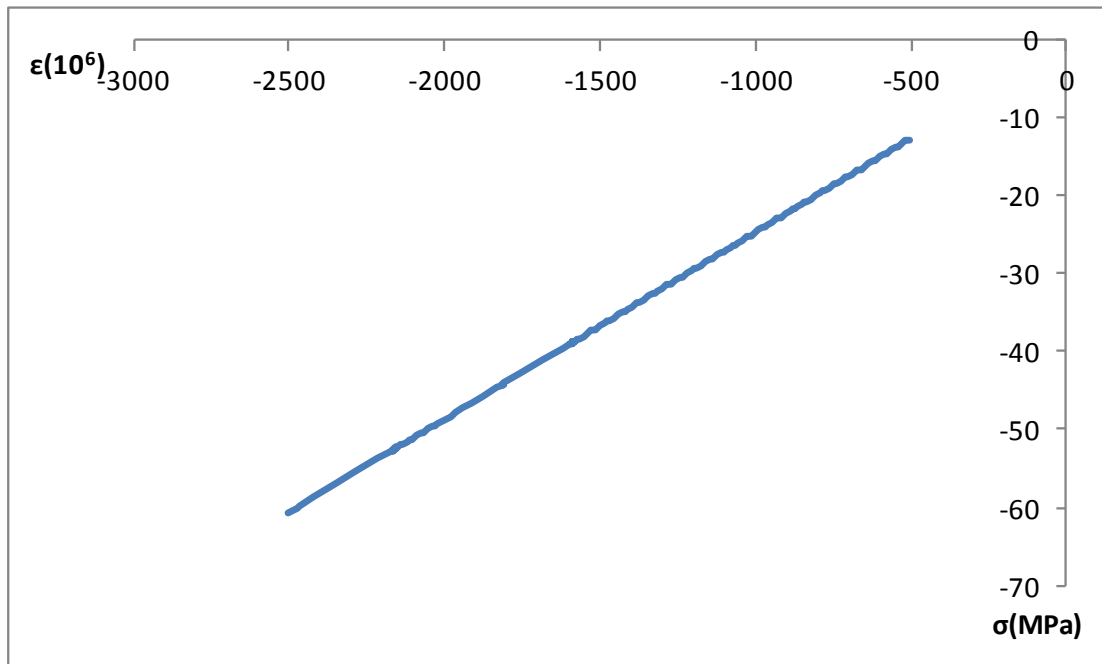
Εικόνα Β 5.4: Διάγραμμα τάσης- λυγισμού Β1-2



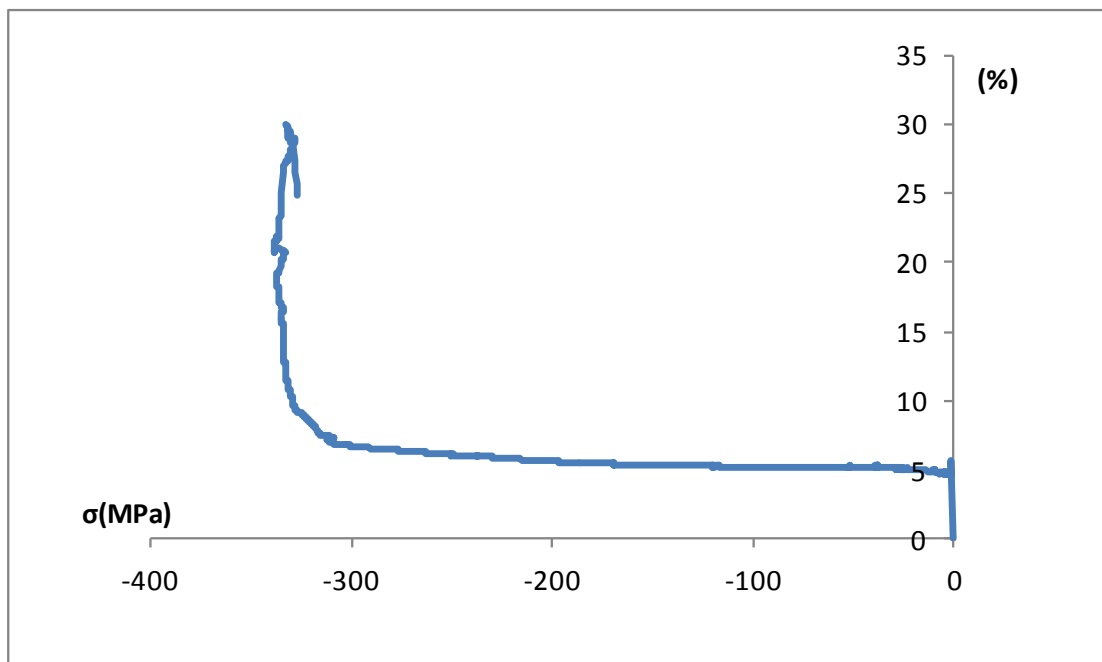
Εικόνα Β 5.5: Διάγραμμα σ - ϵ Β1-3



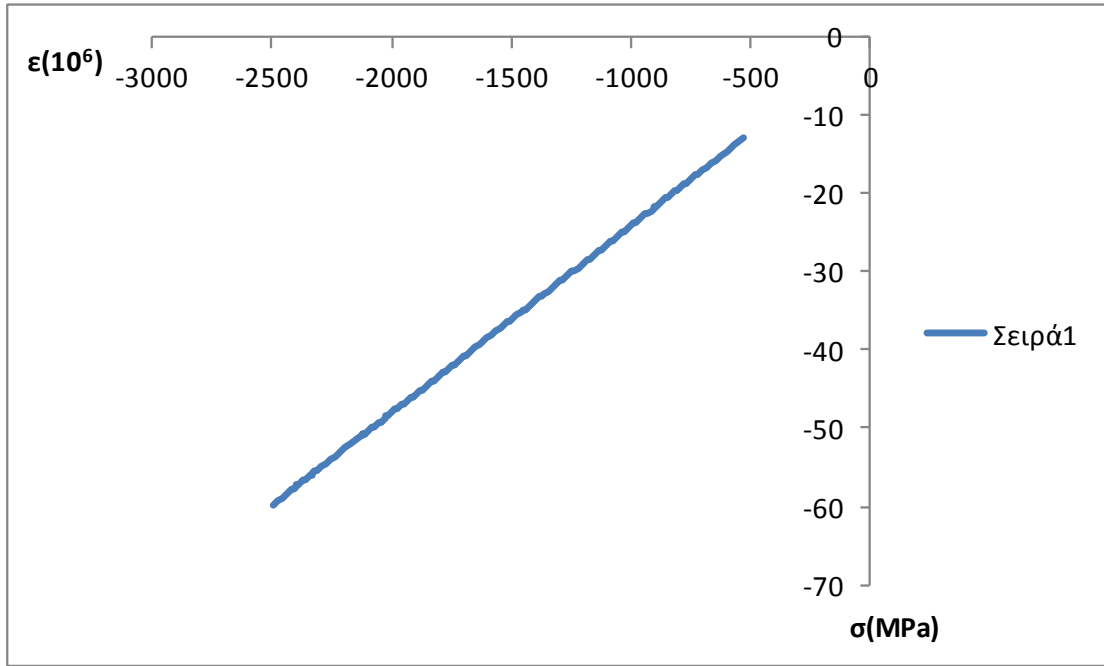
Εικόνα Β 5.6: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β1-3



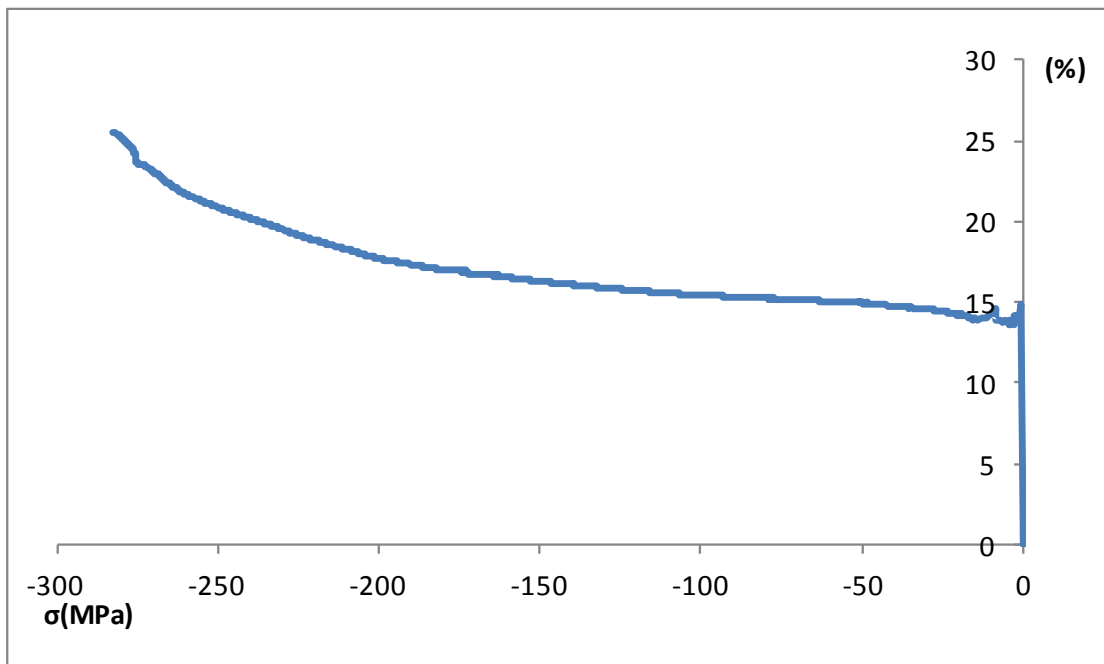
Εικόνα Β 5.7: Διάγραμμα σ - ϵ Β1-4



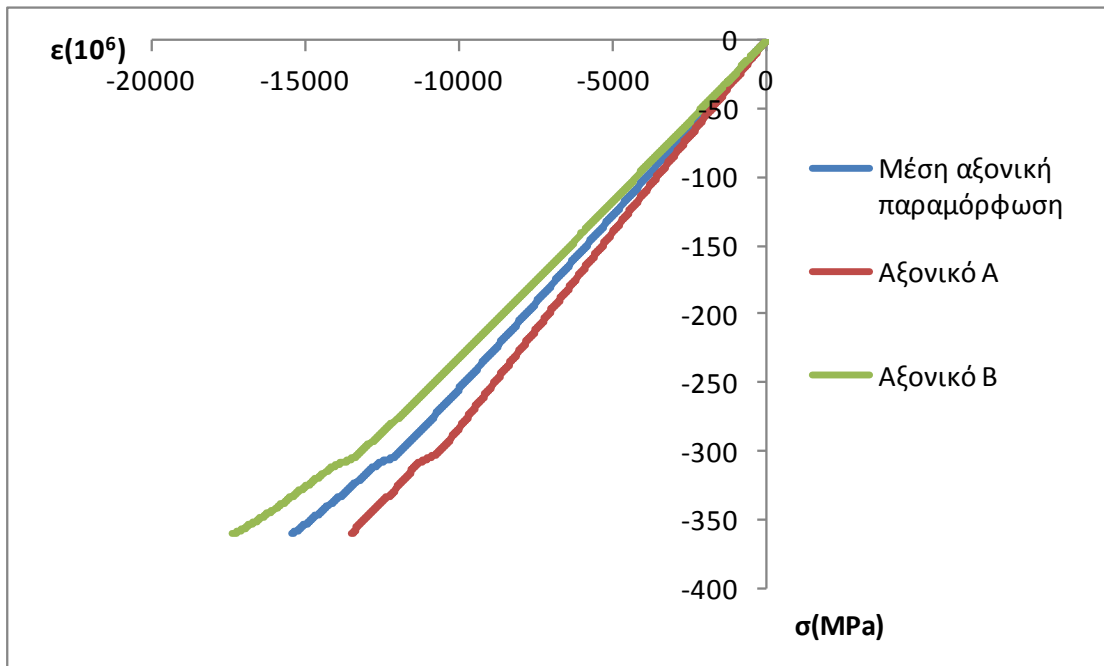
Εικόνα Β 5.8: Διάγραμμα τάσης- λυγισμού Β1-4



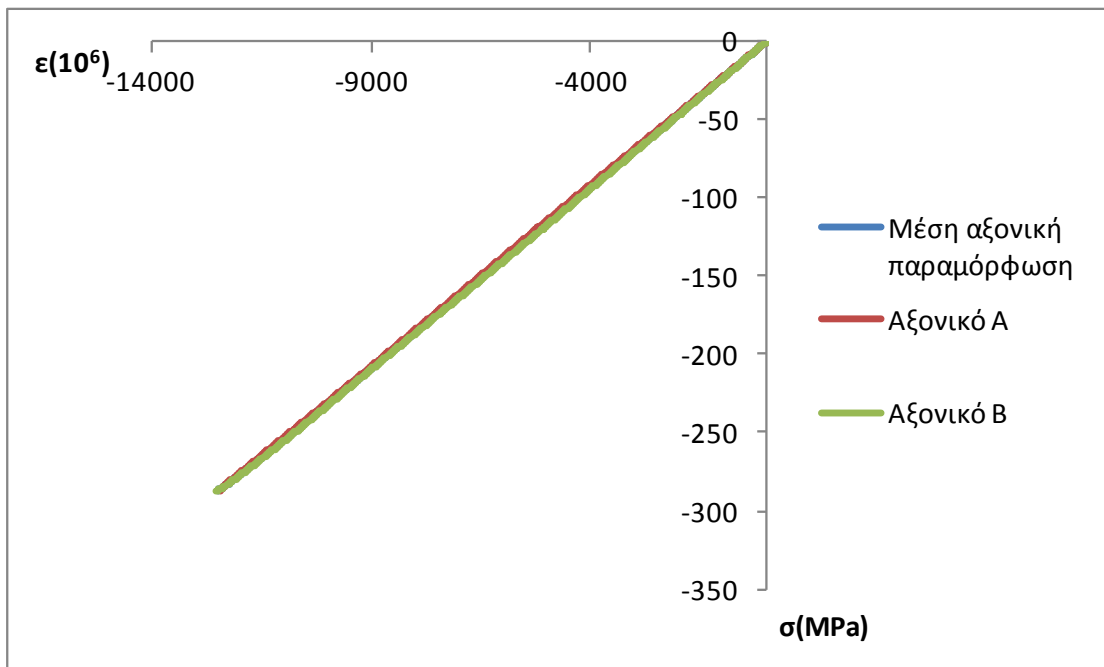
Εικόνα Β 5.9: Διάγραμμα σ - ϵ B1-5



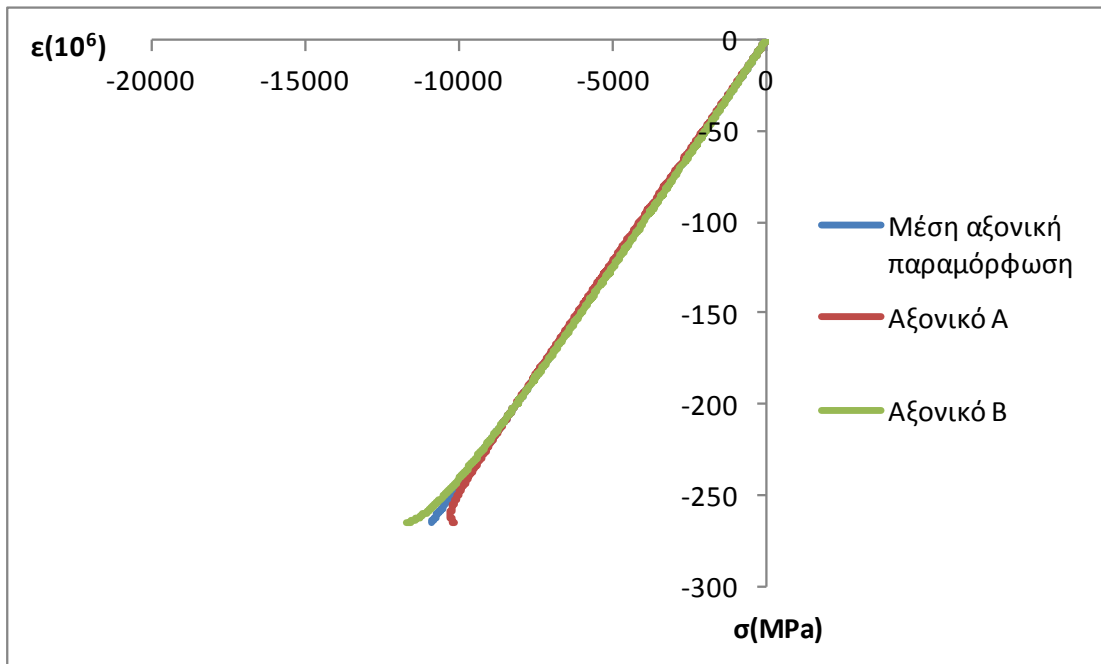
Εικόνα Β 5.10: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B1-5



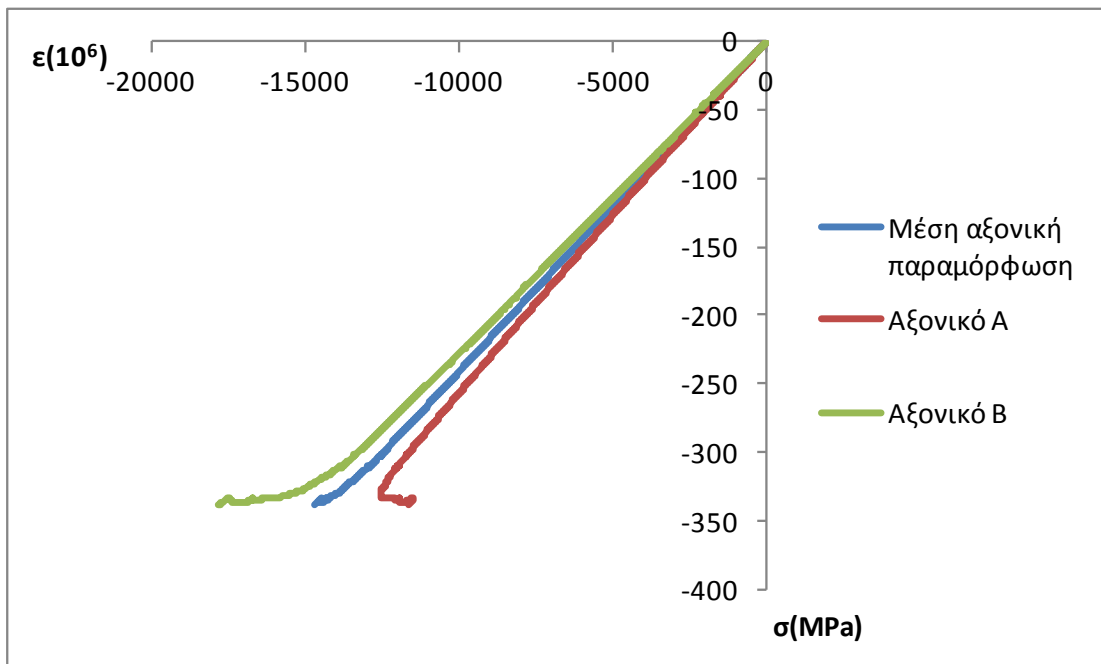
Εικόνα Β 5.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1-1



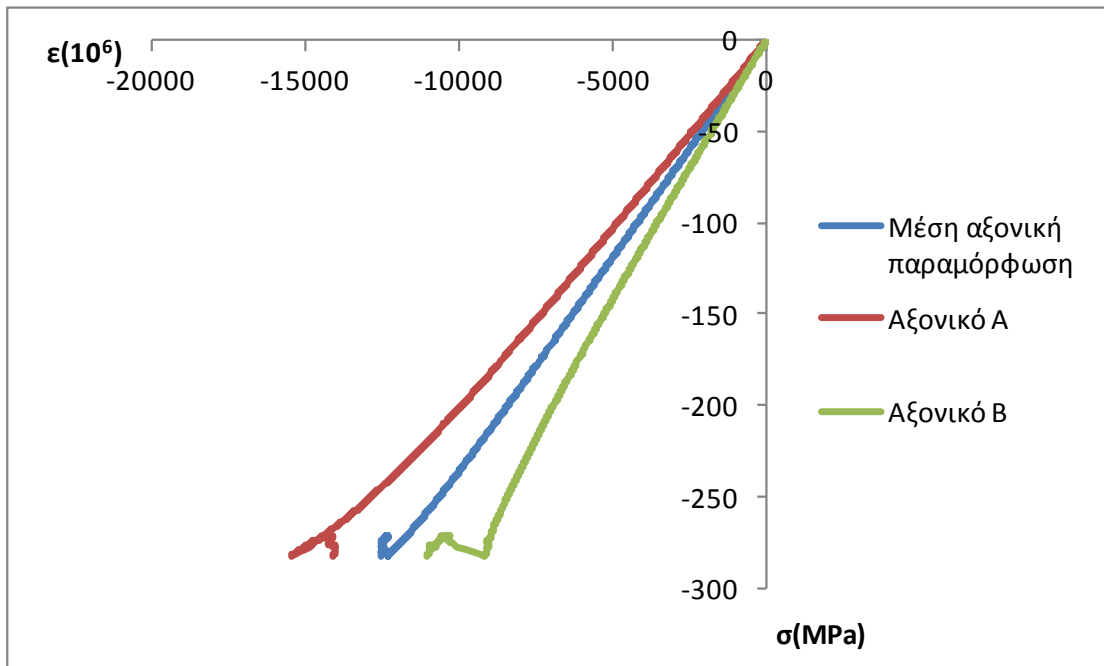
Εικόνα Β 5.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1-2



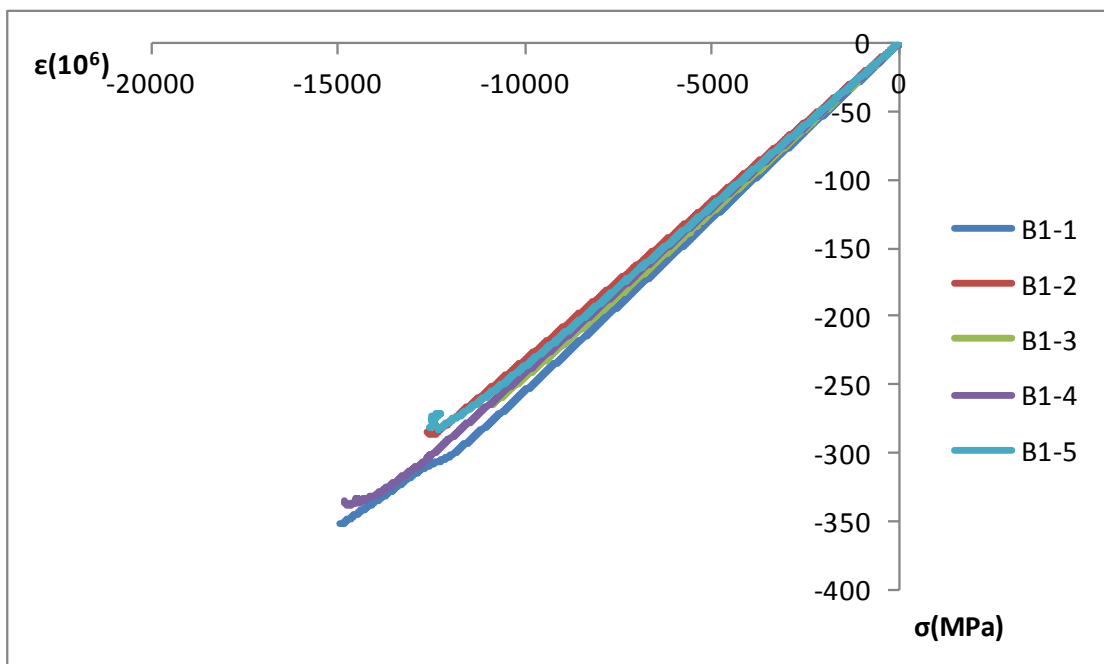
Εικόνα B5.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1-3



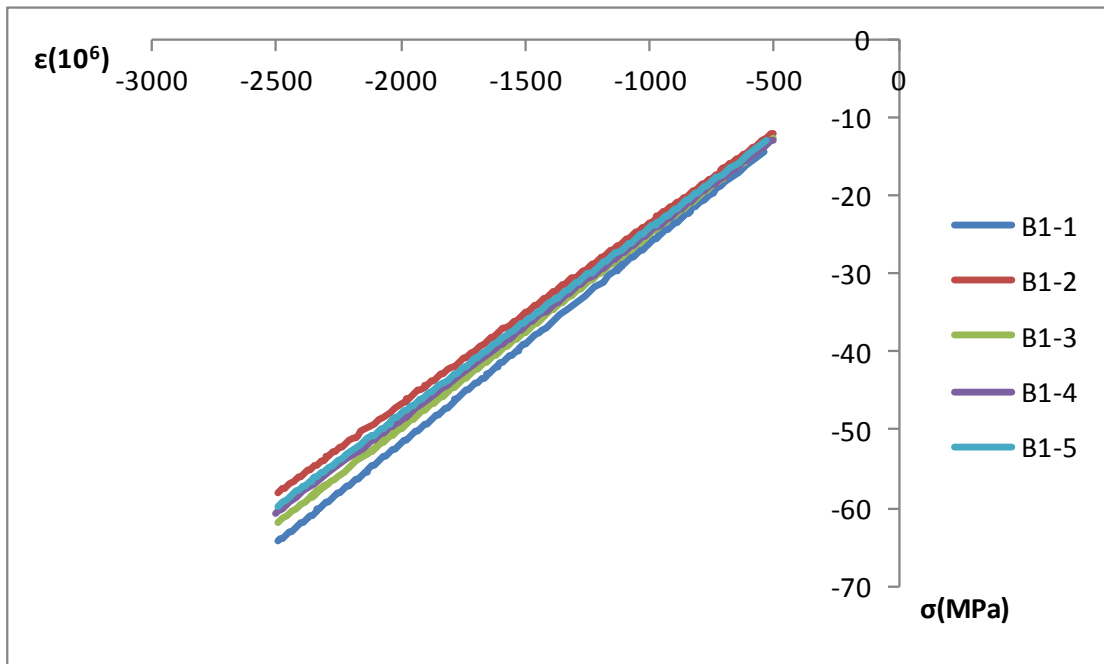
Εικόνα B 5.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1-4



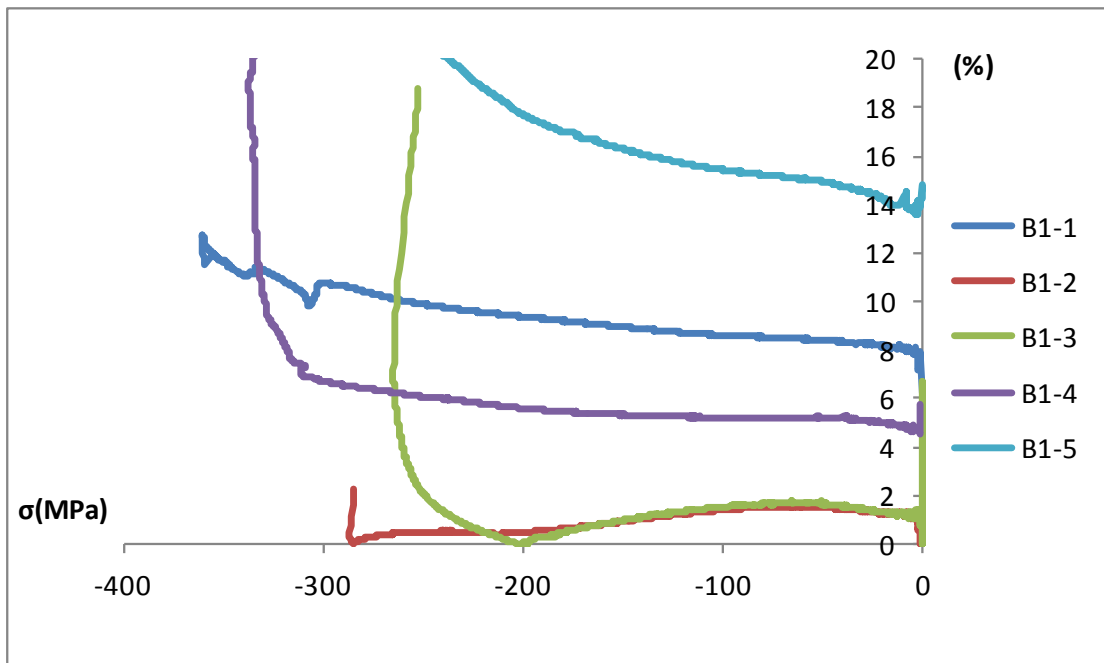
Εικόνα Β 5.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1-5



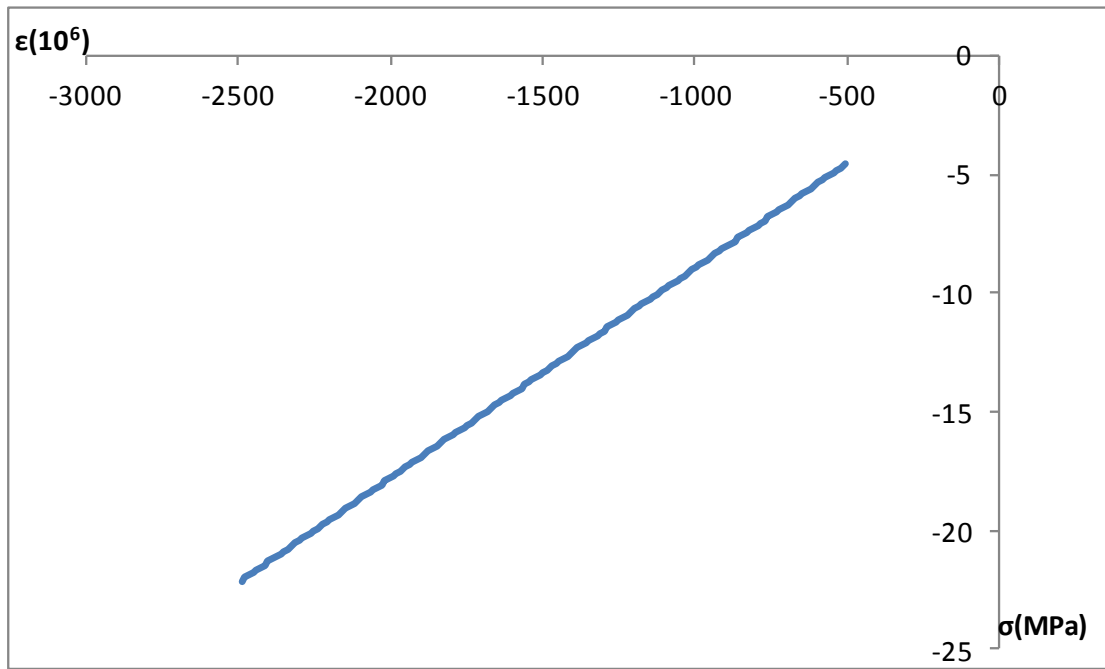
Εικόνα Β 5.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1



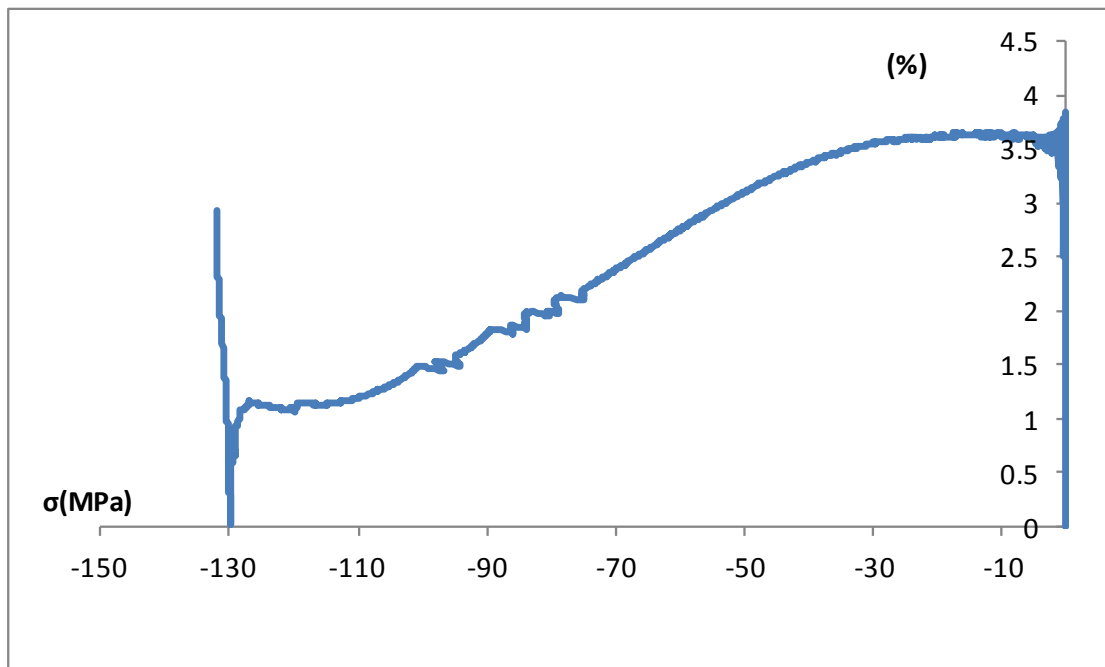
Εικόνα Β 5.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B1 (500-2500)



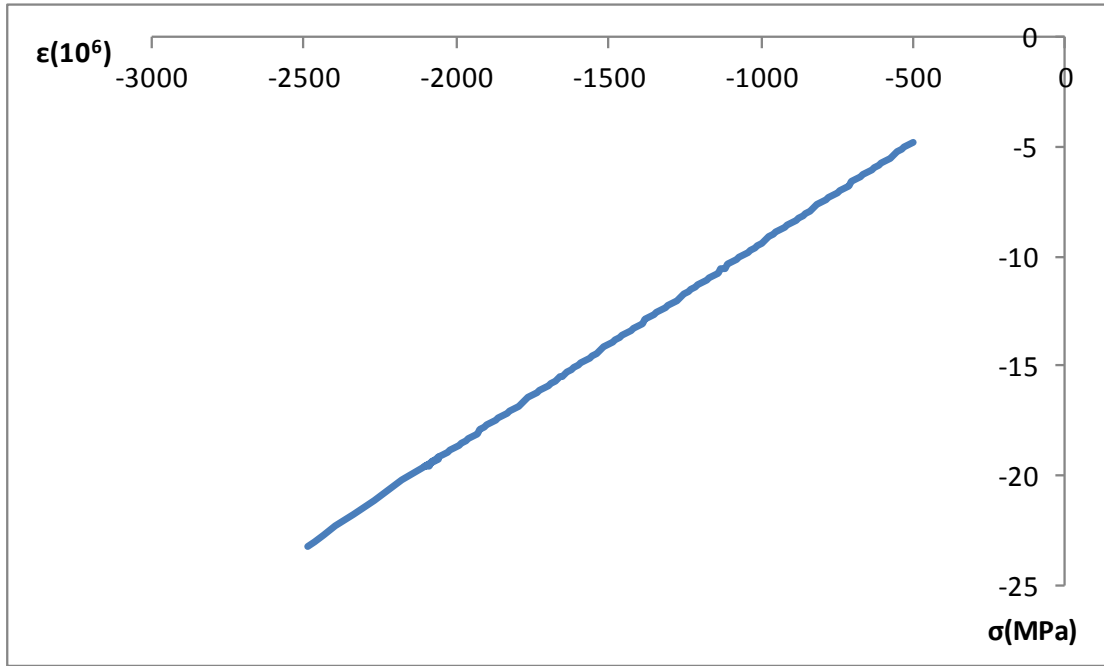
Εικόνα Β 5.18: Συνολικό διάγραμμα τάσης-λυγισμού B1



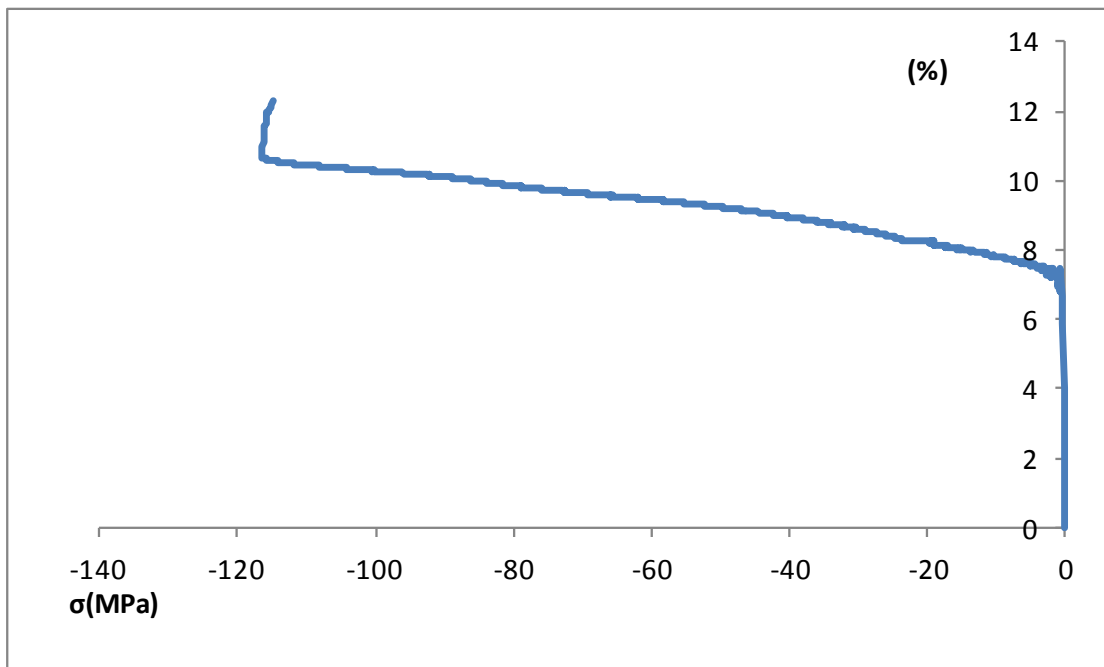
Εικόνα Β 5.19: Διάγραμμα σ - ϵ B2-1



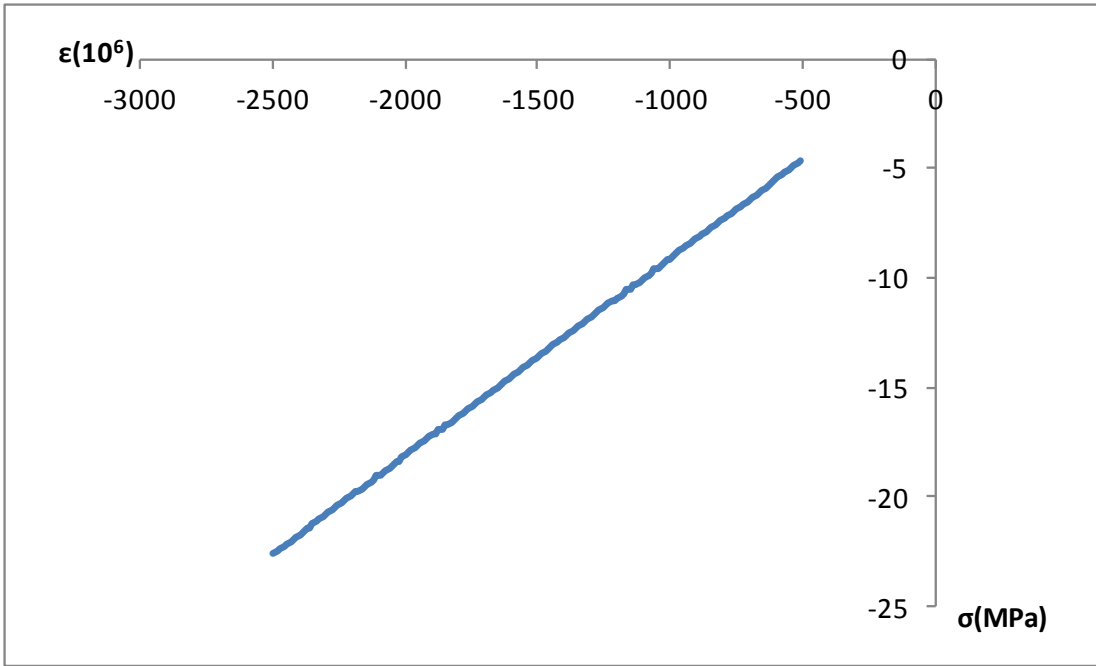
Εικόνα Β 5.20: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B2



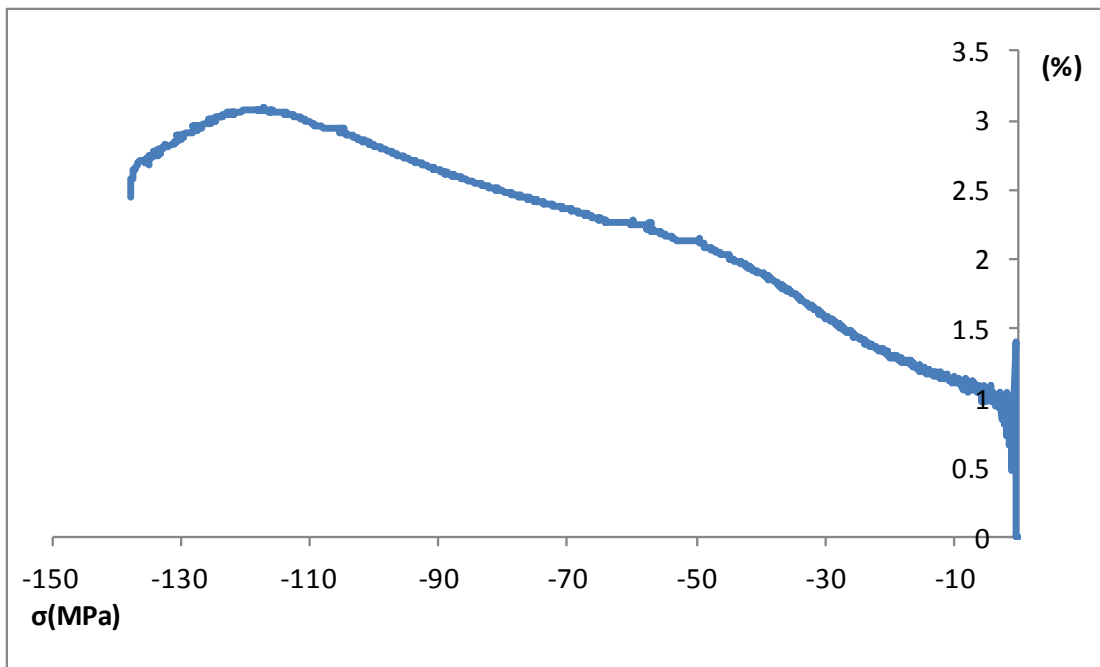
Εικόνα Β 6.1: Διάγραμμα σ - ϵ B2-2



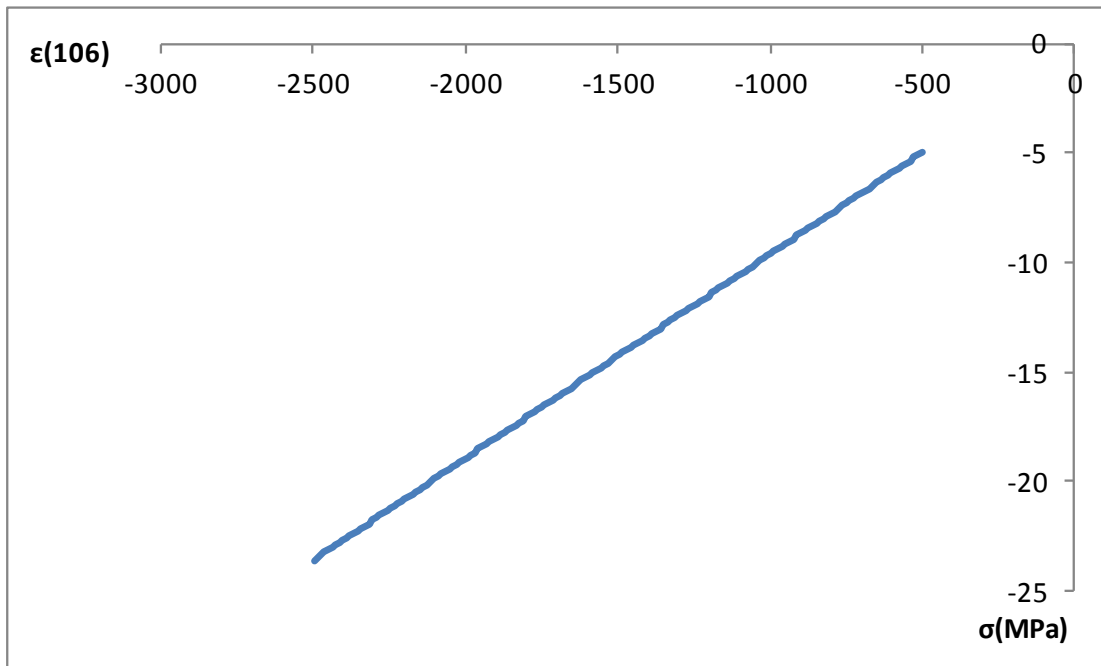
Εικόνα Β 6.2: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B2-2



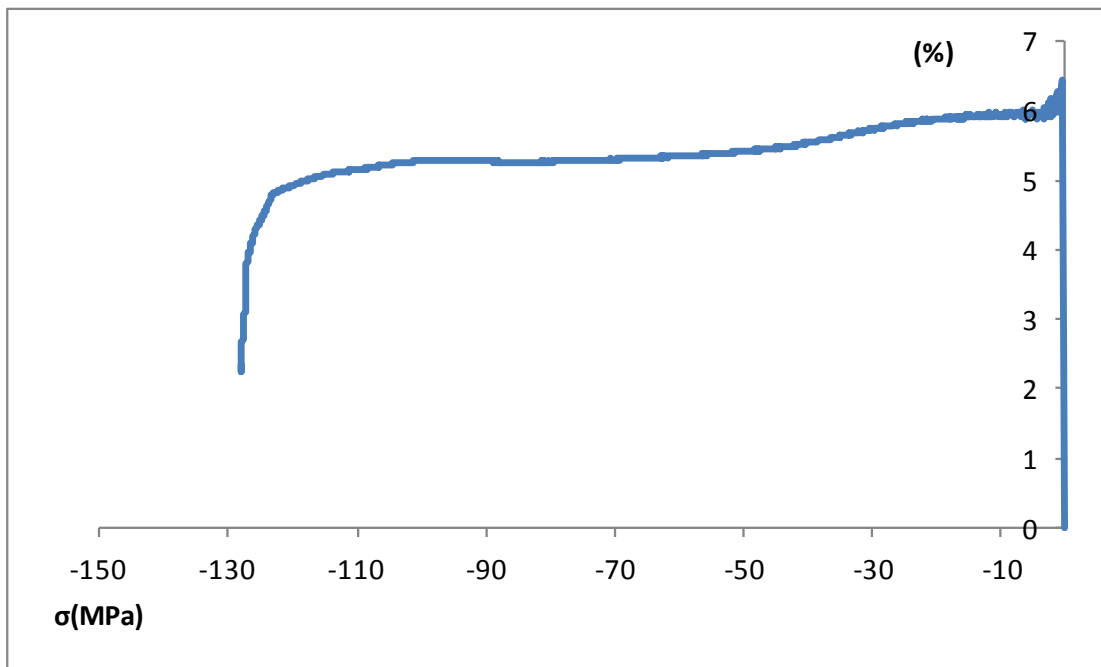
Εικόνα Β.6.3.: Διάγραμμα σ - ϵ Β2-3



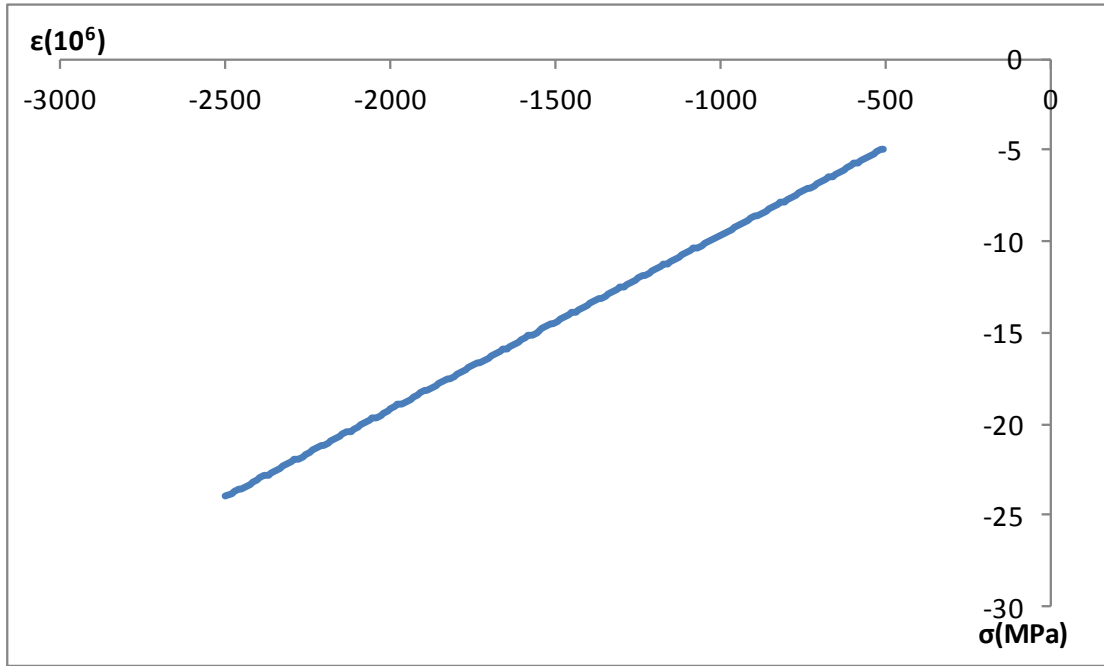
Εικόνα Β 6.4: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β2-3



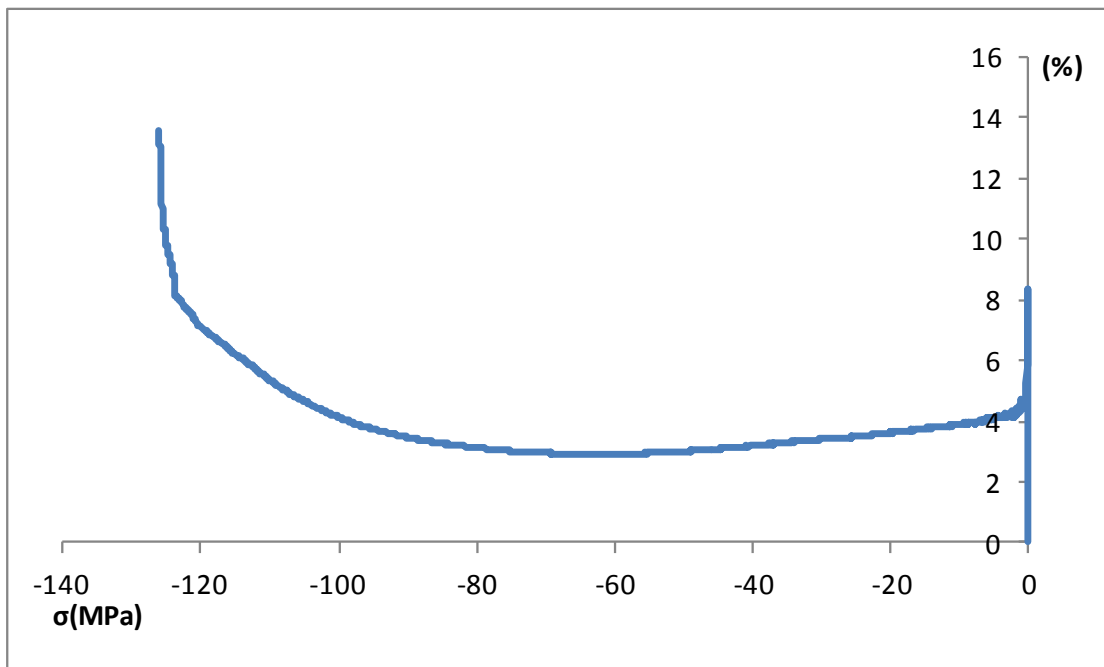
Εικόνα Β 6.5: Διάγραμμα σ - ϵ B2-4



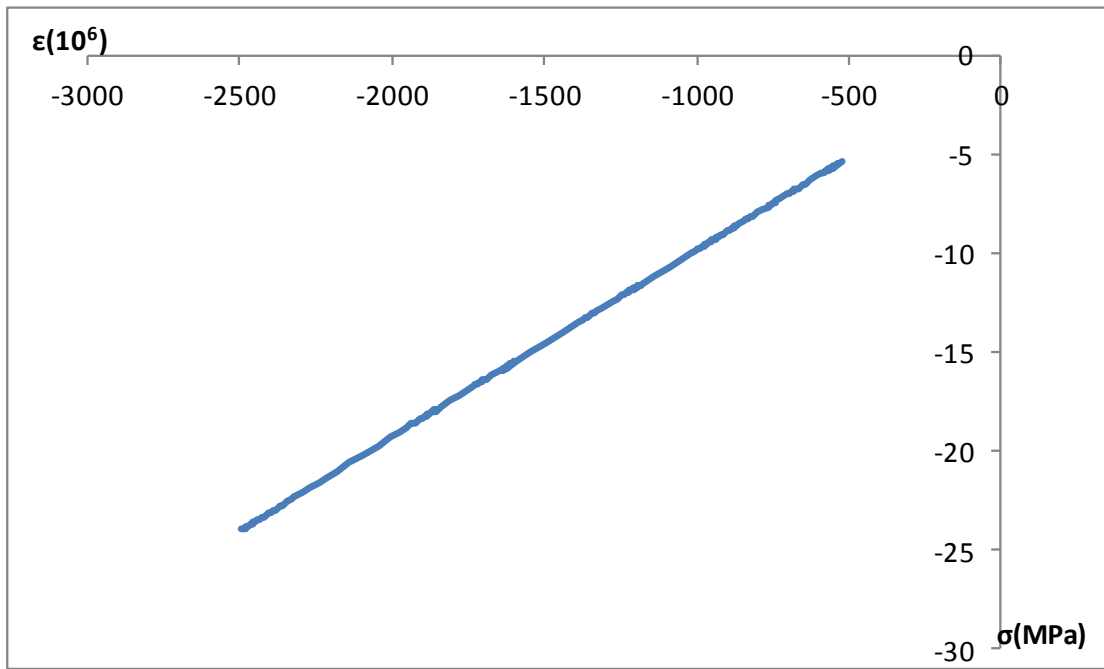
Εικόνα Β 6.6: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B2-4



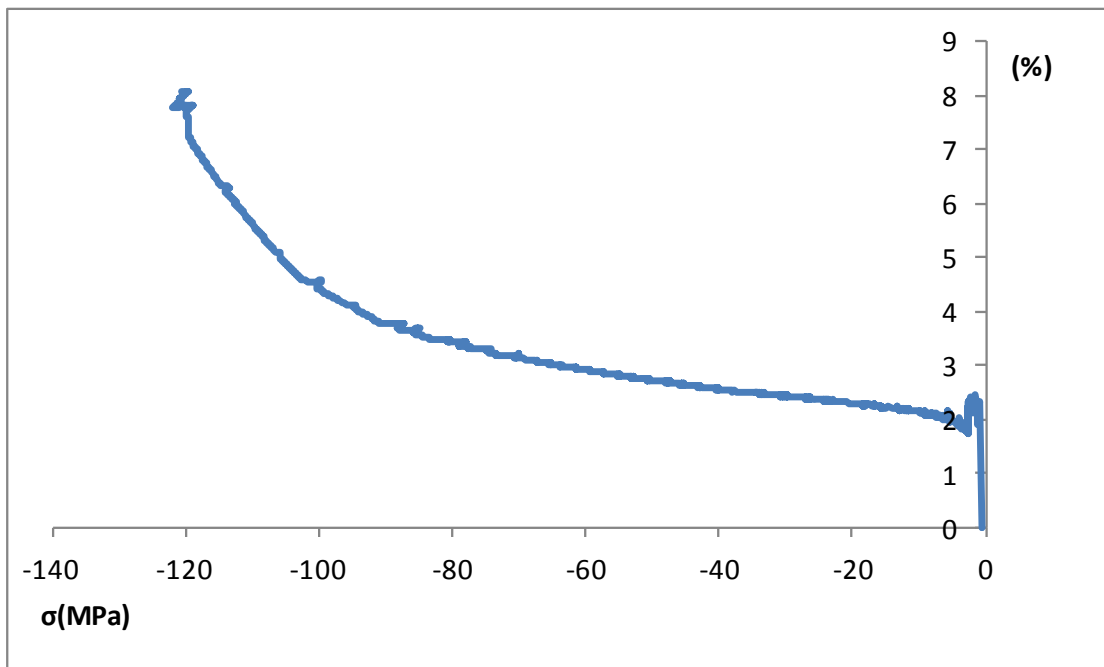
Εικόνα Β 6.7: Διάγραμμα σ - ϵ B2-5



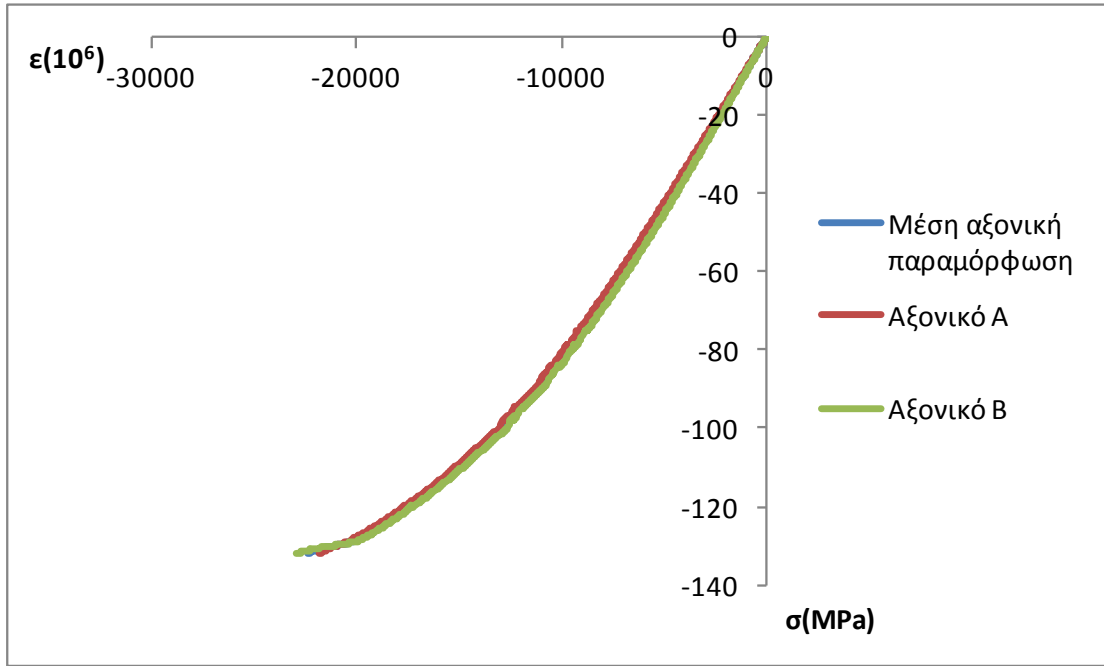
Εικόνα Β 6.8: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B2-5



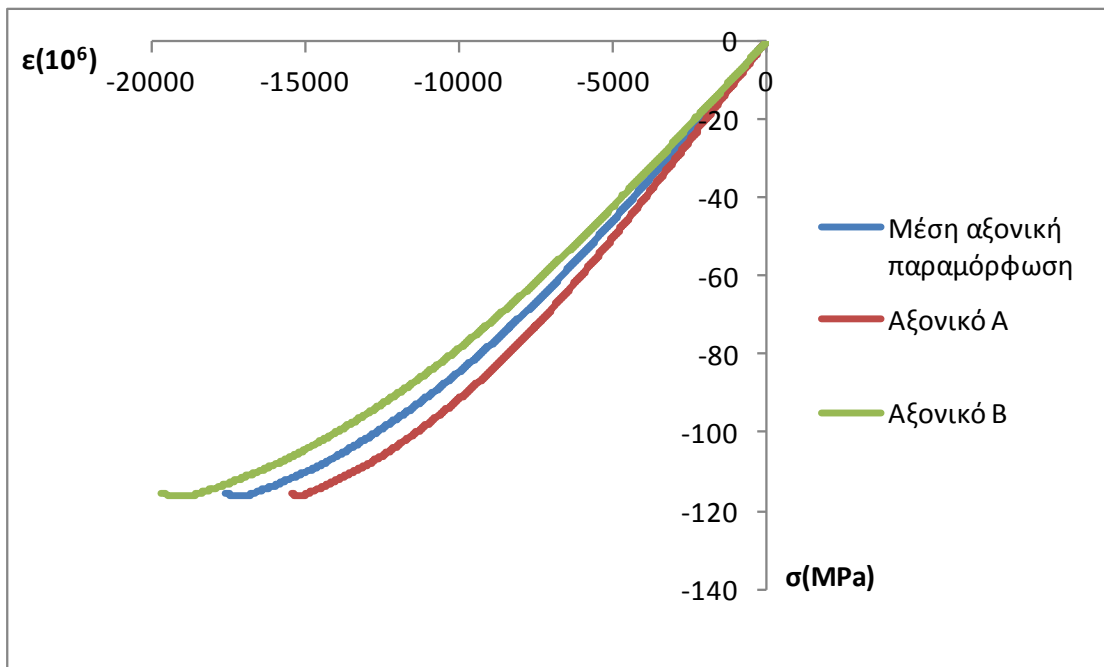
Εικόνα Β 6.9: Διάγραμμα σ - ϵ Β2-6



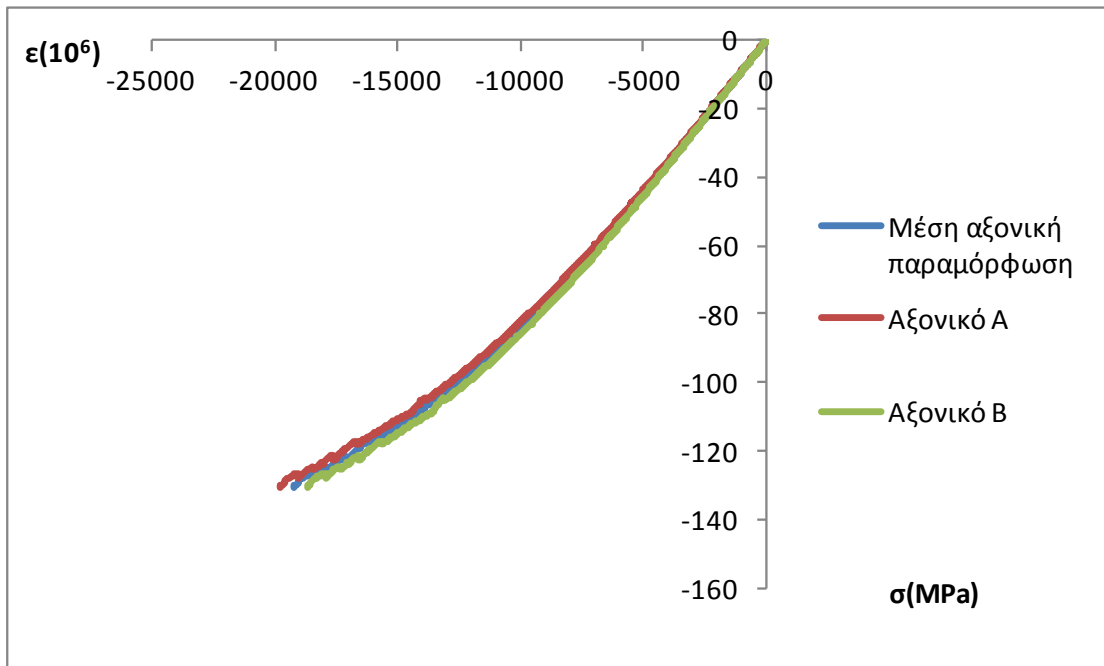
Εικόνα Β 6.10: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β2-6



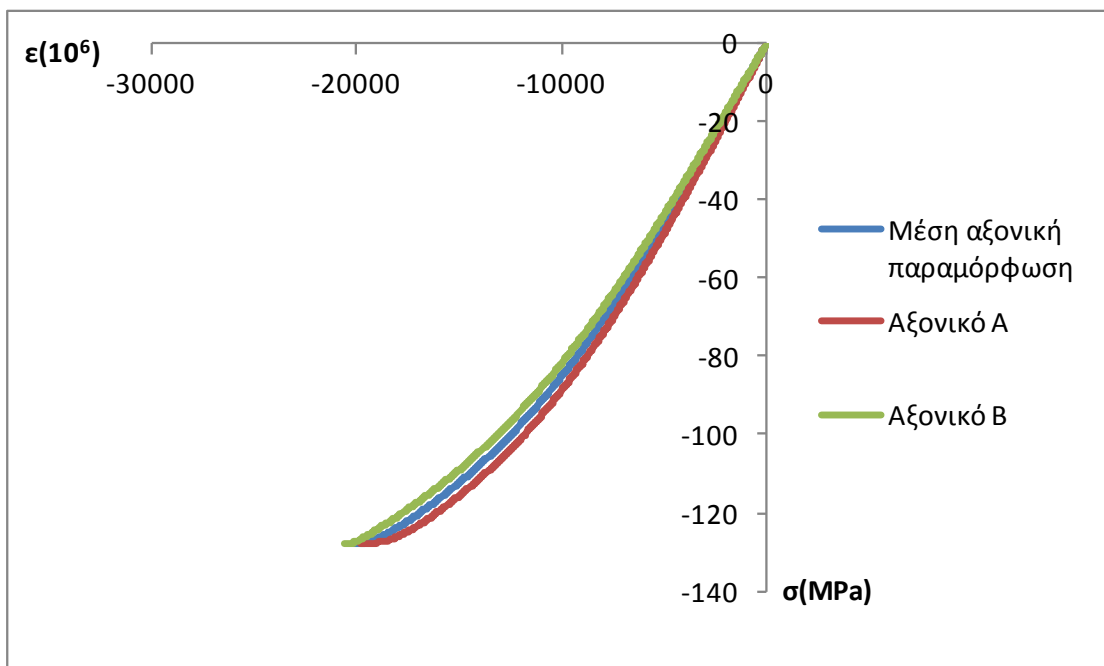
Εικόνα Β 6.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-1



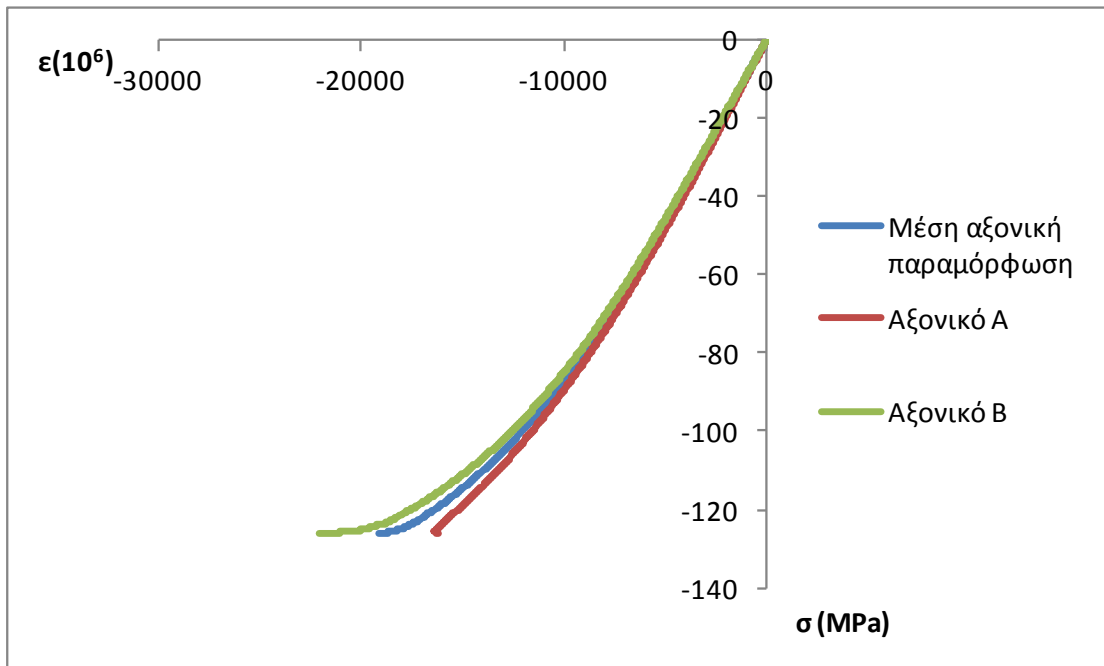
Εικόνα Β 6.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-2



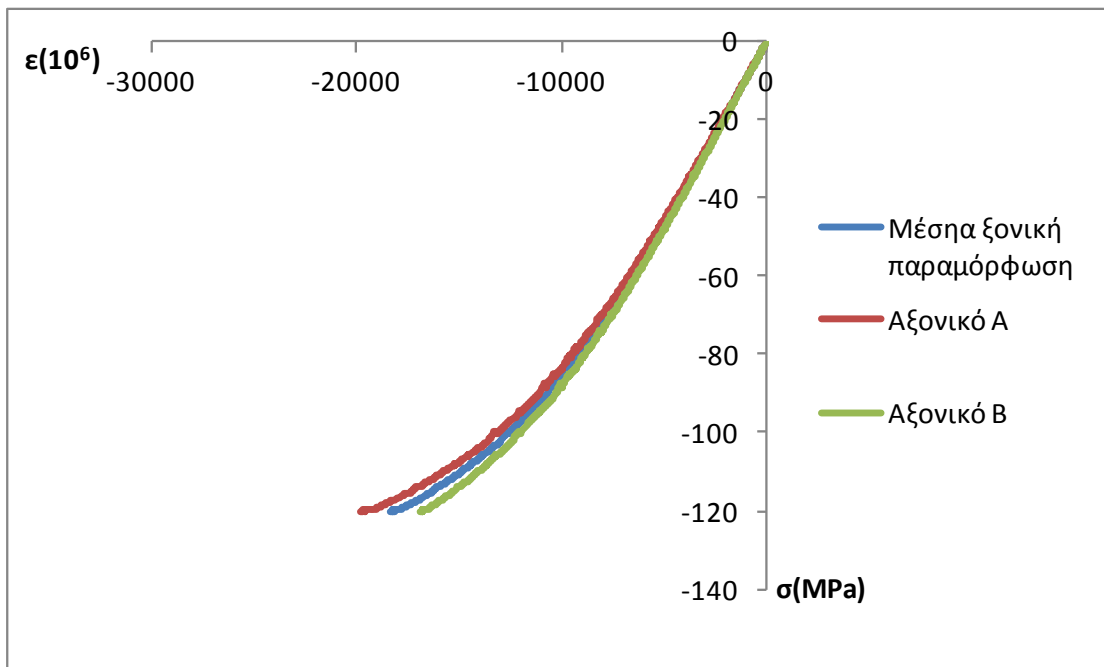
Εικόνα Β 6.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-3



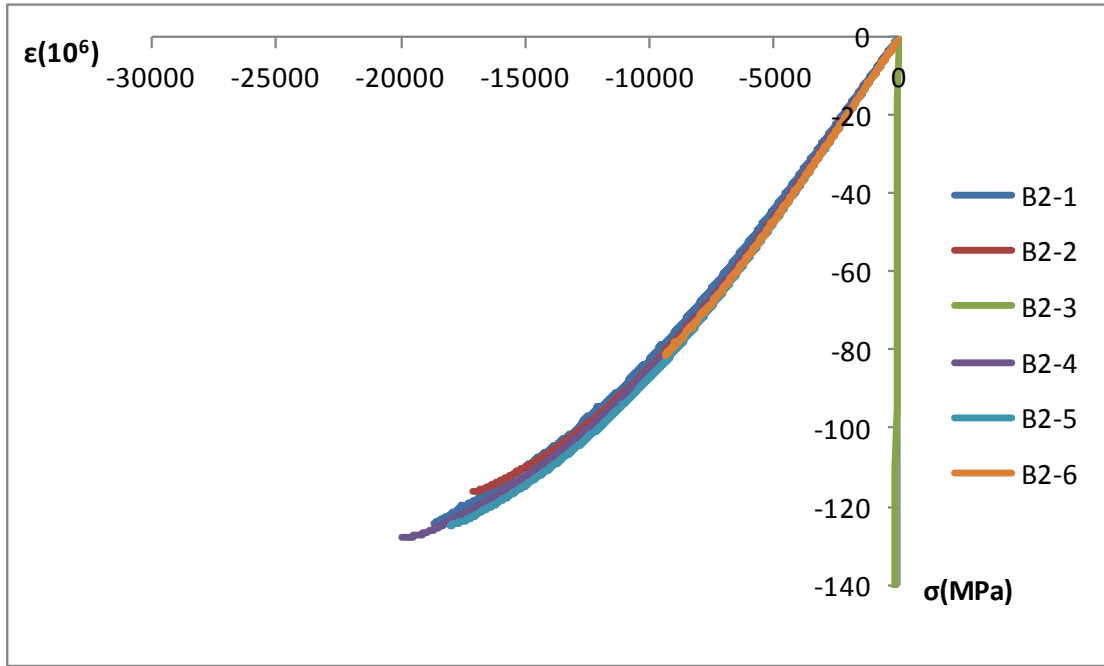
Εικόνα Β 6.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-4



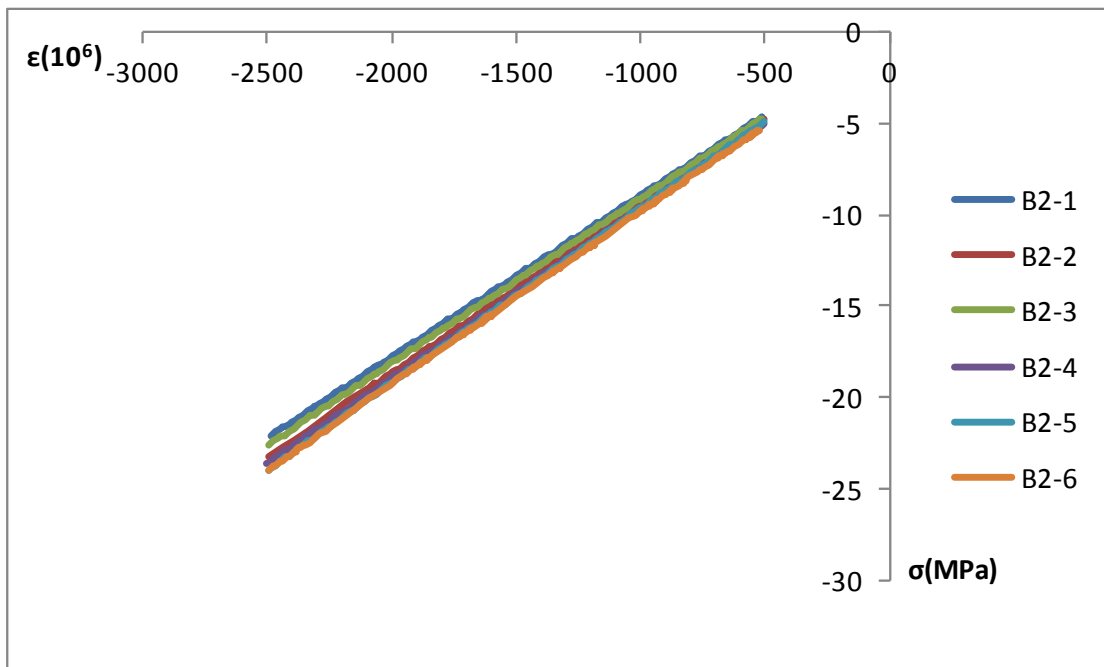
Εικόνα B.6.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-5



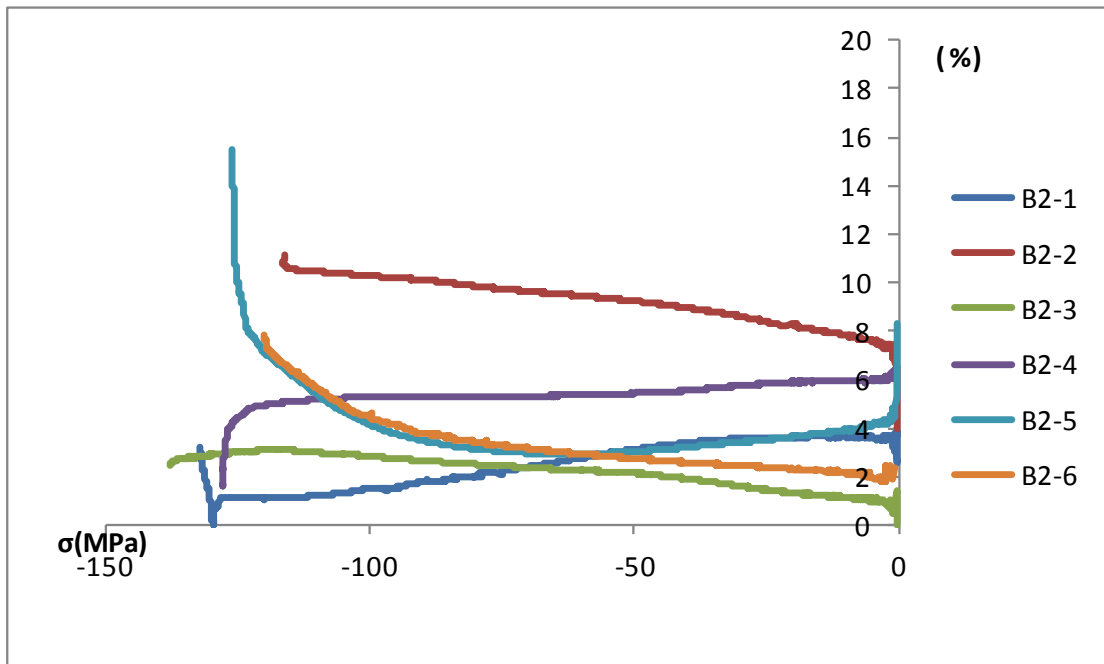
Εικόνα B 6.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2-6



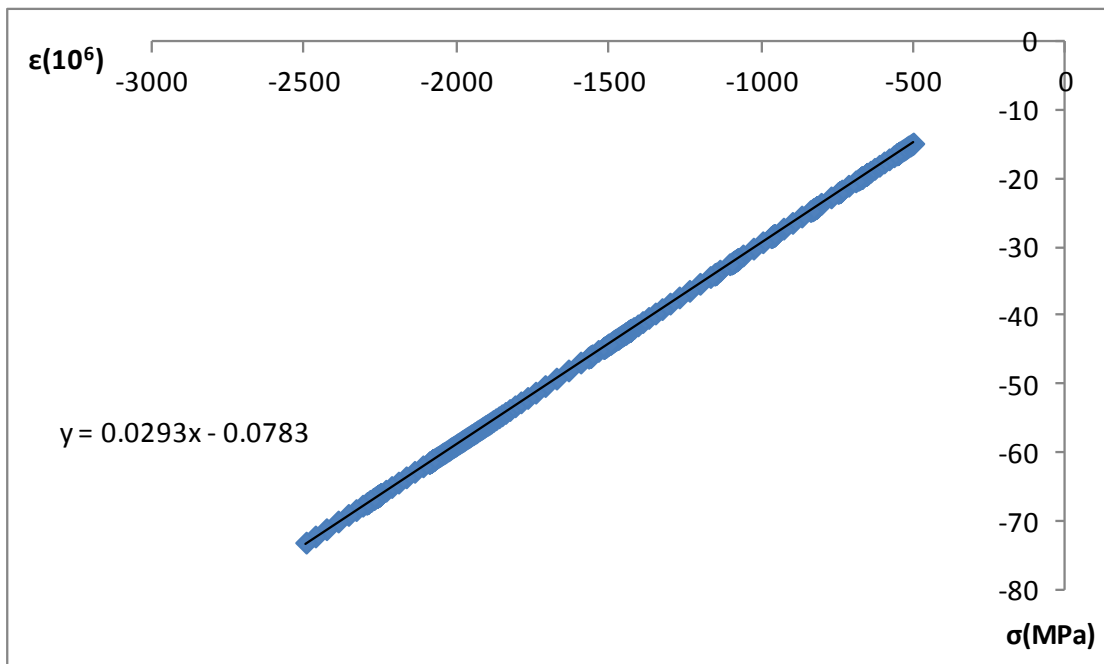
Εικόνα Β 6.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2



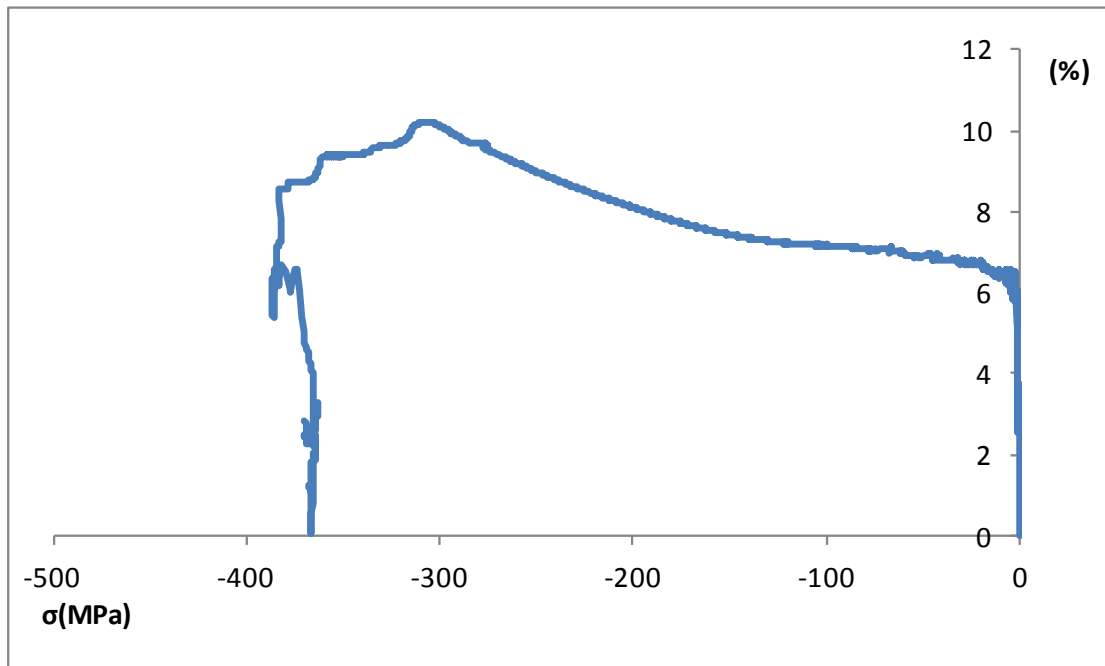
Εικόνα Β 6.18: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B2 (500-2500)



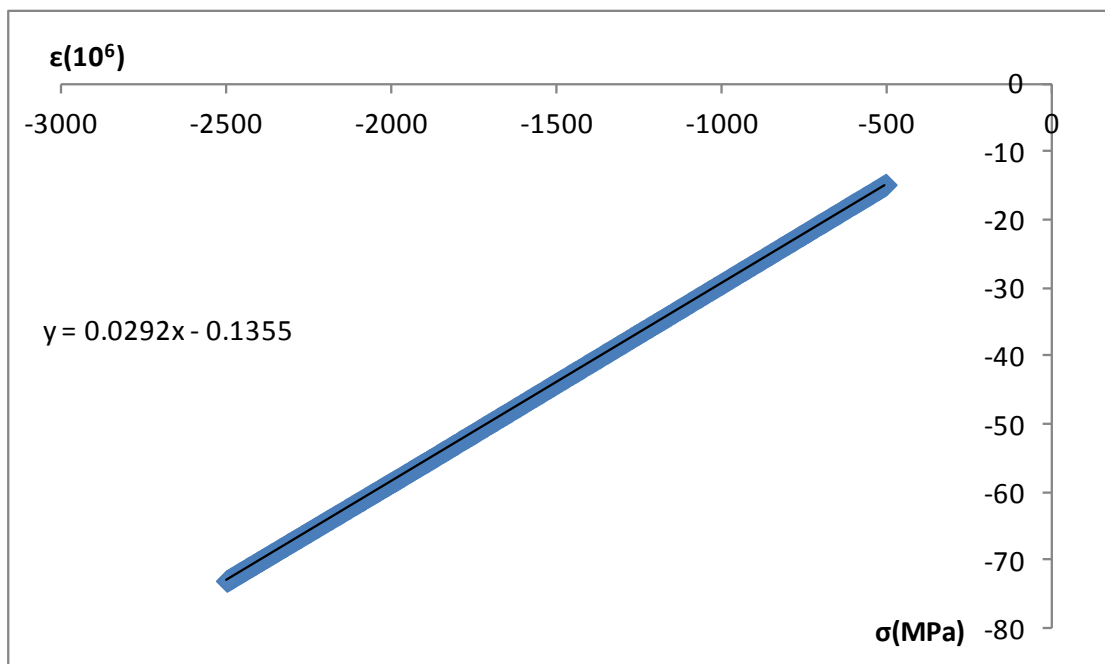
Εικόνα B.6.19: Συνολικό διάγραμμα τάσης-λυγισμού B2



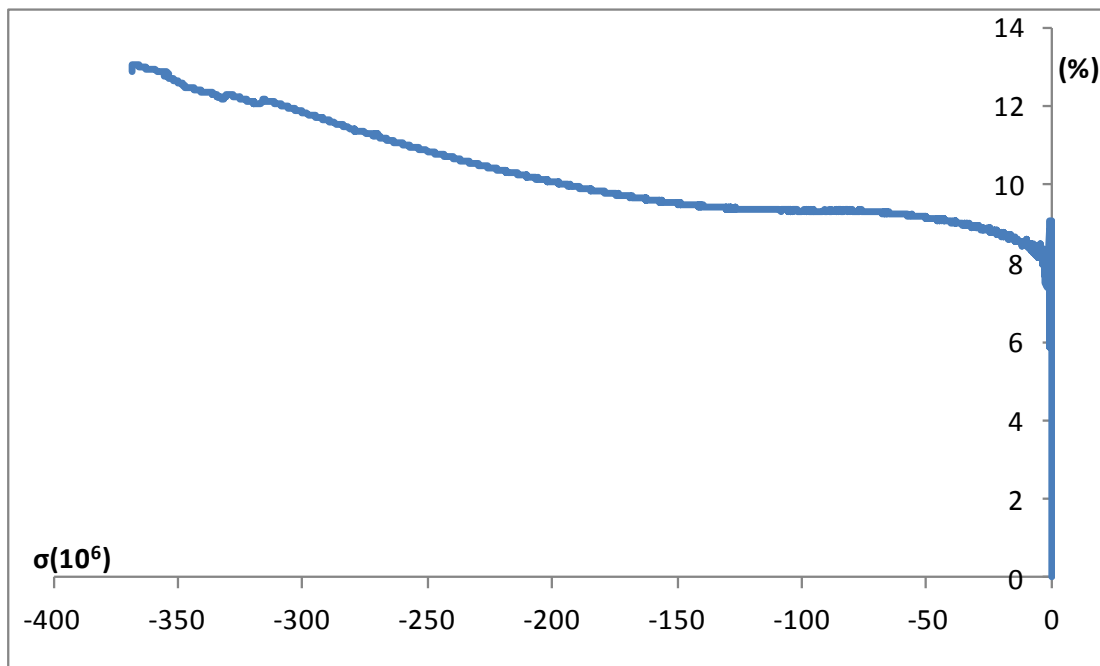
Εικόνα B.7.1: Διάγραμμα σ - ϵ B5-1



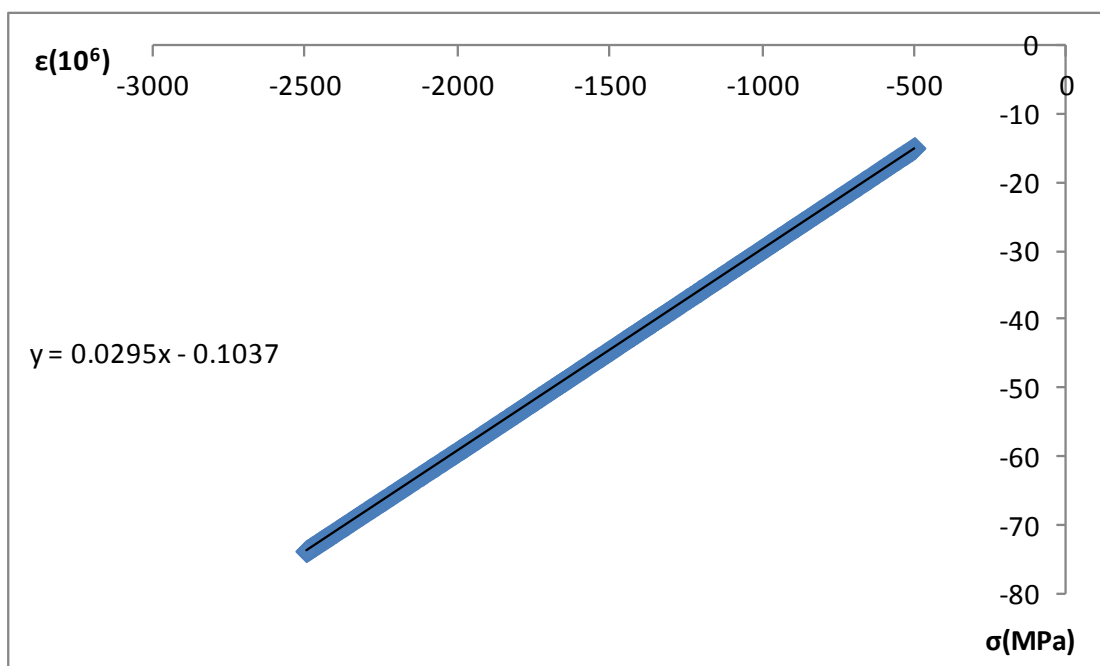
Εικόνα Β 7.2: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β5-1



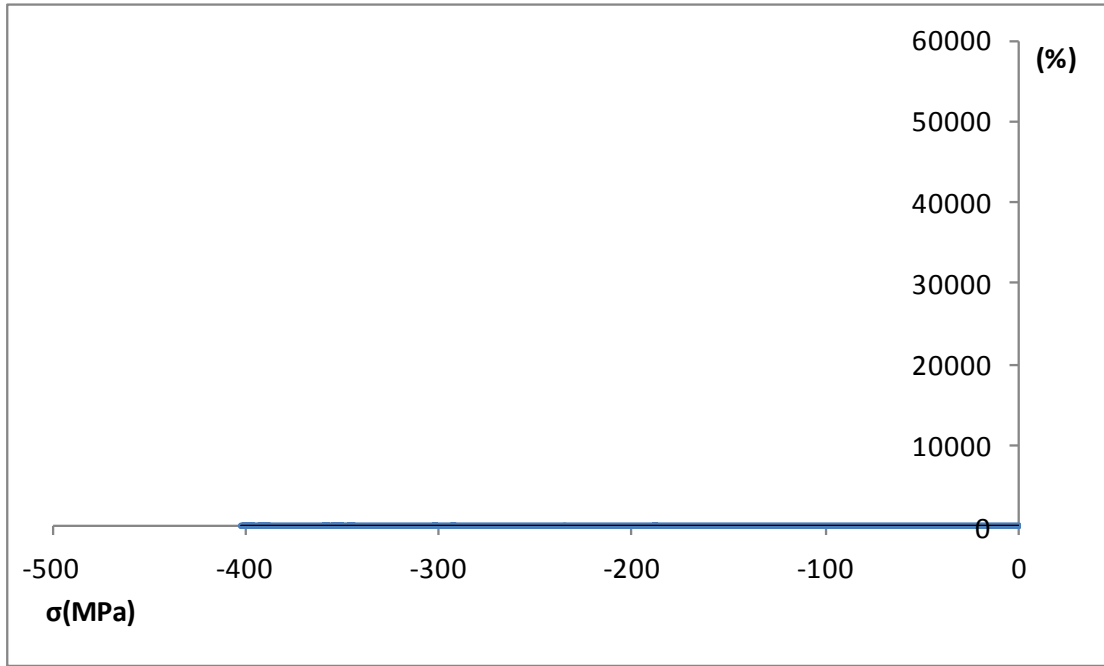
Εικόνα Β 7.3: Διάγραμμα σ - ϵ Β5-2



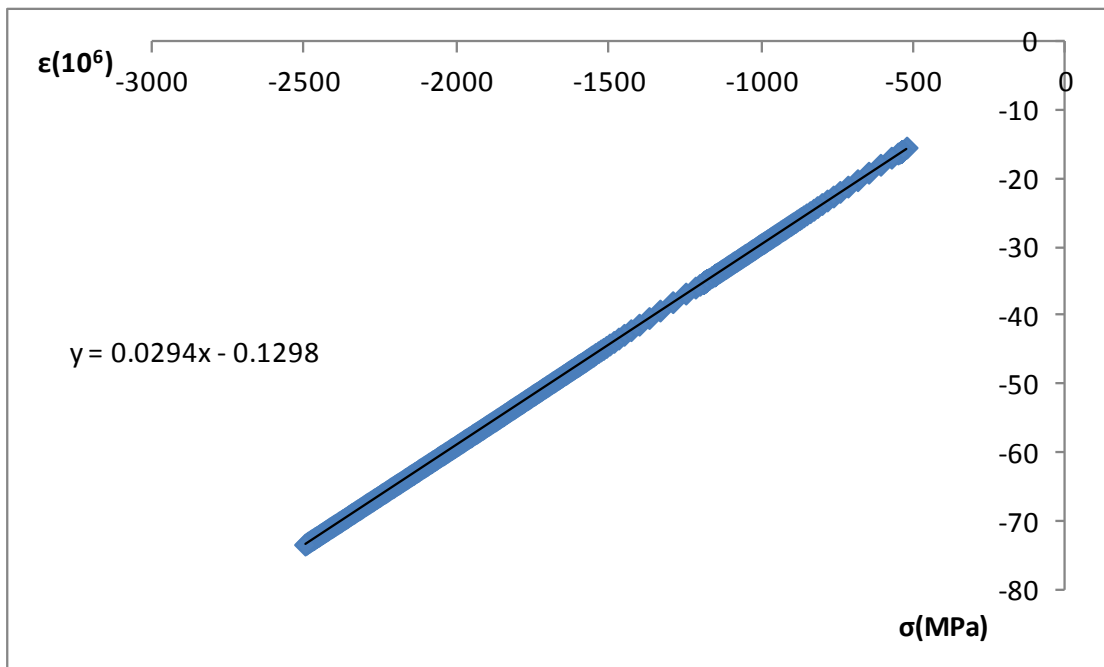
Εικόνα Β 7.4: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β5-2



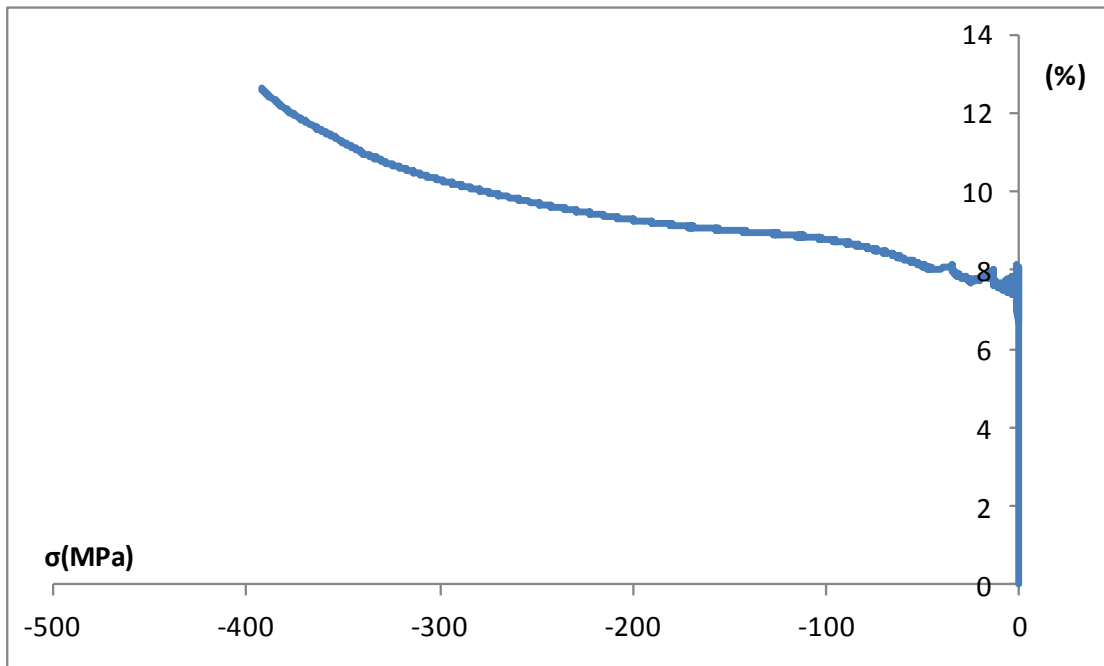
Εικόνα Β 7.5: Διάγραμμα σ - ϵ Β5-3



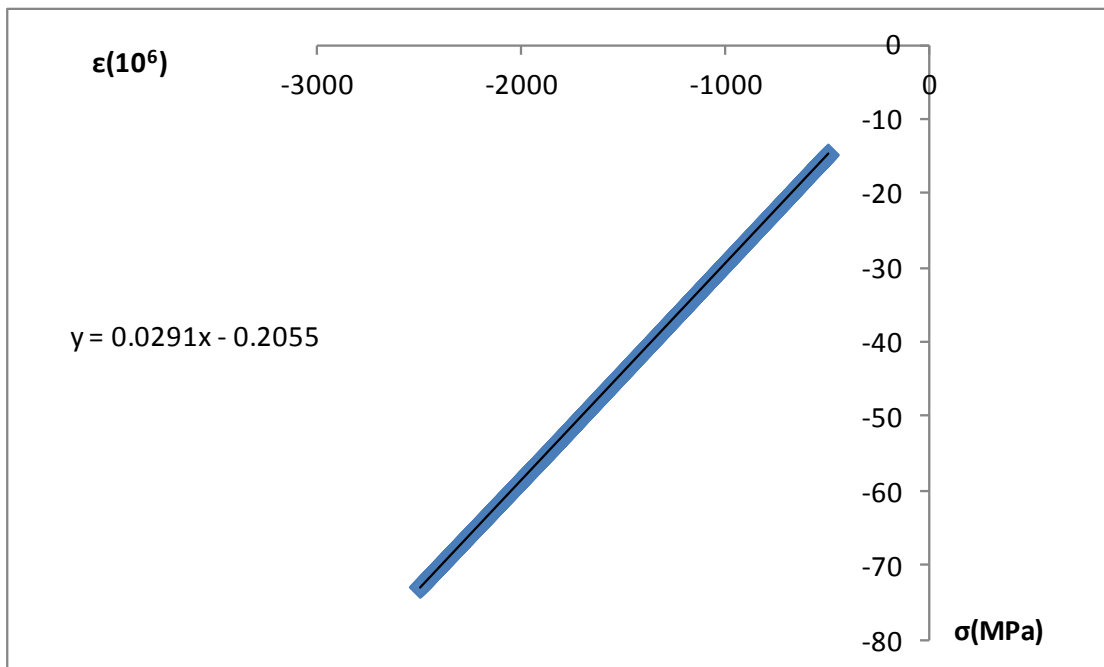
Εικόνα B 7.6: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού B5-3



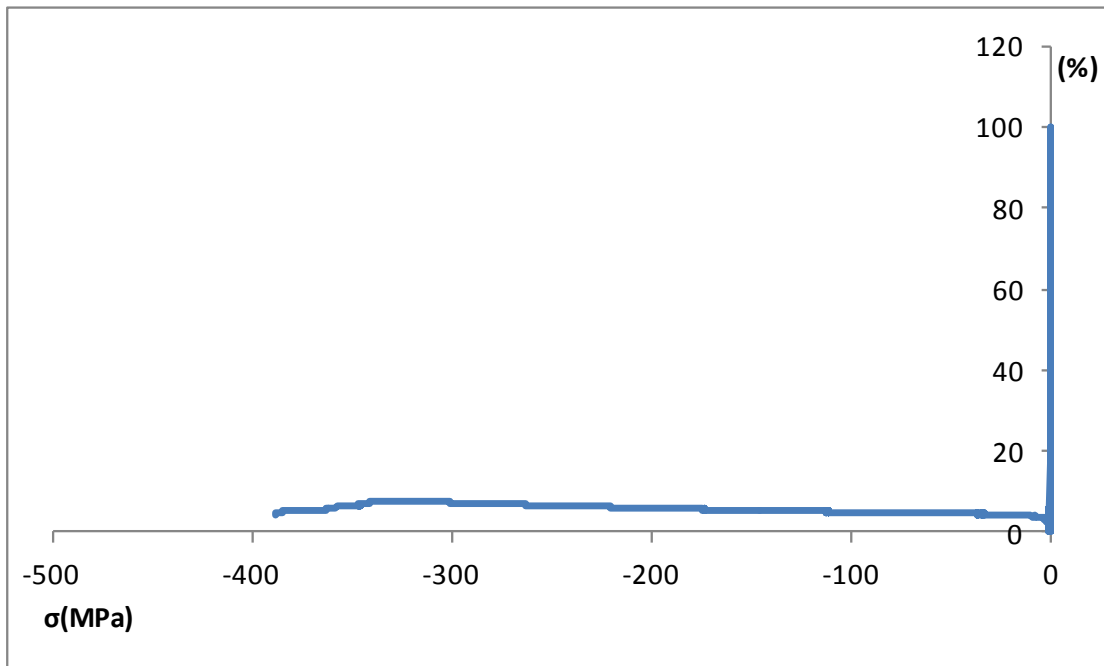
Εικόνα B 7.7: Διάγραμμα σ - ϵ B5-4



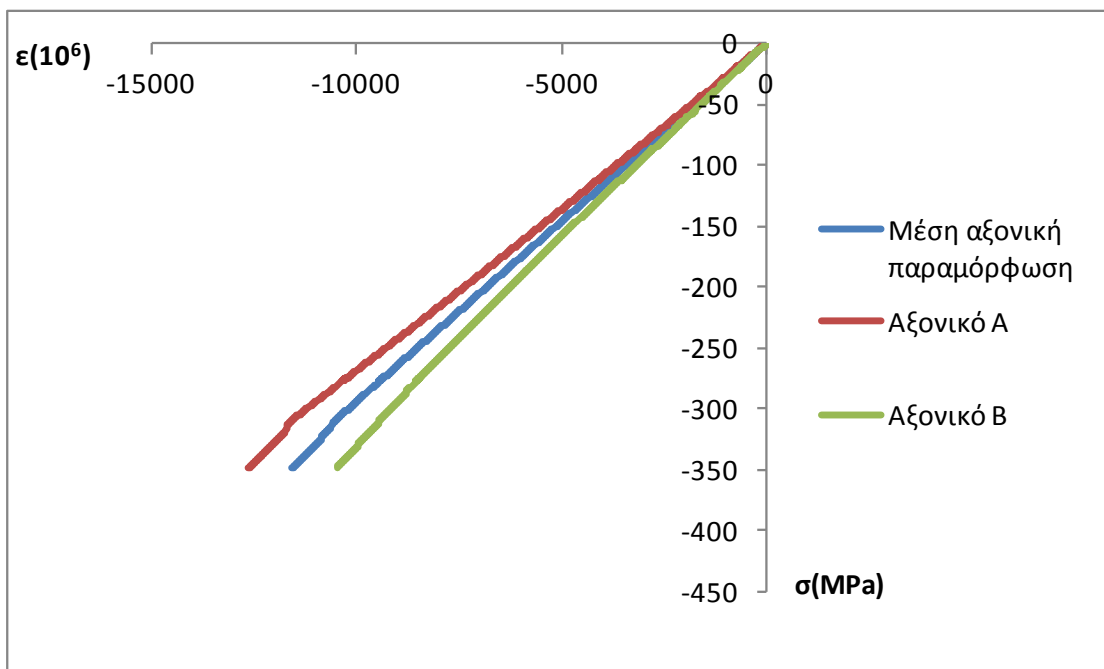
Εικόνα Β 7.8: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β5-4



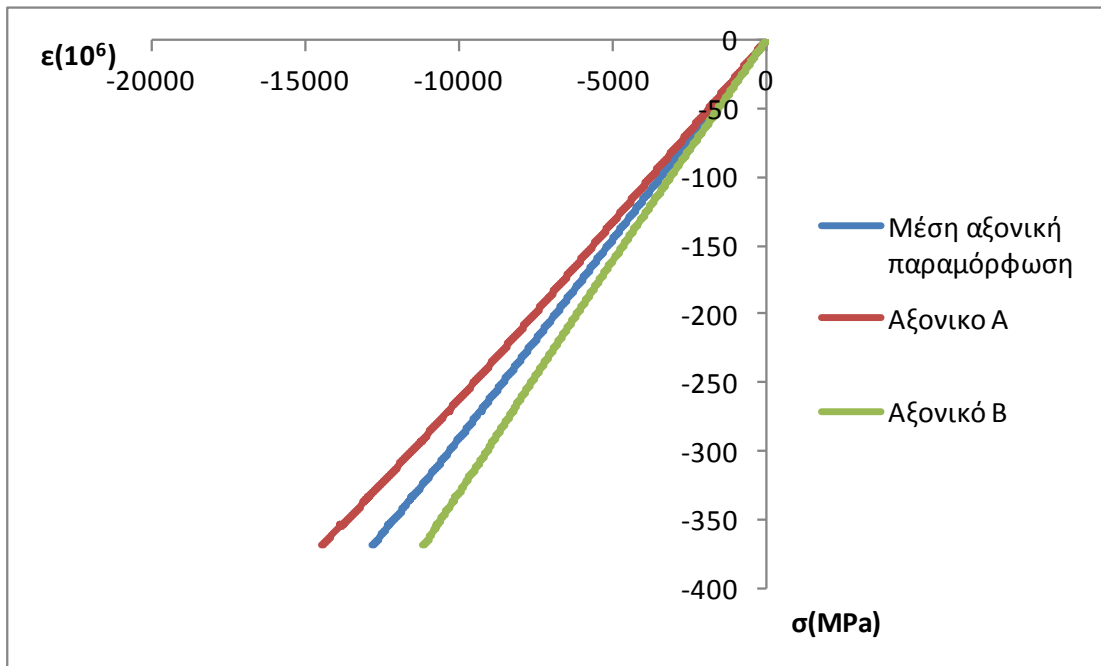
Εικόνα Β 7.9: Διάγραμμα σ - ϵ Β5-5



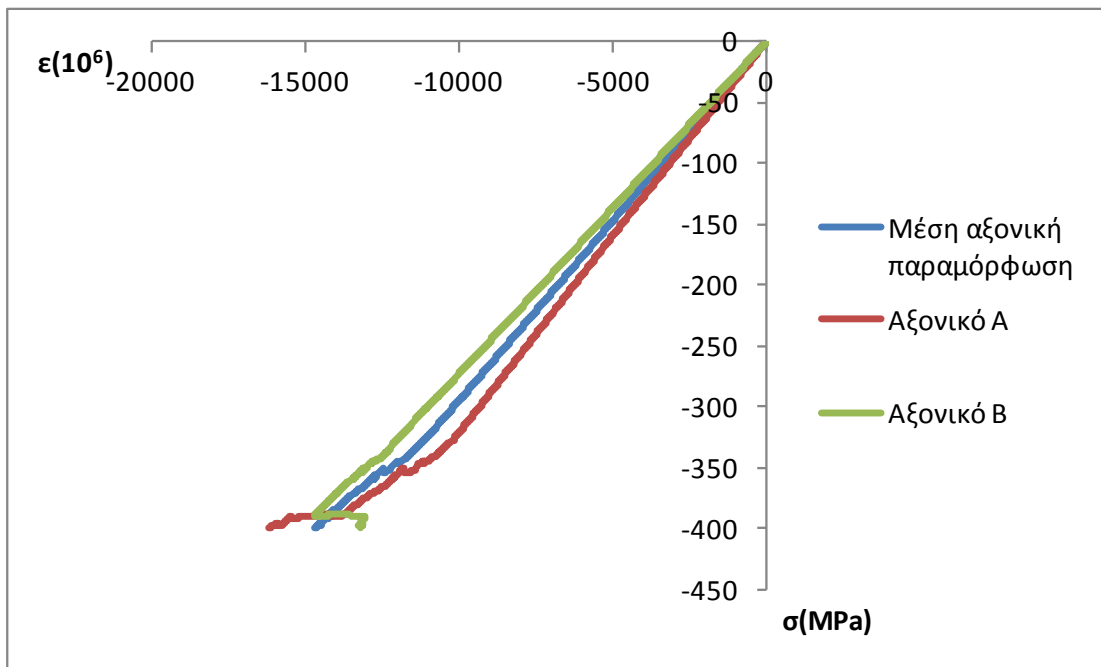
Εικόνα Β 7.10: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β5-5



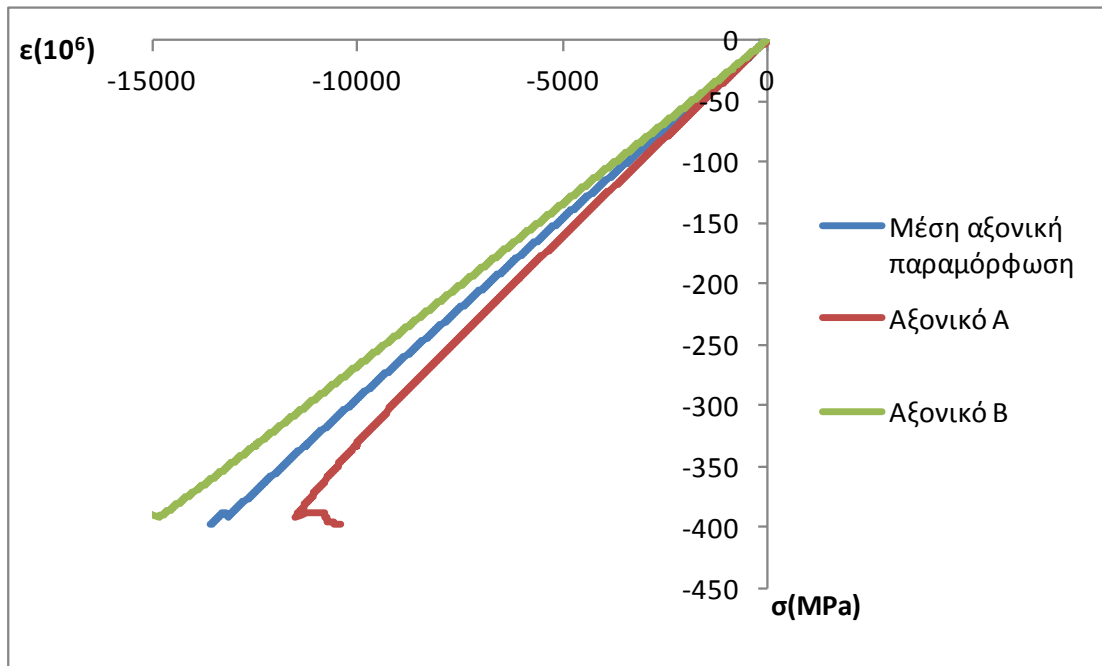
Εικόνα Β 7.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β5-1



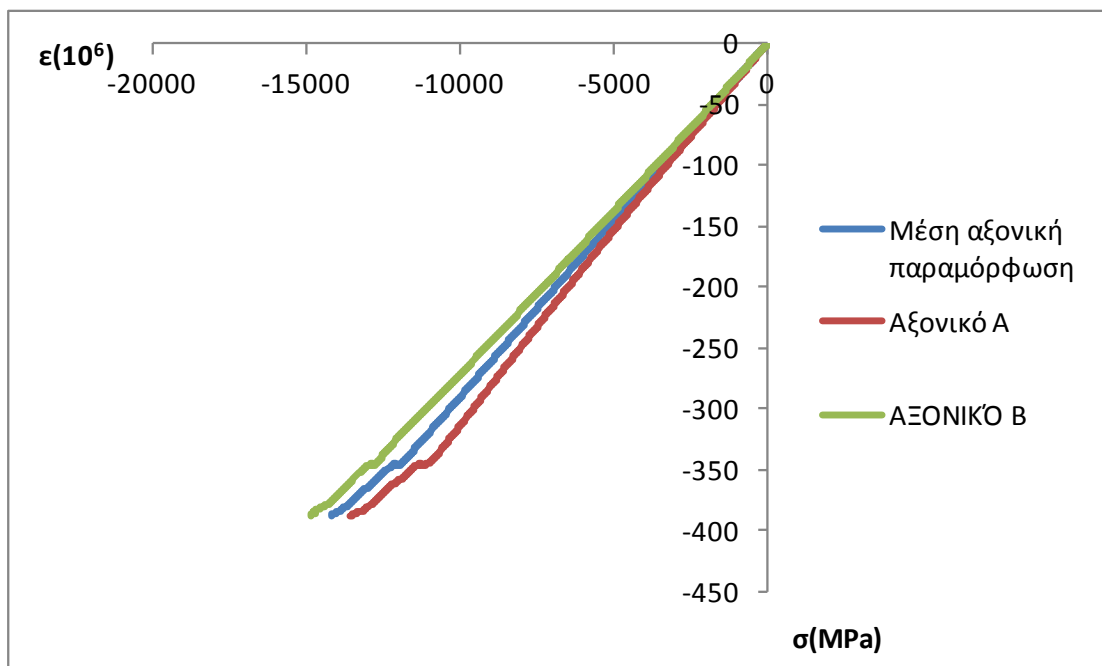
Εικόνα Β 7.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5-2



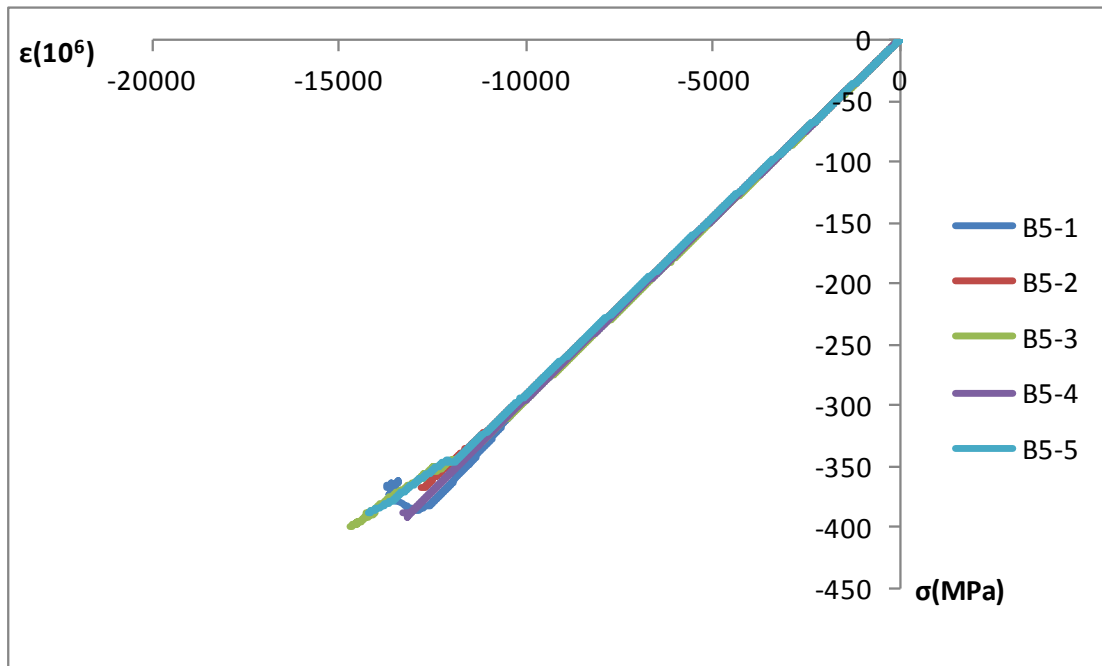
Εικόνα Β 7.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5-3



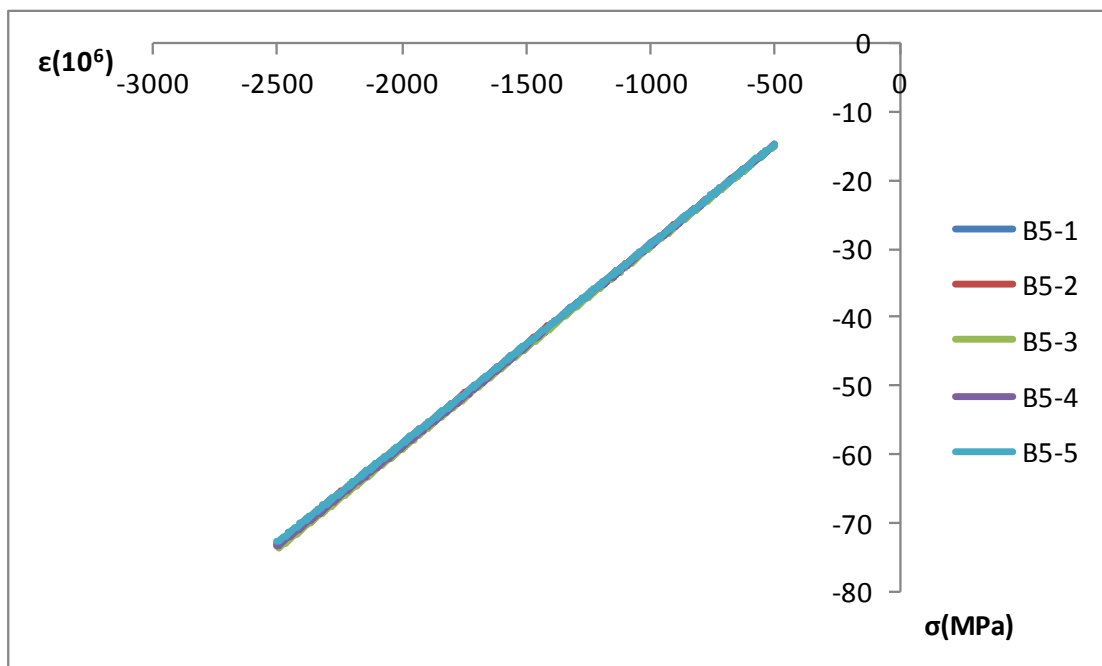
Εικόνα Β 7.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5-4



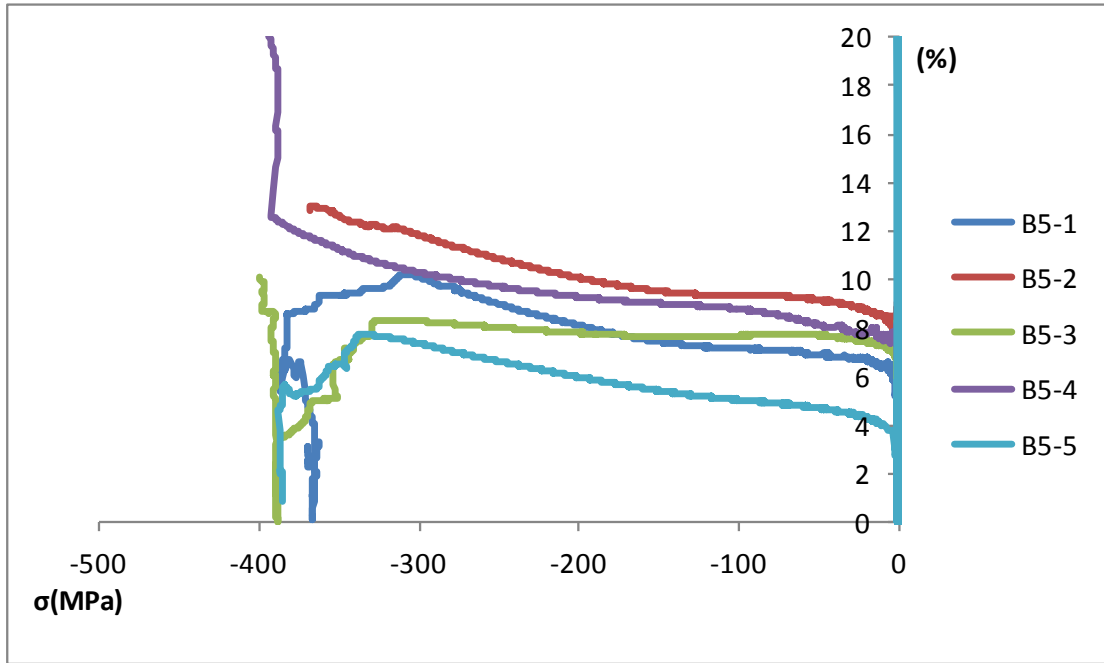
Εικόνα Β 7.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5-5



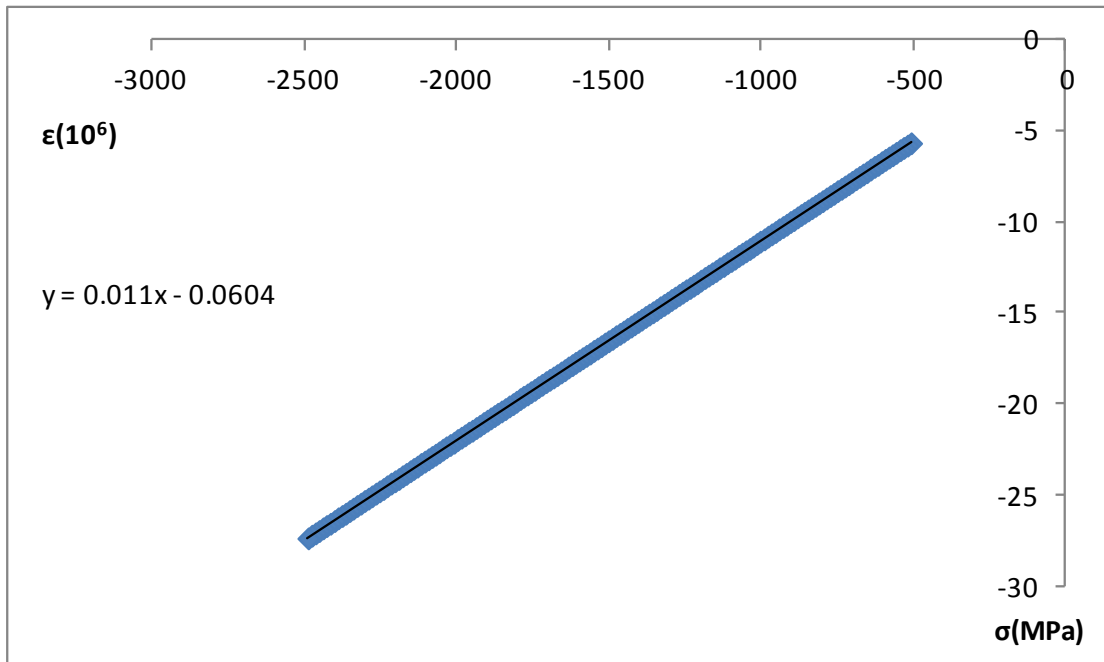
Εικόνα Β 7.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5



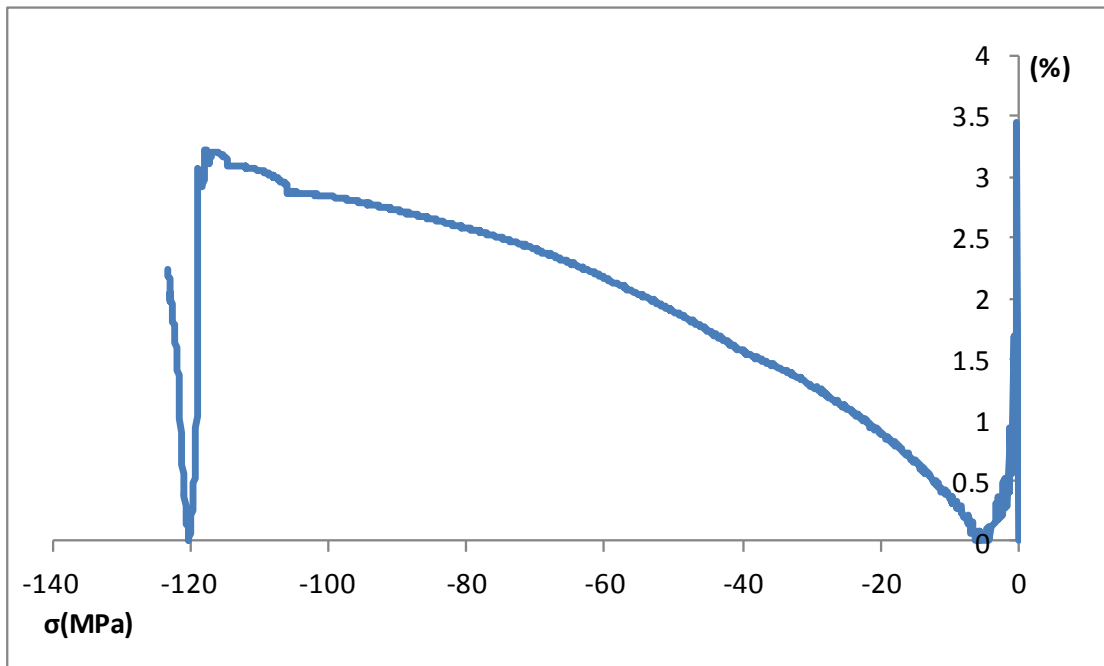
Εικόνα Β 7.17: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B5 (500-2500)



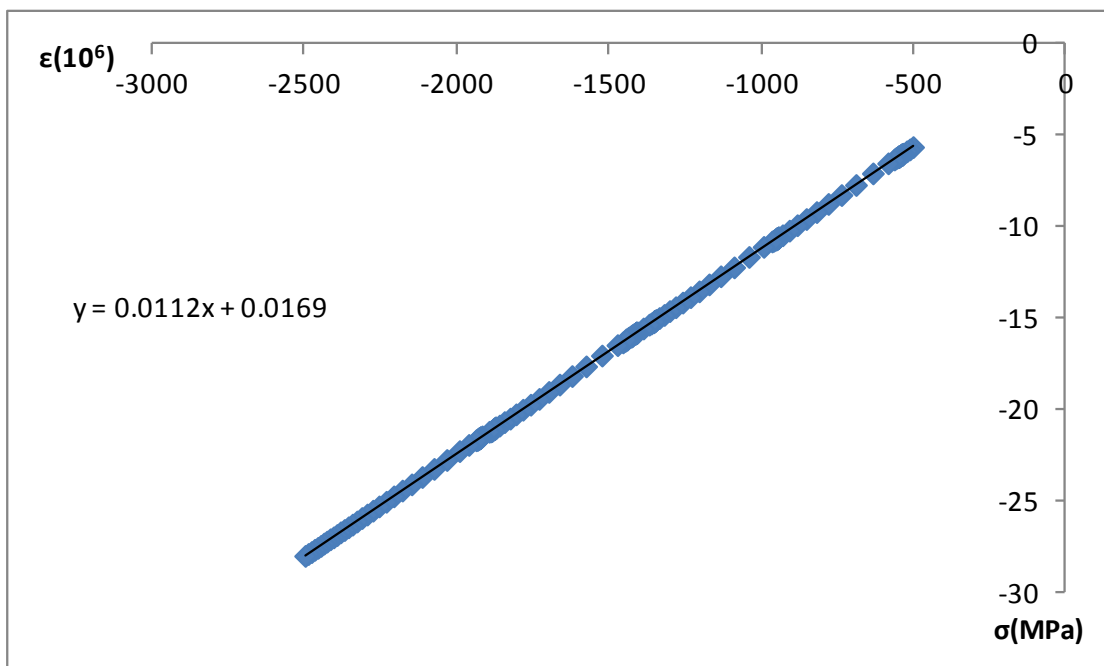
Εικόνα Β 7.18: Συνολικό διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β5



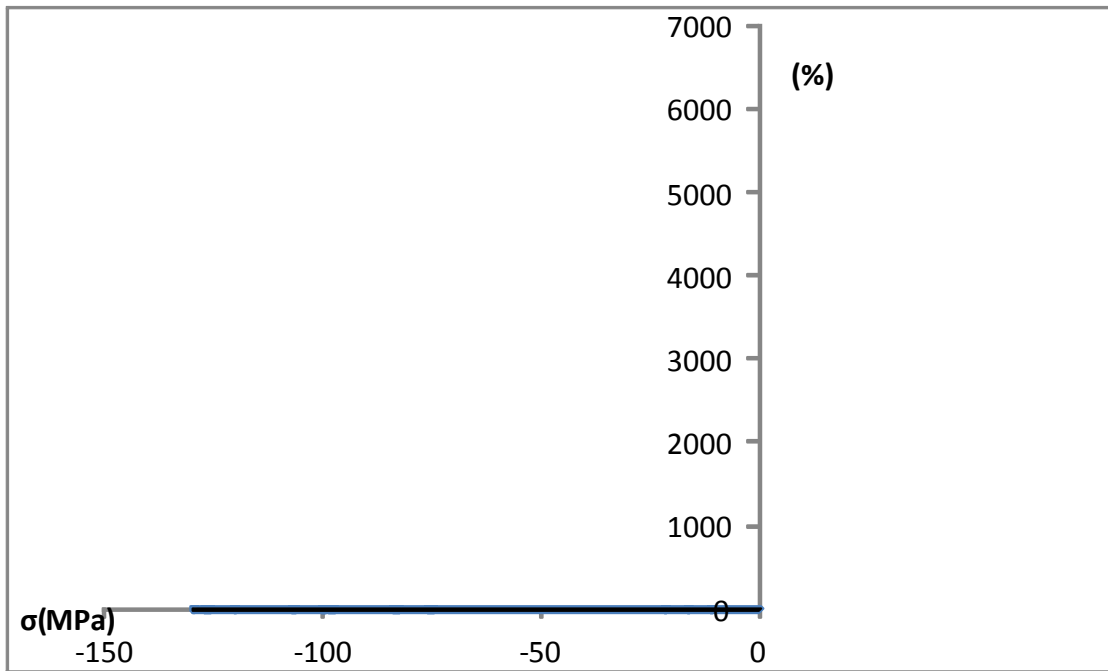
Εικόνα Β 8.1: Διάγραμμα σ - ϵ Β6-1



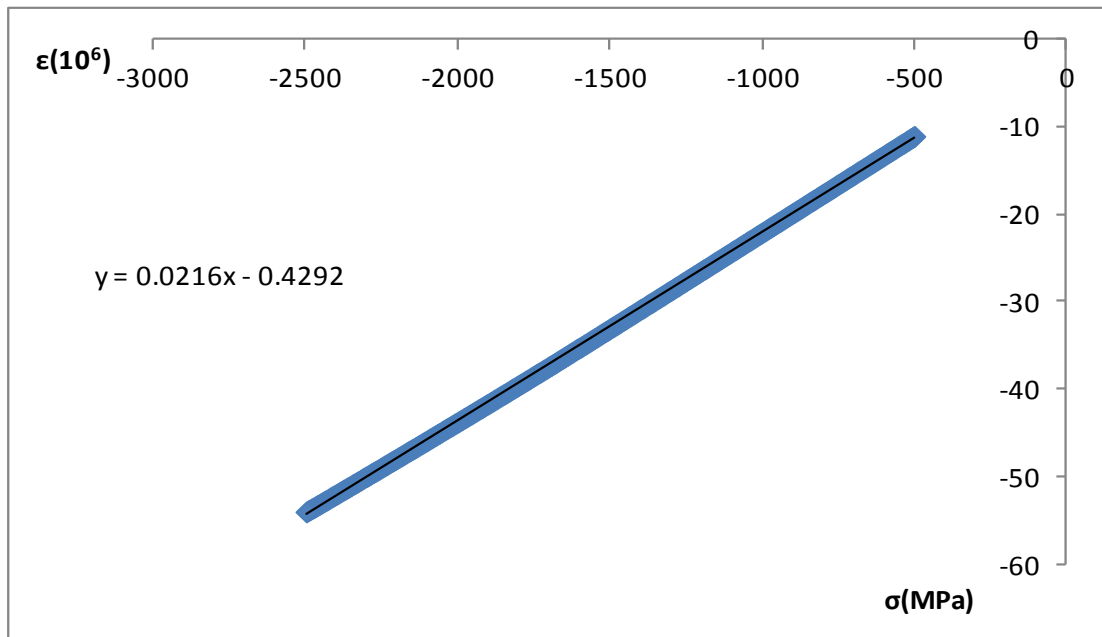
Εικόνα Β 8.2: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β6-1



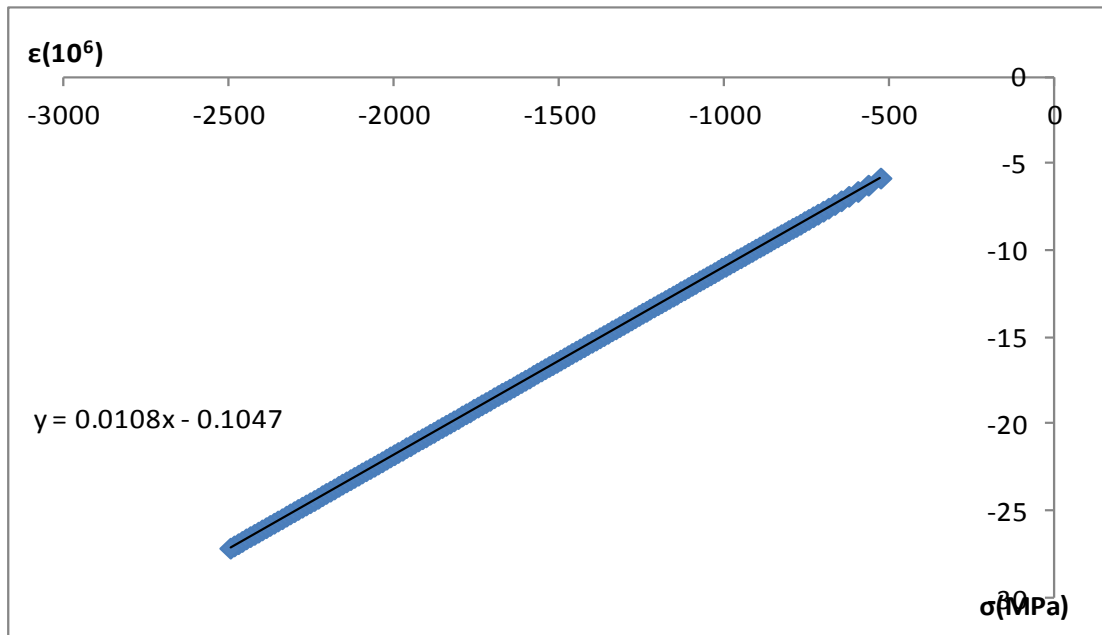
Εικόνα Β 8.3: Διάγραμμα σ - ϵ Β6-2



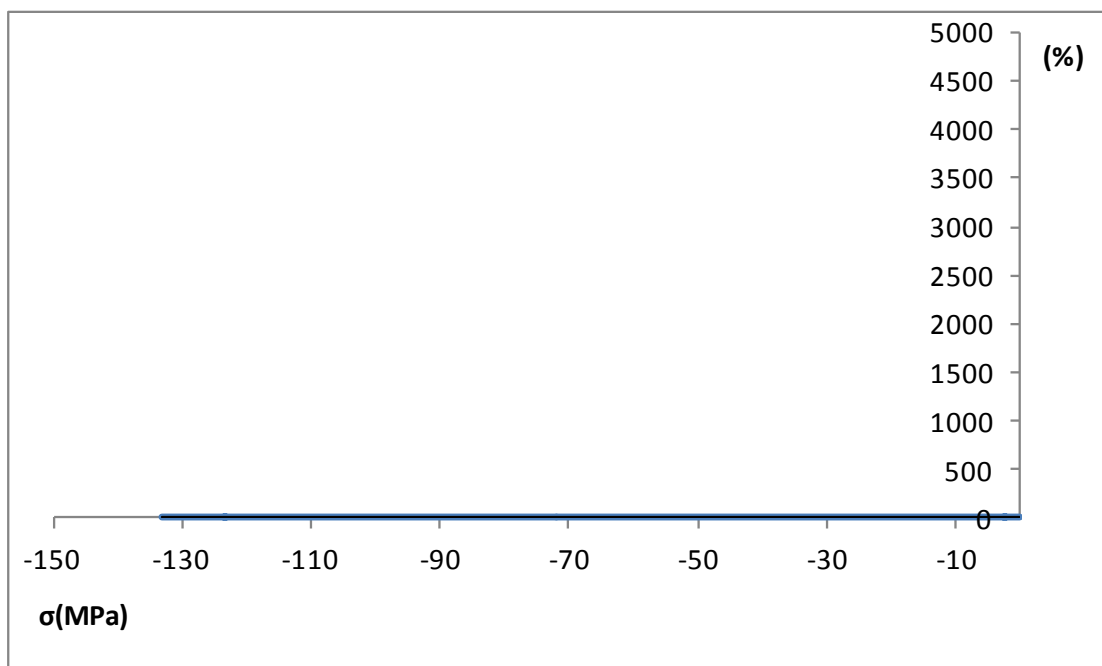
Εικόνα Β 8.4: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β6-2



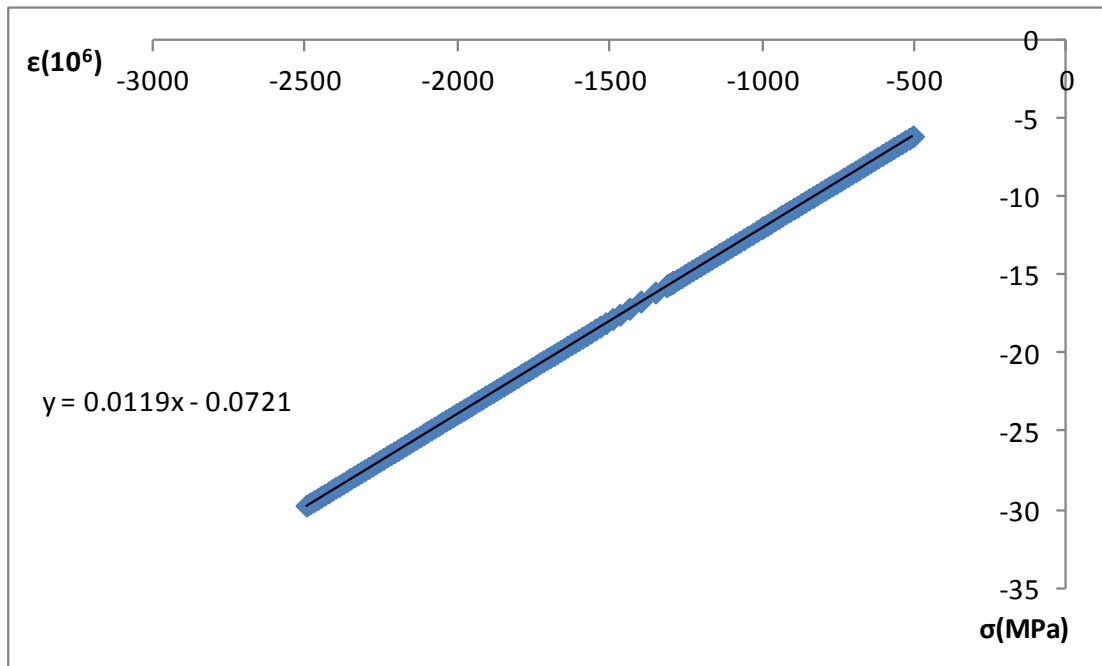
Εικόνα Β 8.5: Διάγραμμα σ - ϵ Β6-3



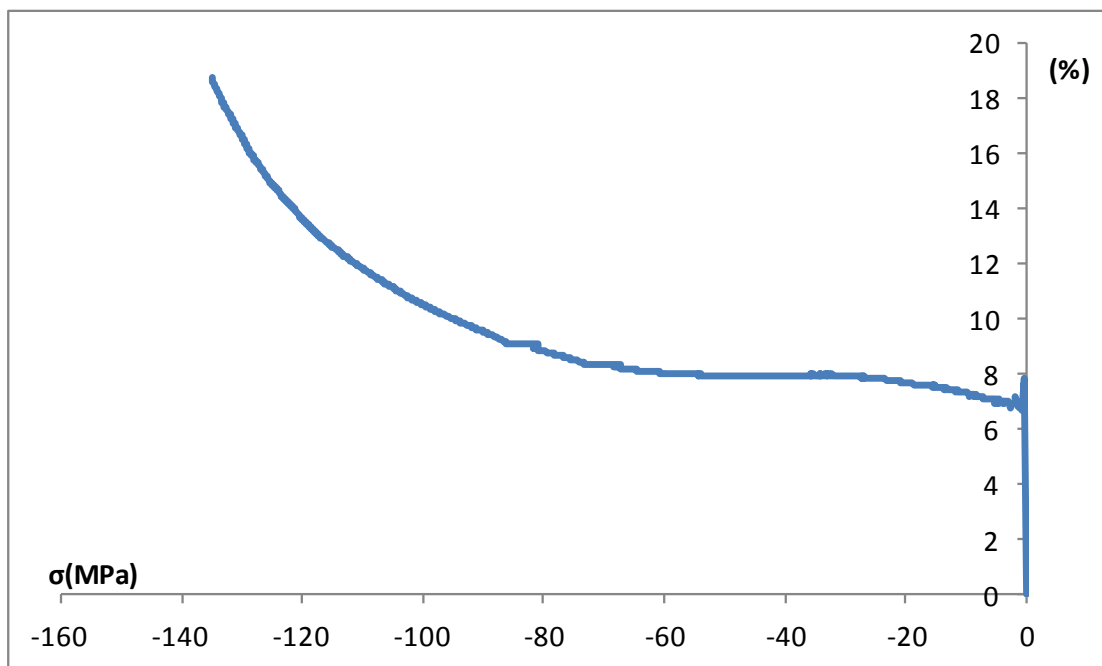
Εικόνα Β 8.6: Διάγραμμα σ - ϵ Β6-4



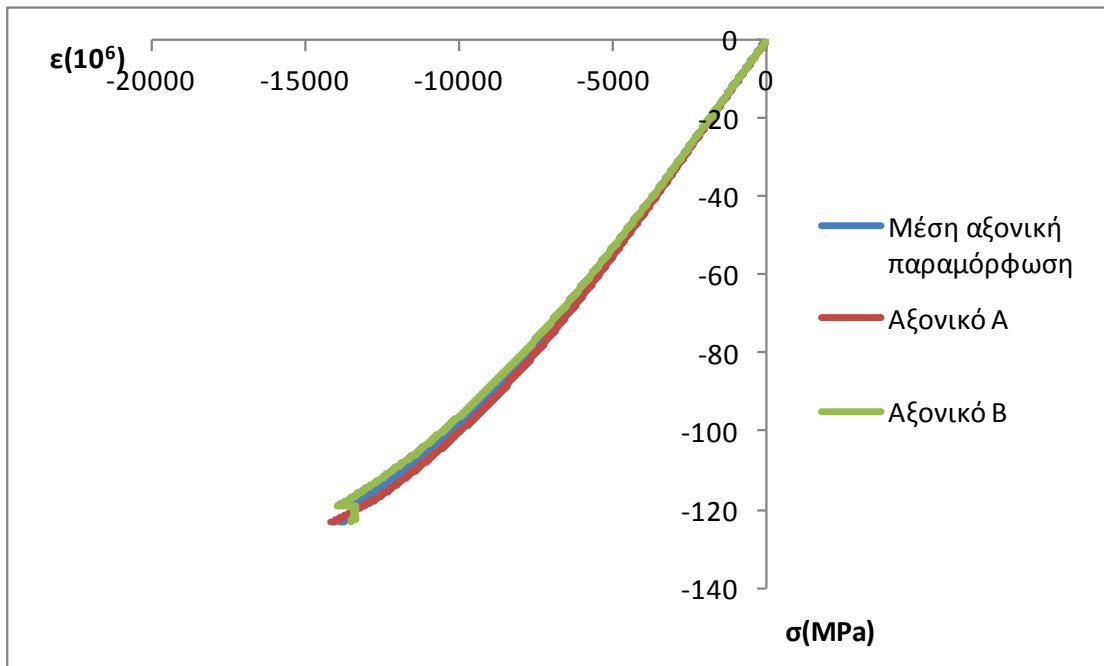
Εικόνα Β 8.7: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β6-4



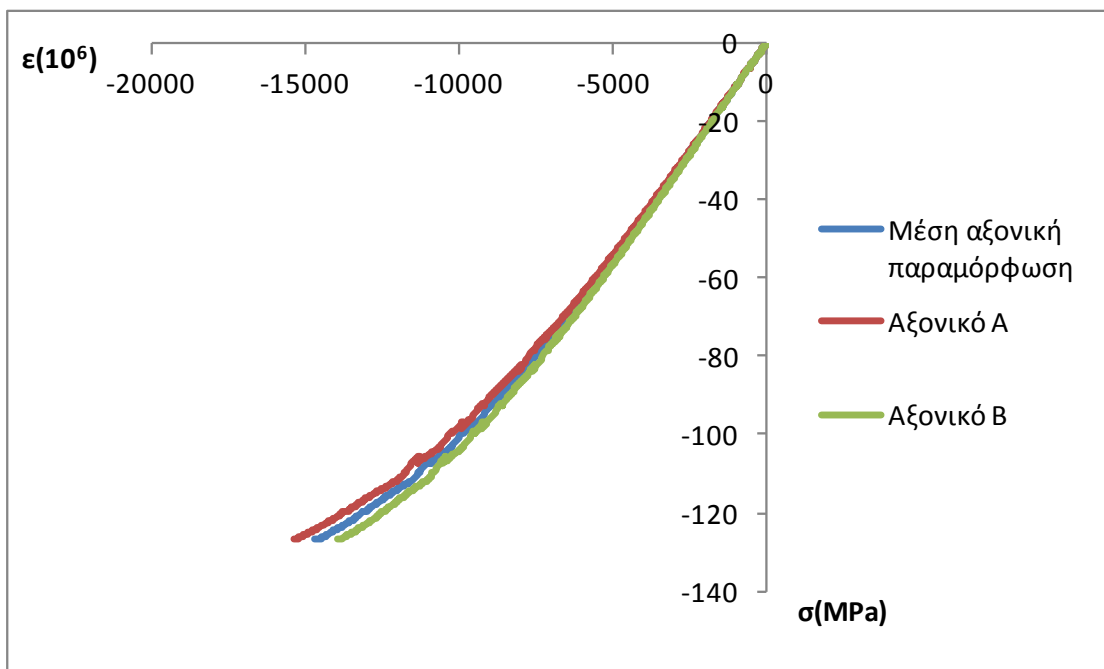
Εικόνα Β 8.8: Διάγραμμα σ - ϵ Β6-5



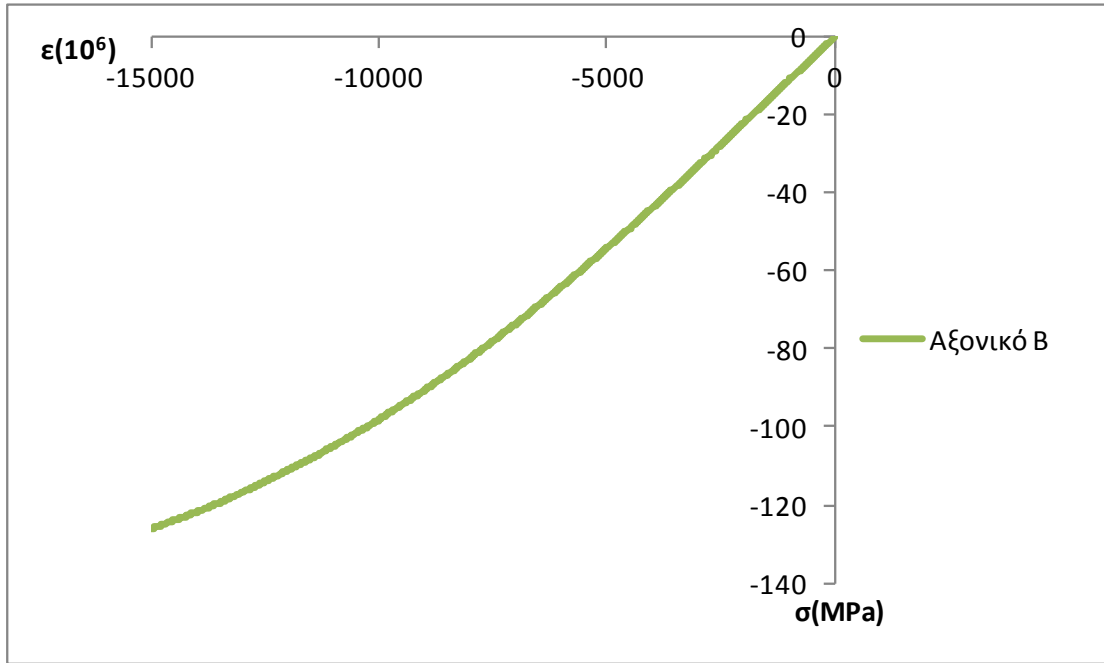
Εικόνα Β 8.9: Διάγραμμα τάσης-λυγισμού Β6-5



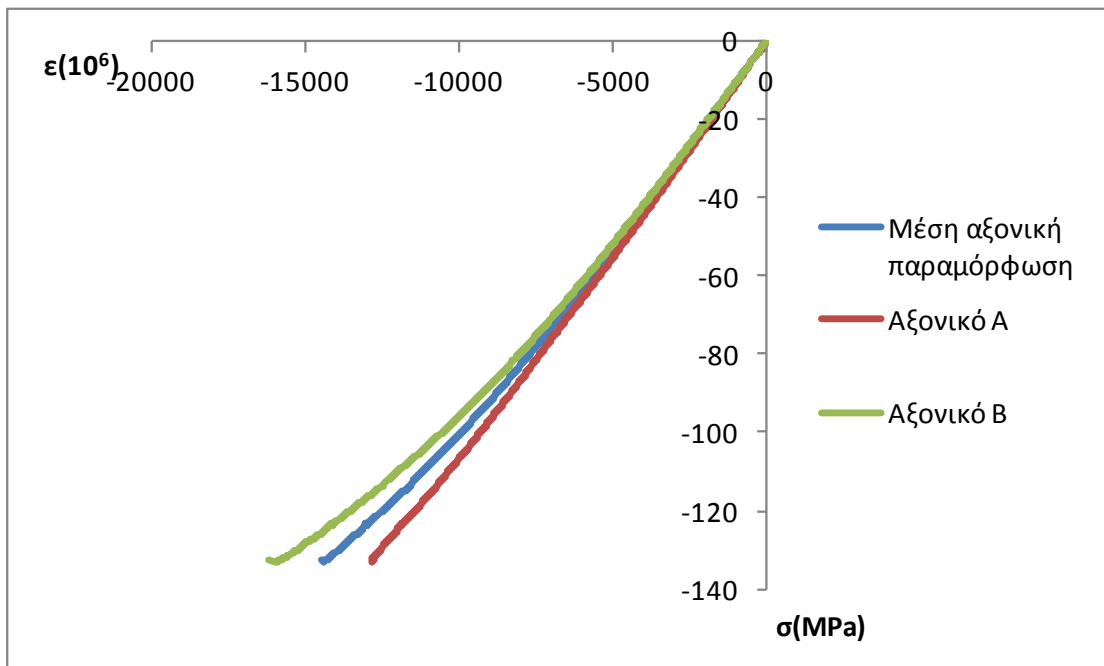
Εικόνα Β 8.10: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6-1



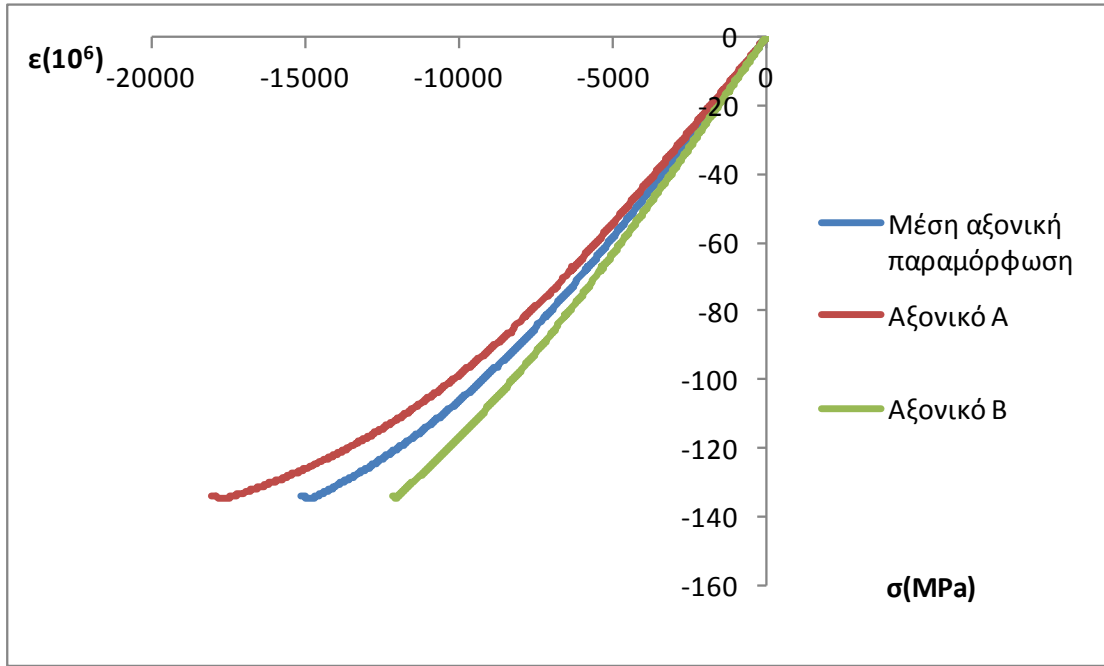
Εικόνα Β 8.11: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6-2



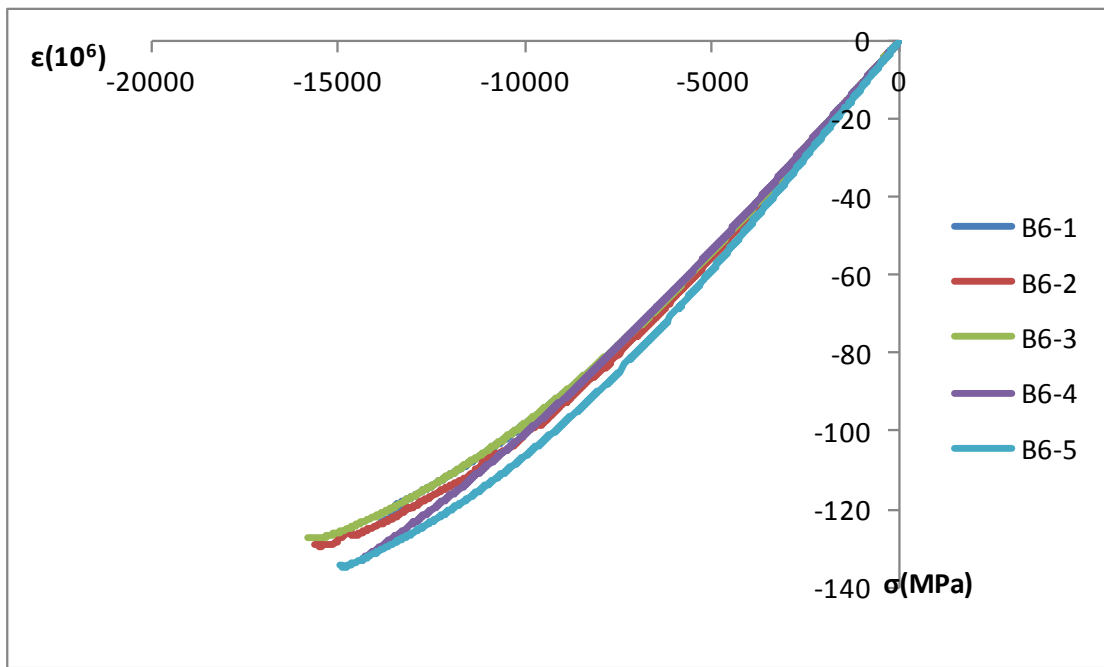
Εικόνα Β 8.12: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6-3



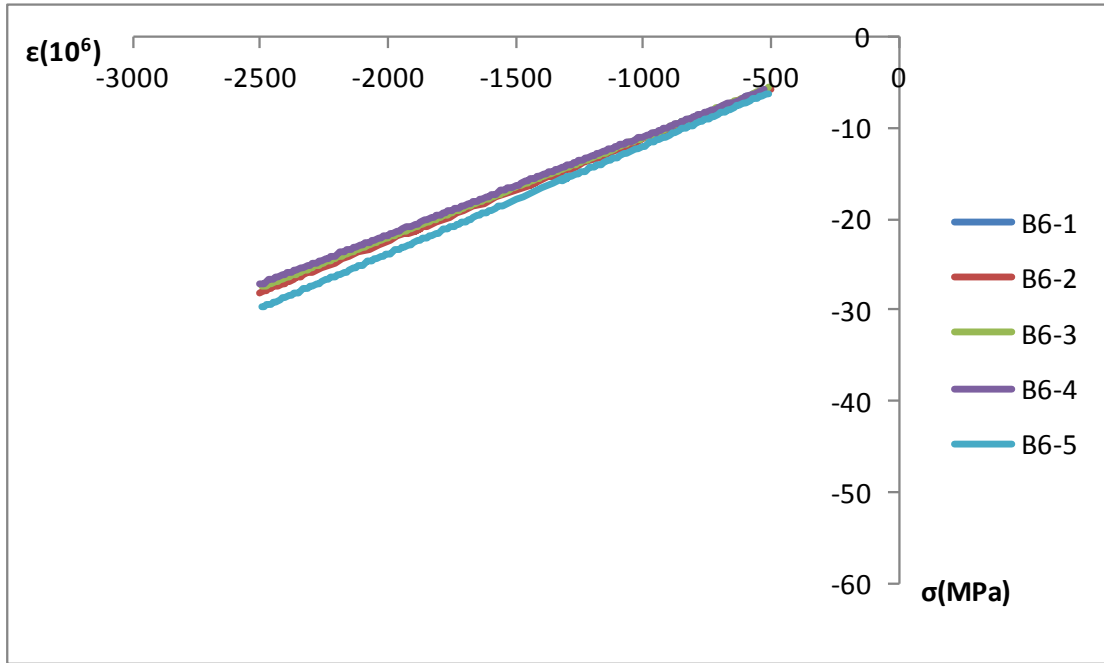
Εικόνα Β 8.13: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6-4



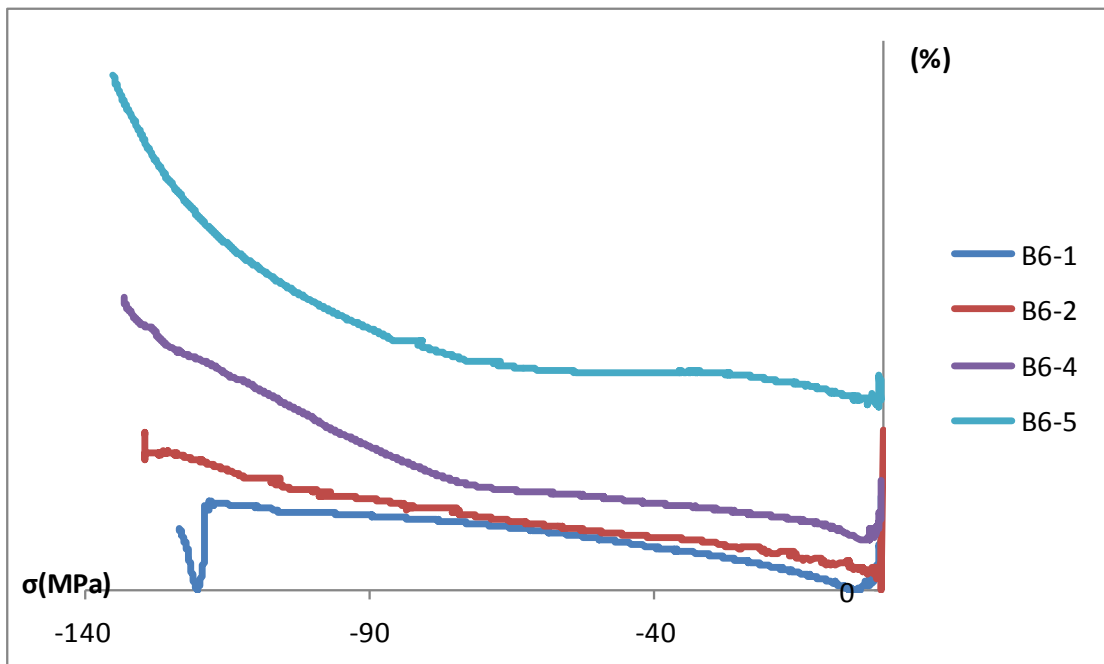
Εικόνα Β 8.14: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6-5



Εικόνα Β 8.15: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ Β6



Εικόνα Β 8.16: Συνολικό διάγραμμα σ - ϵ B6 (500-2500)



Εικόνα Β 8.17: Συνολικό διάγραμμα τάσης-λυγισμού B6

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

1. Οι συμβολισμοί A και B αναφέρονται στην μηχανική καταπόνηση στην οποία υποβάλλονται τα δοκίμια. Με το A συμβολίζεται ο εφελκυσμός και με το B, αντίστοιχα η θλίψη.
2. Ο πρώτος αριθμός μετά τα A και B αναφέρεται στην μέθοδο μορφοποίησης και στην διεύθυνση φόρτισης, δηλαδή οι ομάδες «1» σημαίνουν την μέθοδο επίστρωσης Wet hand lay up στις 0°, οι ομάδες «2» την μέθοδο επίστρωσης Wet hand lay up στις 90°, οι ομάδες «5» την μέθοδο επίστρωσης Vacuum bagging στις 0°, ενώ οι ομάδες «6» την μέθοδο επίστρωσης Vacuum bagging στις 90°. Με τον δεύτερο αριθμό υπονοείται η αριθμητική σειρά στην οποία μπαίνουν τα δοκίμια ώστε να ξεχωρίζονται μεταξύ τους.
π.χ. Το A 5-1 αναφέρεται στο πρώτο δοκίμιο σε σειρά που καταπονείται σε εφελκυσμό και στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος μορφοποίησης Vacuum bagging στις 0°.
3. Με το 'σ-ε' συμβολίζεται στο διάγραμμα η τάση (y άξονας) και η παραμόρφωση (x άξονας).
4. Το διάγραμμα «Τάσης- λυγισμού» ,είναι το διάγραμμα στο οποίο στον y άξονα καταχωρούνται τα δεδομένα του λυγισμού (bending strain) και στον x, αντίστοιχα, τα δέδομένα της τάσης (strain).
5. Το συνολικό διάγραμμα είναι συνδιαστικό διάγραμμα όλων των επιμέρους διαγραμμάτων της ομάδας στο οποίο αναφέρεται.