

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΑΣΙΚΟΥ
ΠΑΛΜΟΥ

ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΘΗΝΑ
2015

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΜΕΛΗ:

ΣΠΙΤΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

ΣΙΔΕΡΙΔΗΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερωσ την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου κυρία Βασιλική Βαδαλούκα, Επίκουρος Καθηγήτρια της Σχολής ΕΜΦΕ του ΕΜΠ, για την υπόδειξη του θέματος, την επιστημονική της συμβολή στα πειράματα, τις συμβουλές και την καθοδήγηση στη συγγραφή της και κυρίως την υπομονή της, αφού τα πειράματα έγιναν σε πιεστικές ώρες.

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 1: Συγκολλήσεις	
1.1 Γενικά περί συγκολλήσεων.....	11
1.2 Συγκολλητότητα μετάλλων και κραμάτων.....	14
1.3 Αυτογενείς συγκολλήσεις.....	16
1.4 Ετερογενείς συγκολλήσεις.....	29
1.5 Συγκολλήσεις στερεάς φάσης ή πίεσης.....	31
1.6 Σφάλματα συγκολλήσεων.....	32
Κεφάλαιο 2: Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος	
2.1 Κατηγορίες, Τύποι Συνδέσεων και Μεθοδοι Συγκόλλησης.....	45
2.2 Εκτέλεση συγκολλήσεων.....	48
2.3 Μετωπική σύνδεση (άκρο με άκρο) με τεχνικές τόξου.....	52
Κεφάλαιο 3: Έλεγχος Συγκολλήσεων	
3.1 Καταστροφικός Έλεγχος Συγκολλήσεων.....	55
3.2 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων (ΜΚΕ).....	60
Κεφάλαιο 4: Διάδοση Κυμάτων	
4.1 Γενικά – ορισμοί.....	77
4.2 Η κυματική εξίσωση.....	81
4.3 Ταχύτητα κύματος.....	84

Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία

5.1 Εισαγωγή.....	87
5.2 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges).....	87
5.3 Προετοιμασία των δοκιμίων.....	92
5.4 Παράμετροι του πειράματος.....	99
5.5 Το μετρητικό σύστημα.....	100

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

6.1 Εισαγωγή.....	101
6.2 Διαγράμματα.....	107
6.3 Εφελκυστική αντοχή.....	146
6.4 Συμπεράσματα.....	148

Αναφορές.....	151
----------------------	------------

Παράρτημα.....	153
-----------------------	------------

Περίληψη

Η εργασία αυτή ασχολείται με το πολύ σημαντικό κομμάτι του ελέγχου των συγκολλήσεων. Υπάρχουν πάρα πολλοί και αποδοτικοί τρόποι να γίνει έλεγχος ποιότητας μιας συγκόλλησης. Εδώ γίνεται προσπάθεια να ελεγχθεί πειραματικά η ποιότητα μιας συγκόλλησης από τις μεταβολές που μπορεί να υποστεί τασικός παλμός κατά τη διάδοσή του διαμέσου της συγκόλλησης.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια χάλυβα από οπλισμό σκυροδέματος (ράβδοι) τα οποία αφού κόπηκαν στη μέση με τροχό, συγκολλήθηκαν με τρεις διαφορετικές συγκολλήσεις κακής ποιότητας. Ύστερα κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε κρουστικές καταπονήσεις κατά μήκος και εγκάρσια του άξονά του, μέσω βλήματος προερχόμενου από αεριοβόλο. Με τη βοήθεια ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης, που επικολλήθηκαν λίγο πριν και λίγο μετά το σημείο συγκόλλησης, μετρήθηκαν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις, από τη διέλευση του τασικού παλμού.

Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων με τον οποίο ήταν συνδεδεμένοι οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Μελετώντας τα και συγκρίνοντάς τα, εξήχθησαν κάποια πρώτα συμπεράσματα.

Summary

This dissertation deals with the test and inspection of the welds. There are several efficient ways describing the procedures of welding quality controls. In this project, an attempt was made to experimentally test the quality of a weld by analyzing the variations of a stress pulse during its propagation through the weld.

For this purpose, three bars of steel of reinforced concrete were used. Each one was cut in half using a grinder, and then welded at three different welds of poor quality. Following this procedure each specimen was subjected to percussive stress longitudinally and transversely of its axis. The stress pulse was created by a projectile, which is fired out of an air-gun. Using electrical strain gauges attached shortly before and after the welding point, the induced strains were measured.

A Data Acquisition System, with high sampling rate, was connected to the electrical strain gauges and used to record the signals. The resulting diagrams are presented in the experimental part of this dissertation. By studying and comparing them, some primary conclusions were made.

Εισαγωγή

Η συγκόλληση αποτελεί μια πανάρχαια μέθοδο μόνιμης σύνδεσης δύο υλικών, συνήθως μετάλλων. Οι χρήσεις της στη σημερινή εποχή επεκτείνονται από τα πολύ μικρά κυκλώματα που υπάρχουν στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές μέχρι την κατασκευή πλοίων και αεροσκαφών. Γίνεται κατανοητό λοιπόν πόσο σημαντικό είναι το πρόβλημα ελέγχου των συγκολλήσεων.

Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι ελέγχου συγκολλήσεων, δαπανηροί και μη, περίπλοκοι ή απλοί κλπ, με πιο διαδεδομένες ίσως τις μεθόδους των υπερήχων, της ακουστικής εκπομπής και των διεισδυτικών υγρών, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από συγκολλήσεις σε διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δεξαμενές, σωλήνες αλλά και πλήθος άλλων κατασκευών, π.χ. αεροσκάφη. Ο έλεγχος αφορά την ποιότητα των συγκολλήσεων τόσο από μεριάς αντοχής όσο και του ποιοτικού ελέγχου για την ύπαρξη μικρορωγμών ή άλλων ατελειών.

Στην εργασία αυτή επιχειρείται μία πρώτη προσπάθεια για πειραματικό έλεγχο της ποιότητας μιας συγκόλλησης από τις μεταβολές που μπορεί να υποστεί τασικός παλμός κατά τη διάδοσή του διαμέσου αυτής. Το υλικό των προς έλεγχο δοκιμίων επιλέχθηκε να είναι χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος λόγω ευρείας χρήσης τους στις νέες οικοδομικές κατασκευές αλλά κυρίως στις προσθήκες ορόφων υπαρχόντων κατασκευών, που συνήθως υπάρχει ελλειμματικός έλεγχος της ποιότητάς του. Οι χαλύβδινες ράβδοι οπλισμού κόπηκαν και συγκολλήθηκαν με μη ορθό τρόπο προκειμένου να ελεγχθούν με τη βοήθεια τασικού παλμού. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε από την κρούση επί του δοκιμίου μιας σφαίρας μικρής διαμέτρου που εκτοξευόταν από κνήκη αεριοβόλου. Η κρούση έγινε διαμήκως και εγκάρσιως του άξονα των δοκιμίων. Με τη βοήθεια ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης, που επικολλήθηκαν λίγο πριν και λίγο μετά το σημείο συγκόλλησης, μετρήθηκαν οι προκαλούμενες παραμορφώσεις. Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης

δεδομένων με τον οποίο ήταν συνδεδεμένοι οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.

Τα πειράματα της κρουστικής καταπόνησης έγιναν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ υπό την καθοδήγηση της επιβλέπουσας καθηγήτριας.

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια και ένα παράρτημα. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στις συγκολλήσεις. Το δεύτερο παρέχει στοιχεία από ισχύοντες κανονισμούς και διατάξεις που αφορούν τη συγκόλληση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Στο τρίτο αναλύονται οι κύριες μέθοδοι ελέγχου των συγκολλήσεων. Στο τέταρτο αναφέρεται η θεωρία του τασικού κύματος. Στο πέμπτο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και τέλος στο έκτο παρατίθενται τα αποτελέσματα με μορφή διαγραμμάτων καθώς και τα συμπεράσματα. Τέλος στο παράρτημα φαίνεται η χρήση του λογισμικού του μετρητικού συστήματος ταχείας λήψης δεδομένων.

Κεφάλαιο 1.

Συγκολλήσεις

1.1 Γενικά περί συγκολλήσεων

Συγκόλληση ονομάζουμε την μέθοδο κατά την οποία δύο υλικά, συνήθως μέταλλα, συνδέονται μόνιμα μεταξύ τους μέσω τοπικής πρόσφυσης, που επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και μεταλλουργικών συνθηκών. Από την εποχή της αρχαιότητας εμφανίζονταν διαδικασίες συγκόλλησης, που βασίζονταν κυρίως στη μέχρι τότε γνώση των υλικών. Έτσι, η συγκόλληση με χύτευση καθιερώθηκε από τους αρχαίους χρόνους ως η κύρια μορφή σύνδεσης και επισκευής σπασμένων κατασκευών από μπρούντζο ή χυτοσίδηρο. Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η συγκόλληση σε κάμινο (καμινοσυγκόλληση), η κασιτεροκόλληση, που χρησιμοποιείται μέχρι τις μέρες μας ιδιαίτερα στη λευκοσιδηρουργία, η μπρουτζοκόλληση κ.λπ.. Η πιο κλασική μέθοδος συγκόλλησης, που είναι η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη, εμφανίστηκε στην αρχή του εικοστού αιώνα. Από τότε πολλές διαφορετικές μέθοδοι έχουν ανακαλυφθεί και προσφέρονται για την πραγματοποίηση πολύπλοκων προϊόντων. Η λίστα με τα αντικείμενα ή προϊόντα που έχουν συγκολλητά μέρη είναι ατελείωτη και περιλαμβάνει από στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέχρι πλοία, μηχανές αεριοθούμενων, αυτοκίνητα, γέφυρες, μεταλλικά έπιπλα, κτίρια με μεταλλικό σκελετό κ.λπ.. Επειδή ο συνδυασμός θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να κυμαίνεται από υψηλή θερμοκρασία με καθόλου πίεση, μέχρι υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία, η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να έχει αναπτυχθεί και να χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία μεγάλος αριθμός μεθόδων συγκόλλησης (περίπου 50 διαφορετικές τεχνικές). Οι συγκολλήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες:

1. Συγκολλήσεις τήξης

Πραγματοποιούνται με πλήρωση της περιοχής σύνδεσης με τηγμένο συγκολλητικό υλικό. Εν συνεχεία οι συγκολλήσεις τήξης ανάλογα την φύση του συγκολλητικού υλικού διακρίνονται σε:

- Αυτογενείς συγκολλήσεις, όπου η κόλληση και τα συγκολλώμενα τεμάχια αποτελούνται από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό.
- Ετερογενείς συγκολλήσεις, όπου το υλικό κόλλησης των τεμαχίων είναι διαφορετικό.

2. Συγκολλήσεις στερεάς φάσης ή πίεσης

Πραγματοποιούνται με διάχυση του υλικού μέσω μιας ενδιάμεσης επιφάνειας σύνδεσης ή μέσω αυτόματης σύνδεσης των επιφανειών που έρχονται σε επαφή.

Οι συγκολλήσεις ως μέσο σύνδεσης αντικατέστησαν όλες τις μεθόδους λυόμενων συνδέσεων (κοχλιοσυνδέσεις, ηλώσεις), εκεί βέβαια που δε χρειαζόταν η σύνδεση να είναι λυόμενη. Για την παραγωγή σύνθετων κατασκευών, οι συγκολλήσεις αντικατέστησαν την πολύ δαπανηρότερη χύτευση. Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων απέναντι στη χύτευση είναι: οικονομία στο υλικό, μικρότερο κόστος και δυνατότητα πραγματοποίησης σύνθετων κατασκευών, που με τη χύτευση είναι αδύνατες ή πολύ δύσκολες. Σημαντικά επίσης πλεονεκτήματα γενικότερα είναι τα εξής: υψηλή μηχανική αντοχή της σύνδεσης που ενδέχεται να υπερβεί αυτή των μετάλλων βάσης, στεγανότητα της σύνδεσης στη δράση υγρών και αερίων και δυνατότητα σύνδεσης μερών ανεξαρτήτως σχήματος πάχους και γεωμετρίας.

Μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συγκολλήσεις σχετίζονται κυρίως με τη συγκολλητότητα των υλικών, δηλαδή την ιδιότητα ενός υλικού να μπορεί να συγκολληθεί. Τα κυριότερα είναι τα εξής: κίνδυνος ψαθυρής θραύσης λόγω της μονολιθικότητας των συγκολλητών κατασκευών και εσωτερικών ελαττωμάτων της συγκόλλησης (εγκλείσματα οξειδίων, πόροι, ρωγμές) ή δημιουργία εσωτερικών τάσεων, κίνδυνος στρέβλωσης και παραμόρφωσης σύνθετων κατασκευών, λόγω θερμικών διαστολών κατά την

κατασκευή, δυσκολία εντοπισμού εσωτερικών ελαττωμάτων χωρίς τη χρήση Μη Καταστροφικών Τεχνικών Ανάλυσης και τέλος δυσκολία συγκόλλησης ορισμένων μετάλλων / κραμάτων.

Για να επιτευχθεί πρόσφυση μεταξύ δύο μετάλλων, πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συνδυασμός επαρκούς γειννίασης και δραστικότητας μεταξύ των τεμαχίων που θα συγκολληθούν, ώστε να σχηματιστούν κοινοί μεταλλικοί κρύσταλλοι. Παράγοντες που μπορούν να περιορίσουν αυτήν την διαδικασία είναι οι ακόλουθοι :

- Συνήθεις ανωμαλίες των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή
- Στρώματα οξειδίων ή ξένων ρύπων όπως μεταλλικά επιφανειακά στρώματα
- Λεπτό στρώμα απορροφώμενου αερίου στην επιφάνεια οξειδίου

Η τραχύτητα επιφανείας εξουδετερώνεται είτε με επιβολή δύναμης, που προκαλεί πλαστική παραμόρφωση των ανωμαλιών και έτσι τα τεμάχια έρχονται σε πιο άμεση επαφή, είτε με τήξη των δύο επιφανειών.

Στις συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης, τα στρώματα των ρύπων μπορούν να απομακρυνθούν με μηχανικό ή χημικό καθαρισμό πριν την συγκόλληση ή προκαλώντας επαρκή ροή μετάλλου διαμέσου μιας εσωτερικής επιφάνειας, έτσι οι ακαθαρσίες να αποβληθούν από την συγκόλληση. Στις συγκολλήσεις τήξης, όπου υπάρχει ροή τηγμένου υλικού, οι ρύποι απομακρύνονται με κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια.

Εάν η συγκόλληση γίνεται υπό κενό και στις δύο μεθόδους οι ρύποι απομακρύνονται πιο εύκολα και η πρόσφυση επιτυγχάνεται άμεσα. Σε συνθήκες περιβάλλοντος οι ακαθαρσίες μπορούν να συγκολληθούν μαζί με τα τεμάχια υπό την επίδραση μικρής φόρτισης, αν και κάτι τέτοιο δεν προβλέπεται.

Γίνεται φανερό λοιπόν, ότι οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης διαφέρουν σημαντικά όχι μόνο στον τρόπο που συνδυάζονται και επιτυγχάνονται θερμοκρασία και πίεση, αλλά διαφέρουν ακόμα και ως προς την προσοχή που πρέπει να δίνεται στην καθαρότητα των μεταλλικών επιφανειών, πριν την συγκόλληση τους, καθώς και στην πιθανή οξειδωση ή ρύπανση των τεμαχίων

κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Όταν χρησιμοποιούνται υψηλές θερμοκρασίες, τα περισσότερα μέταλλα επηρεάζονται δυσμενώς από το άμεσο περιβάλλον και αν συμβαίνει και τήξη, μπορεί να προκληθεί σοβαρή μεταλλαγή του μετάλλου. Ακόμη η μεταλλουργική δομή και ποιότητα του μετάλλου μπορεί να επηρεαστεί, με δυσμενή αποτελέσματα, από την θέρμανση και ψύξη που συνοδεύουν τις περισσότερες μεθόδους συγκόλλησης. Για τον λόγο αυτό οι επιδράσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Γενικότερα για την επίτευξη καλών συγκολλήσεων είναι απαραίτητο να διατίθεται μια επαρκής πηγή θερμότητας ή πίεσης, μέσα προστασίας και καθαρισμού του μετάλλου καθώς και μέσα αποφυγής ή περιορισμού των δυσάρεστων μεταλλουργικών επιδράσεων.

1.2 Συγκολλητότητα μετάλλων και κραμάτων

Με τον όρο συγκολλητότητα εννοούμε την ικανότητα του μετάλλου να συγκολλάται σε μια κατασκευή, ικανοποιώντας συγχρόνως ορισμένες ιδιότητες και εκπληρώνοντας ορισμένους λειτουργικούς σκοπούς.

Οι μεταβλητές που εκφράζουν την ικανότητα του μετάλλου προς συγκόλληση είναι πολλές, όπως για παράδειγμα η μεταλλουργική δομή του βασικού μετάλλου, οι ακαθαρσίες, η μέθοδος κατεργασίας, η παρουσία αερίων κλπ. Προφανώς η καλή γνώση του διαγράμματος φάσεων και η συμπεριφορά του μετάλλου σε υψηλή θερμοκρασία για μια χρονική περίοδο είναι απαραίτητη.

Οι παράγοντες που έχουν άμεση επίδραση στην συγκολλητότητα ενός υλικού μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

1. Μηχανικές ιδιότητες: η σκληρότητα, η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής, η ολκιμότητα, η ειδική θερμότητα, το σημείο

τήξης, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η επιφανειακή τάση σε υψηλές θερμοκρασίες, η τάση προς διάβρωση.

2. Λειτουργικότητα: η προετοιμασία των προς συγκόλληση επιφανειών, οι προστασίες και τα αέρια, τα υλικά κολλήσεων, η ταχύτητα συγκόλλησης, η θέση της ραφής, η ταχύτητα απόψυξης, η προθέρμανση, τα επίπεδα των θερμοκρασιών.

Σχετικά με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά ισχύουν τα εξής :

- Κράματα σιδήρου – άνθρακα

Η συγκολλητικότητα των χαλύβων εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα (C). Όσο λιγότερο άνθρακα έχει ένας χάλυβας, τόσο πιο μεγάλη συγκολλητικότητα έχει, δηλαδή συγκολλάται πιο εύκολα. Ανώτερο όριο περιεκτικότητας σε άνθρακα για εύκολη συγκόλληση είναι το 0,25%. Αν ένας χάλυβας έχει περιεκτικότητα πάνω από το 0,25% σε άνθρακα, τότε η συγκόλληση δεν μπορεί να είναι επιτυχής παρά μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, περιοχές της ραφής της συγκόλλησης υφίστανται βαφή, χάνουν τη μηχανική αντοχή τους και φαθυροποιούνται. Οι χάλυβες αυτοί, με όριο άνθρακα πάνω από το 0,25%, μπορούν να συγκολληθούν, αν προθερμανθούν. Η προθέρμανση αυτή εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και φθάνει μέχρι τους 425°C για χάλυβες με περιεκτικότητα 0,8% σε άνθρακα. Αντίστοιχα με τους ανθρακούχους χάλυβες, οι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Si, Mn, S και P, δεν μπορούν να συγκολληθούν εύκολα και μόνο κάτω από ειδικές συνθήκες. Αντίθετα, οι χάλυβες με προσμείξεις Cu, Ni, Cr, Mo και V, δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα συγκόλλησης, εκτός αν όλες οι προσμείξεις ξεπερνάνε το 10%. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κοινά κράματα σιδήρου – άνθρακα και η δυνατότητα συγκόλλησής τους:

Κατηγορία υλικού	Εύκολη συγκόλληση	Συγκόλληση σε ειδικές συνθήκες
Κοινοί χάλυβες κατασκευών	St33, St34, St37, St42, St46, St52	St50, St60, St70
Χάλυβες επιβελτιώσεως	C22, Ck22, 25CrMo4	-
Χάλυβες ενανθράκωσης	C10, Ck10, C15, Ck15	Αυτοί που περιλαμβάνουν προσθήκες σε Cr, Ni, Mo
Χυτοχάλυβες	πρέπει %C <0.25% και άθροισμα προσθηκών < 10%	Ανοξειδωτοι χυτοχάλυβες
Χυτοσίδηροι	Λευκοί μαλακτικοποιημένοι	Όλοι οι υπόλοιποι χυτοσίδηροι

- Μη σιδηρούχα κράματα μετάλλων

Τα κράματα του χαλκού και του αλουμινίου μπορούν εύκολα να συγκολληθούν. Εξαιρούνται τα κράματα του αλουμινίου με πάνω από 5% μαγνήσιο και οι ορείχαλκοι με υψηλό ποσοστό ψευδαργύρου.

1.3 Αυτογενείς συγκολλήσεις

Η πηγή θερμότητας στις αυτογενείς συγκολλήσεις είναι:

- Ηλεκτρικό τόξο
- Φλόγα ασετυλίνης
- Δέσμη ηλεκτρονίων
- Ακτίνες laser

Ο αρμός που πρόκειται να συγκολληθεί πρέπει να προετοιμάζεται κατάλληλα. Η πηγή θερμότητας χρησιμεύει για να τήξει είτε το συγκολλούμενο μέταλλο στην περιοχή της σύνδεσης, είτε το συγκολλητικό υλικό μέσα στην σύνδεση. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι συνδέσεων ραφών: η εσωραφή (ραφή άκρων) και η εξωραφή (ραφή αυχένα). Στην συνέχεια

παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων μεθόδων αυτογενούς συγκόλλησης. Ειδική μνεία γίνεται στη μέθοδο SMAW (τεχνική του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου) που είναι η πιο κοινή μέθοδος συγκόλλησης τόξου και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα τεμάχια αυτής της εργασίας.

1.3.1 Μέθοδος συγκόλλησης τόξου

Η συγκόλληση τόξου ή ηλεκτροσυγκόλληση στηρίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου ανάμεσα στο κομμάτι, που θέλουμε να κολληθεί, και σε ένα ηλεκτρόδιο, που είναι ταυτόχρονα και συγκολλητικό μέσο. Για να γίνει αυτό, το ηλεκτρόδιο και το κομμάτι συνδέονται με τους ακροδέκτες γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη χρησιμοποιούνται ειδικές μηχανές που λέγονται μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, οι οποίες χρησιμοποιούν συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα και παράγουν το ηλεκτρικό τόξο. Λόγω του ηλεκτρικού τόξου, αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία στη θέση κόλλησης, γύρω στους 4000 °C. Στη θερμοκρασία αυτή το μέταλλο που συγκολλάται λιώνει, ενώ από πάνω του δημιουργείται ένα στρώμα αερίων, που προέρχονται από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Ταυτόχρονα με τη δημιουργία των αερίων, δημιουργείται πάνω από τη ραφή μία πάστα, επίσης από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Η πάστα αυτή βοηθά στην τήξη του μετάλλου και εμποδίζει τη γρήγορη απόψυξη, που θα είχε συνέπεια να βαφεί η ραφή. Η ραφή συγκόλλησης προκύπτει από το λιωμένο μέταλλο που συγκολλάται και από το λιωμένο μέταλλο του πυρήνα του ηλεκτροδίου. Ο συγκολλητής, για να ξεκινήσει τη διαδικασία συγκόλλησης, χτυπά ή τρίβει το ηλεκτρόδιο πάνω στο προς συγκόλληση τεμάχιο και στη συνέχεια το σηκώνει, διατηρώντας από κει και πέρα μία σταθερή απόσταση.

Οι μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ή συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και χαρακτηρίζονται από την ένταση του ρεύματος, που μπορούν να δώσουν, και την τάση του ρεύματος για το ξεκίνημα του τόξου (τάση εν κενώ). Η ένταση της συγκόλλησης ρυθμίζεται από ροοστάτες που βρίσκονται πάνω στις μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης, ενώ για κάθε ένταση ρεύματος προτείνεται και αντίστοιχο ηλεκτρόδιο. Επισημαίνεται ότι, με τη χρήση του ίδιου ηλεκτροδίου, η ένταση του ρεύματος πρέπει να

αυξάνεται, όσο το πάχος των ελασμάτων που θα κολληθούν είναι μεγαλύτερο. Τα συνήθη ηλεκτρόδια έχουν επένδυση που είναι κράμα διαφόρων οργανικών και ορυκτών συστατικών, ενώ ο πυρήνας τους είναι από μαλακό χάλυβα. Υπάρχουν και άλλα ηλεκτρόδια με πυρήνες από χαλυβοκράματα, χυτοσίδηρο κ.λπ., αλλά δε χρησιμοποιούνται συχνά και μόνο για ειδικές περιπτώσεις. Τα ηλεκτρόδια κυκλοφορούν σε πολλά μεγέθη με διαφορετικό μήκος και διάμετρο, όπως και με διαφορετικό πάχος επένδυσης. Τα ηλεκτρόδια έχουν τυποποιηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με Ευρωπαϊκά και άλλα διεθνή πρότυπα. Στην ετικέτα των κουτιών, στα οποία είναι συσκευασμένα τα ηλεκτρόδια, αναγράφονται αριθμοί και σύμβολα που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες του ηλεκτροδίου. Ο επόμενος πίνακας συγκεντρώνει ορισμένες από αυτές:

Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Μήκος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]
1,6	250	25
2,0	350	45
2,5	350	65
3,5	450	115
4,0	450	145
5,0	450	215
6,0	450	265
6,3	450	285
7,0	450	320
8,0	450	360

Η ηλεκτροσυγκόλληση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ορισμένα βασικά εξαρτήματα προστασίας. Αυτά είναι η μάσκα, που προστατεύει τα μάτια από τη λάμψη του ηλεκτρικού τόξου (δηλαδή από τις υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτίνες που καταστρέφουν τον αμφιβληστροειδή του ματιού), τα γάντια που προστατεύουν τα χέρια από πιθανά εγκαύματα και την ακτινοβολία, και η ποδιά που προστατεύει αντίστοιχα το υπόλοιπο σώμα. Εκτός από τον παραπάνω βασικό εξοπλισμό, στην ηλεκτροσυγκόλληση χρησιμοποιούνται περικνημίδες για τα πόδια και μανσέτες για τα χέρια. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο αερισμός που πρέπει να υπάρχει στο

χώρο εργασίας, ώστε να μην εισπνέονται από το συγκολλητή τα διάφορα αέρια που προκύπτουν από την συγκόλληση.

Οι συνηθισμένες συγκολλήσεις, που γίνονται με ηλεκτροσυγκόλληση, είναι οι μετωπικές ραφές και οι εξωραφές. Η προετοιμασία που πρέπει να γίνει στα ελάσματα πριν την ηλεκτροσυγκόλληση διαφέρει ανάμεσα στα δύο είδη, ενώ εξαρτάται και από τα πάχη των ελασμάτων. Οι εξωραφές είναι συγκολλήσεις ελασμάτων κάθετα μεταξύ τους σε αντίθεση με τις μετωπικές ραφές, που, όπως το λέει και η λέξη, είναι συγκολλήσεις κατά πρόσωπο.

1.3.1.1 Μέθοδος SMAW (Shield Metal Arc Welding)

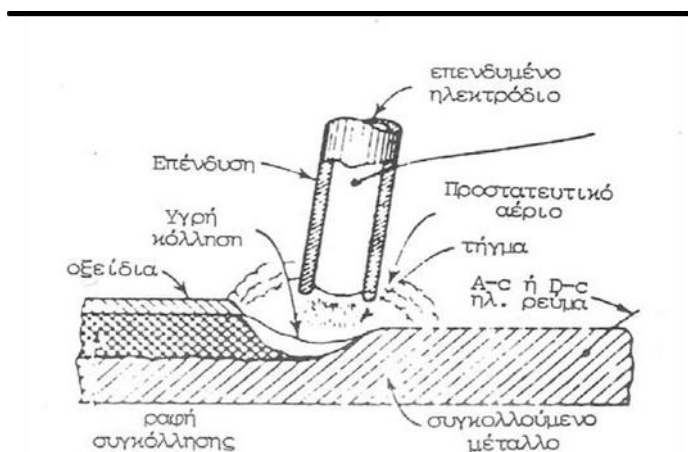
Η πιο γνωστή μέθοδος συγκόλλησης τόξου είναι η τεχνική του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου (SMAW) ή αλλιώς συγκόλληση με το χέρι. Είναι η απλούστερη και πιο ευέλικτη μέθοδος συγκόλλησης. Χρησιμοποιείται στο 50% περίπου των κατασκευαστικών και επισκευαστικών εργασιών συγκόλλησης.



1.1 Συγκόλληση τόξου

Για τη δημιουργία του τόξου ο χειριστής φέρνει σε επαφή το ηλεκτρόδιο με το συγκολλούμενο αντικείμενο, οπότε κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος και υπερθερμαίνεται το άκρο του ηλεκτροδίου. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόδιο απομακρύνεται απότομα σε μικρή απόσταση, ικανή να διατηρήσει το τόξο που μόλις έχει ανάψει. Το μήκος του τόξου είναι κατά προσέγγιση ίσο με τη

διάμετρο του ηλεκτροδίου (1-6 mm). Η αρχική τάση που εφαρμόζεται για τη δημιουργία του τόξου κυμαίνεται μεταξύ 40-50 V για συνεχές και από 50V έως 90 V για εναλλασσόμενο ρεύμα. Με την έναρξη του τόξου η τάση πέφτει στα 25-30 V και διατηρείται κατά προσέγγιση σταθερή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ενώ η ένταση του ρεύματος κυμαίνεται από 50 A έως 300 A. Στην περιοχή του τόξου θετικά ιόντα οδεύουν προς την αρνητικά φορτισμένη πλευρά του πεδίου, ενώ ηλεκτρόνια οδεύουν προς τη θετικά φορτισμένη πλευρά. Τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το πεδίο στην περιοχή του τόξου και αποκτούν κινητική ενέργεια. Όταν όμως προσκρούσουν είτε στο ηλεκτρόδιο είτε στη προς συγκόλληση μεταλλική επιφάνεια χάνουν αυτή την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή τήκει το ηλεκτρόδιο και την επένδυσή του καθώς και το βασικό μέταλλο στην περιοχή της σύνδεσης.



1.2 Συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο μεταλλικό ηλεκτρόδιο

Στην περίπτωση πηγής συνεχούς ρεύματος (dc current) η επιλογή της πολικότητας σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος της ζώνης συγκόλλησης, τα συγκολλούμενα μέταλλα και τον τύπο των ηλεκτροδίων. Όταν ο αρνητικός πόλος είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο και ο θετικός με το συγκολλούμενο τεμάχιο, έχουμε την λεγόμενη ευθεία πολικότητα (straight polarity). Στην περίπτωση αυτή το νέφος των ηλεκτρονίων προσπίπτει με μεγάλη ταχύτητα στο τεμάχιο το οποίο θερμαίνεται περισσότερο από το

ηλεκτρόδιο. Η κατάσταση αυτή είναι επιθυμητή στη συγκόλληση ογκωδών αντικειμένων.

Στην αντίστροφη πολικότητα (reverse polarity), το ηλεκτρόδιο είναι ο θετικός πόλος και το συγκολλούμενο μέταλλο ο αρνητικός. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα που διέρχεται από το ηλεκτρόδιο μειώνεται, κατάσταση επιθυμητή στη συγκόλληση λεπτών διατομών. Προτιμάται επίσης σε συγκολλήσεις κραμάτων μαγνησίου και αλουμινίου διότι εκεί το τόξο τείνει να απομακρύνει το στρώμα οξειδίων από τις συγκολλούμενες επιφάνειες.

Το συνεχές ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους συγκόλλησης, προσφέρει σταθερό τόξο και είναι προτιμητέο για δύσκολες θέσεις (π.χ. ουρανό). Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις το τόξο του συνεχούς ρεύματος εκτρέπεται από τη ευθεία (μαγνητικό φύσημα) λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου, με δυσμενή αποτελέσματα στην ποιότητα της ραφής. Τότε προτιμάται η συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα (ac current) που διαθέτει και το πλεονέκτημα του απλούστερου και φθηνότερου εξοπλισμού.

Το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι είτε ευθείας πολικότητας είτε ανάστροφης πολικότητας ή μπορεί να αλλάζει πολικότητα μέχρι 60 φορές το δευτερόλεπτο. Τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το πεδίο στην περιοχή του τόξου και αποκτούν κινητική ενέργεια. Όταν όμως προσκρούσουν είτε στο ηλεκτρόδιο είτε στο βασικό μέταλλο, χάνουν αυτή την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι τόσο το ηλεκτρόδιο όσο και το προς συγκόλληση μέταλλο τήκονται μέσα στην σύνδεση της συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια από τα ιόντα και επομένως είναι δυνατή μεγαλύτερη διείσδυση στην περιοχή της ραφής με ευθεία πολικότητα, ενώ με ανάστροφη πολικότητα επιτυγχάνεται εναπόθεση περισσοτέρου υλικού πλήρωσης. Επειδή το ηλεκτρόδιο εναποτίθεται μέσα στην ραφή, πρέπει να κατασκευάζεται από υλικό ανάλογο με τα συγκολλούμενα τεμάχια. Συνήθως για βασικό μέταλλο χάλυβα χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο από μαλακό χάλυβα, ενώ για βασικό μέταλλο αλουμίνιο το ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου. Το τηγμένο μέταλλο οξειδώνεται ταχύτατα και πρέπει να προστατεύεται, ώστε να αποφεύγεται υπερβολικό ποσοστό ακαθαρσιών στο εναπόθεμα.

Η επένδυση είναι ένα μίγμα συστατικών όπως SiO_2 , TiO_2 , FeO , MgO , Al_2O_3 και κελουλόζη και ο ρόλος της είναι πολλαπλός. Ενδεικτικά, ανάλογα με το είδος και την θέση της συγκόλλησης η επένδυση συμβάλει στα ακόλουθα:

- Συντελεί στη σταθερότητα και την διατήρηση της κατεύθυνσης του τόξου.
- Σχηματίζει ένα αεριώδες περίβλημα που προστατεύει από την ατμοσφαιρική μόλυνση.
- Ελέγχει την επιφανειακή τάση της λίμνης του τηγμένου υλικού και επηρεάζει την μορφή της ραφής κατά την στερεοποίηση.
- Συμβάλει στον καθαρισμό της περιοχής συγκόλλησης από τα επιβλαβή οξείδια.
- Προσθέτει χρήσιμα κραματικά στοιχεία στη ραφή συγκόλλησης.
- Δημιουργεί μια επένδυση (κρούστα) προστασίας στην κορυφή της ζώνη εναπόθεσης που συγκεντρώνει όλες τις ακαθαρσίες προστατεύοντας το ρευστό μέταλλο.
- Λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση του μεταλλικού σύρματος (πυρήνας ηλεκτροδίου)
- Δημιουργεί έναν αγωγό πλάσματος που υποβοηθεί την αγωγή του ρεύματος διαμέσου του τόξου.

Οι πιο διαδεδομένες τυποποιήσεις των ηλεκτροδίων είναι αυτές κατά DIN, ISO και AWS-ASTM. Το μέγεθος του ηλεκτροδίου καθορίζεται συνήθως από την διάμετρο του μεταλλικού σύρματος δεδομένου ότι το πάχος της επένδυσης διαφέρει κατά περίπτωση. Κατά AWS-ASTM (προδιαγραφή AWS-A5.1) τα ηλεκτρόδια έχουν μέγεθος 1/16", 3/32", 1/8", 5/32", 3/16", 1/4" και 5/16". Η πλήρης τυποποίηση έχει την μορφή EXXYZ (π.χ. E 6015) όπου το πρώτο γράμμα, (E), υποδηλώνει ηλεκτρόδιο με επένδυση, τα δύο ψηφία XX προσδιορίζουν την αντοχή του μεταλλικού σύρματος-πυρήνα σε εφελκυσμό (60: 60 000 psi, 80: 80 000 psi), το τρίτο ψηφίο Y καθορίζει τη θέση συγκόλλησης (1: όλες οι θέσεις, 2: οριζόντιες και επίπεδες κ.λπ) και το τέταρτο ψηφίο Z καθορίζει τύπο επένδυσης, πολικότητα και είδος ρεύματος για τα οποία το ηλεκτρόδιο είναι κατάλληλο (π.χ. 5: συνεχές ρεύμα, αντίστροφη πολικότητα).

Αν και η συγκόλληση με το χέρι είναι η πιο γνωστή τεχνική είναι περισσότερο εργαστηριακή μέθοδος, ενώ οι αυτόματες ή ημιαυτόματες μέθοδοι είναι πιο συνηθισμένες σε βιομηχανική χρήση. Σε μια πλήρως αυτόματη διαδικασία, είτε λειτουργία, η πηγή θερμότητας ρυθμίζεται με μηχανικό τρόπο, το τόξο ρυθμίζεται αυτόματα και το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται στην περιοχή συγκόλλησης με προκαθορισμένο ρυθμό από το ρολό σύρματος.

1.3.1.2 Μέθοδος GMAW / MIG-MAG (Gas Metal Arc Welding/Metal Inert Gas - Metal Actif Gas)

Σε μια ημιαυτόματη διαδικασία το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται ημιαυτόματα και το τόξο αυτορυθμίζεται, αλλά η πηγή θερμότητας κινείται στην περιοχή σύνδεσης με το χέρι. Οι συνήθεις αυτόματες ή ημιαυτόματες μέθοδοι είναι :

- *MIG* : Στην ηλεκτροσυγκόλληση M.I.G. το ηλεκτρόδιο αποτελεί και το συγκολλητικό υλικό. Το ηλεκτρόδιο δηλαδή καταναλίσκεται και τροφοδοτείται στη συγκόλληση από μία κουλούρα σύρματος. Το αέριο που χρησιμοποιείται είναι αργό ή μείγμα αργού με άλλα αδρανή αέρια.

- *MAG* : . Στην ηλεκτροσυγκόλληση M.A.G. (Metal Actif Gas) χρησιμοποιούνται ανθρακικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακος CO₂) ή μείγμα ανθρακικών αερίων και αργού. Το συγκολλητικό υλικό είναι σύρμα κυρίως από μαγγάνιο και πυρίτιο, ενώ περιέχει και πρόσθετα άλλων μετάλλων.

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν είτε αδρανές αέριο He ή Ar ή CO₂ σαν προστασία για την συγκόλληση αντί να γίνεται χρήση στρώματος σκουριάς ή κυτταρινικών αερίων προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην χειροκίνητη μέθοδο. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζονται υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις, με λιγότερες ακαθαρσίες, γεγονός σημαντικό για την συγκόλληση ειδικών χαλυβοκατασκευών και κραμάτων αλουμινίου, όπου η παρουσία οξειδίων αποτελεί μεγάλο πρόβλημα.

1.3.1.3 Μέθοδος SAW (Submerged Arc Welding)

Στη μέθοδο αυτή, το ηλεκτρικό τόξο προστατεύεται (καλύπτεται) από συλλίπασμα σε μορφή σκόνης που αποτελείται κυρίως από ασβέστη, πυρίτιο, οξείδιο του μαγγανίου και φθοριούχο ασβέστιο. Το ηλεκτρόδιο («γυμνό» σύρμα χωρίς επένδυση) που είναι τυλιγμένο σε τύμπανο έλκεται από Η/Κ που το τροφοδοτεί στην ζώνη συγκόλλησης. Πριν το ηλεκτρόδιο, διοχετεύεται στην ζώνη συγκόλλησης το συλλίπασμα, από χοάνη μέσω βαρύτητας. Το «γυμνό» ηλεκτρόδιο (διαμέτρου 1,5 - 10 mm) βυθίζεται στο συλλίπασμα και το τόξο ανάβει και λειτουργεί εσωτερικά, χωρίς την δημιουργία καπνού και την ακτινοβολία που ενυπάρχουν στην τεχνική SMAW. Ο ρόλος του συλλιπάσματος είναι ανάλογος της επένδυσης των ηλεκτροδίων χειροκίνητης συγκόλλησης. Το ρευστό συλλίπασμα επιπλέει στην επιφάνεια της συγκόλλησης και την καλύπτει. Η επικάλυψη (κρούστα) που σχηματίζεται απομακρύνεται εύκολα.

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (600 A - 2000 A) στη μέθοδο αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό,τι στη «χειροκίνητη» συγκόλληση, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο βάθος της ζώνης συγκόλλησης, ομοιομορφία και ποιότητα της ραφής και υψηλότερη παραγωγικότητα. Ο κύριος περιορισμός στην εφαρμογή της μεθόδου είναι η απαίτηση οριζόντιας θέσης συγκόλλησης και η χρήση υποστηρικτικού ελάσματος στη ρίζα της ραφής.

1.3.1.4 Μέθοδος ESW (Electro Slag Welding)

Η ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1950 ως βελτίωση της συγκόλλησης βυθισμένου τόξου. Εφαρμόζεται για αυτόματη μετωπική συγκόλληση σε κατακόρυφη θέση και αναγόμωση. Η κόλληση γίνεται με ένα πέρασμα (κορδόνι) γεγονός που έχει θετική επίδραση τόσο από άποψη κόστους όσο και λόγω της μείωσης των παραμενουσών τάσεων και των επαγόμενων παραμορφώσεων.

Η περιοχή της συγκόλλησης περικλείεται με υδροψυκτα χάλκινα επικαλύμματα (πέλματα) που χρησιμεύουν για την συγκράτηση του τηγμένου μετάλλου και της τηγμένης σκουριάς που δημιουργείται από το συλλίπασμα.

Τα πέλματα κινούνται κατακόρυφα μαζί με την μηχανή συγκόλλησης. Εντός του χώρου συγκόλλησης τροφοδοτείται το ηλεκτρόδιο / σύρμα (ένα ή περισσότερα) και το συλλίπασμα (flux). Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που θερμαίνει το συλλίπασμα και το τήκει, μετατρέποντας το σε σκουριά (slag). Κατόπιν το τόξο σβήνει και η αγωγίμη σκουριά παραμένει τηγμένη με την βοήθεια της ωμικής της αντίστασης στο ρεύμα που διοχετεύεται μεταξύ του ηλεκτροδίου και των ελασμάτων. Η σύντηξη των μετάλλων προκαλείται με την βοήθεια της τηγμένης σκουριάς που τήκει το προστιθέμενο μέταλλο και τις επιφάνειες των προς συγκόλληση ελασμάτων.

Το τηγμένο ηλεκτρόδιο και υλικό των ελασμάτων συγκεντρώνεται κάτω από την τηγμένη σκουριά και σιγά-σιγά στερεοποιούνται για να σχηματίσουν την ραφή συγκόλλησης. Η σταδιακή αυτή στερεοποίηση γίνεται από κάτω προς τα άνω ώστε διαρκώς να υπάρχει τηγμένο μέταλλο πάνω από την στερεοποιημένη ραφή. Η τηγμένη σκουριά προστατεύει το τηγμένο μέταλλο από ακαθαρσίες και την επαφή με τον αέρα.

Η ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση εφαρμόζεται για ελάσματα πάχους μεταξύ 50-900 mm (2-36 in). Η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνεται, ανάλογα με τον εξοπλισμό, από 12 έως 36 mm/min, η δε ένταση του ρεύματος κυμαίνεται περί τα 600 A με τάση 30-60 V. Η ποιότητα της ραφής είναι καλή και η μέθοδος εφαρμόζεται στη συγκόλληση βαρέων οχημάτων και μηχανών, στην κατασκευή δοχείων πίεσης και ιδιαίτερα στη ναυπηγική βιομηχανία.

1.3.1.5 Μέθοδος GTAW / TIG (Gas Tungsten Arc Welding / Tungsten Inert Gas)

Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση μη αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Το τόξο δημιουργείται μεταξύ μιας ακίδας / ηλεκτροδίου βολφραμίου που συγκρατείται στην λαβίδα και του προς συγκόλληση αντικειμένου. Λόγω του υψηλού σημείου τήξης του βολφραμίου, το ηλεκτρόδιο δεν φθείρεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Το πρόσθετο υλικό συγκόλλησης είναι κράμα παρόμοιο με τα συγκολλούμενα τεμάχια σε μορφή ράβδου / σύρματος χωρίς

επικάλυψη. Σε λεπτά τεμάχια τοποθετημένα χωρίς μεγάλο διάκενο (close fit joints) η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς πρόσθετο υλικό. Η ροή του προστατευτικού αερίου (αργόν, ήλιον ή μίγμα αυτών με προσθήκη αζώτου ή/και υδρογόνου) γίνεται μέσω της λαβίδας συγκόλλησης όπως και στη μέθοδο GMAW.

Με την μέθοδο TIG επιτυγχάνονται ραφές συγκόλλησης πολύ καλής ποιότητας.

1.3.2 Μέθοδος πλάσματος (PAW / Plasma Arc Welding)

Για την παραγωγή πλάσματος χρησιμοποιείται η αρχή του ηλεκτρικού τόξου. Το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων τα οποία ψύχονται εσωτερικά με νερό. Στο χώρο μεταξύ αυτών των ηλεκτροδίων διοχετεύεται η κύρια παροχή αερίου συνήθως αργού ή αζώτου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια δέσμη αερίου υψηλής θερμοκρασίας σε κατάσταση ιονισμού. Το ηλεκτρόδιο περιβάλλεται από ένα κέλυφος ηλεκτρικά μονωμένο. Στο χώρο μεταξύ των δύο διοχετεύεται η δευτερεύουσα παροχή αερίου, η οποία συμπαρασύρει και το μέταλλο της κόλλησης σε μορφή σκόνης. Το μέταλλο αυτό ερχόμενο σε επαφή με την κύρια δέσμη του ιονισμένου αερίου τήκεται, ιονίζεται και εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα από το στόμιο του όπλου. Για την συγκράτηση της δέσμης του πλάσματος χρησιμοποιείται το κέλυφος, στο οποίο διοχετεύεται το αέριο προστασίας. Το όπλο πλάσματος έχει δύο χρήσεις:

1. Για κοπή και συγκόλληση υλικών.
2. Για την επιμετάλλωση υλικών.

Με το όπλο πλάσματος είναι δυνατή η δημιουργία υψηλής ποιότητας επιμεταλλώσεων σε μέταλλα ή κεραμικά, αλλά είναι επίσης δυνατή η συγκόλληση διστήκτων μετάλλων.

1.3.3 Μέθοδος συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων EBW (Electron Beam Welding)

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960. Η θερμότητα που απαιτείται για την συγκόλληση προέρχεται απ' την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του προς συγκόλληση τεμαχίου. Η μέθοδος απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την δημιουργία και την εστίαση της δέσμης σε περιβάλλον κενού. Τα ηλεκτρόνια δημιουργούνται μέσω θερμιονικής εκπομπής σε γεννήτρια ηλεκτρονίων (electron gun) και εν συνεχεία επιταχύνονται και συγκλίνουν σε μία εστιασμένη δέσμη διαμέτρου υψηλής πυκνότητας ενέργειας (μέχρι 10 kW/mm² για συγκόλληση και μέχρι 200 kW/mm² για κοπή). Η παραγωγή της δέσμης γίνεται πάντα εν κενώ (σε vacuum chamber) Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν και τα προς συγκόλληση τεμάχια βρίσκονται σε χώρο «υψηλού κενού».

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση όλων σχεδόν των μετάλλων, χωρίς προστατευτικά αέρια, συλλίπασμα ή πρόσθετο υλικό (filler material). Χρησιμοποιείται για πάχος μετάλλου μέχρι 150 mm (6 in) με ταχύτητα συγκόλλησης που δύναται να φτάσει, ανάλογα με τον εξοπλισμό, τα 12 m/min. Οι συνήθεις εφαρμογές αφορούν συγκολλήσεις πάχους 0,1 - 30 mm.

Η ποιότητα της συγκόλλησης που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο EBW είναι πολύ καλή, με λόγο βάθος προς πλάτος συγκόλλησης 10 - 30. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη καθαρότητα της ραφής και οι μικρές παραμορφώσεις των μετάλλων γύρω από την ζώνη συγκόλλησης, η δυνατότητα πρόσβασης σε «δύσκολες» θέσεις συγκόλλησης και η εύκολη αλλαγή των παραμέτρων κατά των εξέλιξη της διαδικασίας.

Οι παράμετροι συγκόλλησης, ρυθμίζονται στις σύγχρονες διατάξεις μέσω μικροϋπολογιστών. Η μέθοδος έχει ευρείες εφαρμογές στην αεροναυπηγική, την ηλεκτρονική και την πυρηνική βιομηχανία ενώ η χρήση της επεκτείνεται και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επισημαίνεται ότι ο εξοπλισμός EBW παράγει ακτίνες-x, και κατά συνέπεια τίθεται θέμα αυστηρής συντήρησης και έλεγχου του εξοπλισμού και λήψη μέτρων ακτινοπροστασίας.

1.3.4 Μέθοδος LBW / laser beam welding

Η συγκόλληση με δέσμη Laser αξιοποιεί τη ροή φωτονίων υψηλής ισχύος ως πηγή θερμότητας για την τήξη της περιοχής επαφής των προς συγκόλληση εξαρτημάτων. Η τήξη πραγματοποιείται με ένα ή περισσότερα περάσματα, με ή χωρίς πρόσθετο υλικό. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για βαθιές και λεπτές συνδέσεις με λόγο βάθος προς πλάτος από 4 έως 10.

Το Laser είναι ένα εργαλείο θερμικής φύσης το οποίο, μέσω της εστιασμένης σε συγκεκριμένη θέση δέσμης μονοχρωματικού φωτός, αφαιρεί, τήκει ή τροποποιεί επιφανειακά ένα υλικό.

1.3.5 Μέθοδος οξυγονοκόλλησης (OFW / Oxygen Fuel Welding)

Η συγκόλληση αερίου ή αλλιώς οξυγονοκόλληση είναι η πιο γνωστή μέθοδος συγκόλλησης. Γίνεται με χρήση φλόγας υψηλής θερμοκρασίας από την καύση εύφλεκτου αερίου και οξυγόνου. Η φλόγα είναι η απαραίτητη πηγή θερμότητας για την τήξη του μετάλλου στην περιοχή της σύνδεσης. Ως αέριο καύσης χρησιμοποιείται κυρίως η ασετυλίνη λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας φλόγας (~ 3100 °C). και της εύκολης βιομηχανικής παρασκευής της, ενώ σπανιότερα το υδρογόνο, το μεθάνιο, το προπάνιο κ.α.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη συγκόλληση και κοπή ελασμάτων κατά την κατασκευή και συντήρηση αμαξωμάτων, δομικών μεταλλικών κατασκευών και πλοίων. Εφαρμόζεται στα περισσότερα σιδηρούχα και μη μέταλλα, σε ελάσματα πάχους μέχρι 30 mm.

Το καύσιμο αέριο (ασετυλίνη) διατηρείται υπό πίεση (~15 at) σε φιάλη με πορώδη μάζα ακετόνης και σε θερμοκρασία 15 °C. Το οξυγόνο αποθηκεύεται επίσης σε χαλύβδινη φιάλη υπό πίεση (~150 at). Η ανάμιξη του οξυγόνου με την ασετυλίνη γίνεται στο δαυλό ή καυστήρα.

1.3.6 Συγκόλληση αντίστασης (Resistance Welding)

Όταν ένα σχετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα διέλθει από δύο επιφάνειες σε επαφή, συναντά εσωτερική αντίσταση αναπτύσσοντας έτσι κατά τα γνωστά θερμότητα λόγω αντίστασης, που συγκεντρώνεται τοπικά στην περιοχή σύνδεσης. Αυτή είναι η αρχή της μεθόδου συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση (resistance welding / RW).

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη ζώνη επαφής των δύο ελασμάτων εξαρτάται από την ειδική θερμότητα και την θερμική αγωγιμότητα των υλικών. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για συγκόλληση είτε ίδιων είτε διαφορετικών υλικών.

1.3.7 Υπέρηχοι

Η συγκόλληση με υπέρηχους πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα του 20ου αιώνα. Τα τεμάχια συνδέονται μεταξύ τους μέσω πίεσης με ταυτόχρονη ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Η ταλάντωση αυτή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στη θέση συγκόλλησης και η πίεση ανάμεσα στα κομμάτια δημιουργεί την τελική σύνδεση.

1.4 Ετερογενείς συγκολλήσεις

Το κύριο χαρακτηριστικό των ετερογενών συγκολλήσεων είναι η διαφορετική χημική σύνθεση του συγκολλητικού υλικού από εκείνη του βασικού μετάλλου. Η σύνδεση των τεμαχίων στην ετερογενή συγκόλληση επιτυγχάνεται κυρίως με την διείσδυση της ρευστοποιημένης κόλλησης μέσα στους πόρους των συγκολλημένων μεταλλικών επιφανειών και την ανάπτυξη μοριακών δυνάμεων με τον σχηματισμό κραμάτων στην περιοχή της σύνδεσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία μιας ετερογενούς

συγκόλλησης είναι ο απόλυτος καθαρισμός των επιφανειών συγκόλλησης και η αποφυγή εισόδου αέρα στην ραφή, για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει να γίνει χρήση κατάλληλου υλικού καθαρισμού. Ανάλογα με το σημείο τήξης του συγκολλητικού υλικού οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε :

- Μαλακές συγκολλήσεις με σημείο τήξης να μην υπερβαίνει τους 500 °C
- Σκληρές συγκολλήσεις με σημείο τήξης άνω των 500 °C

Επίσης ανάλογα με την χημική σύνδεση του βασικού μετάλλου οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε :

- Συγκολλήσεις βαρέων μετάλλων (χαλύβων, κραμάτων χαλκού)
- Συγκολλήσεις ελαφρών μετάλλων (αργιλίου, κραμάτων ελαφρών μετάλλων

Συνήθως οι ετερογενείς συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται:

- Όταν για διάφορους λόγους αποκλείεται η αυτογενής συγκόλληση
- Όταν επιδιώκεται θέρμανση των τεμαχίων σε θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο τήξης τους
- Στην περίπτωση μαζικής παραγωγής όταν η αντοχή της ετερογενούς συγκόλλησης είναι ικανοποιητική
- Όταν χρειάζεται να πληρωθούν μεταλλικές κοιλότητες

1.4.1. Μαλακές ετερογενείς συγκολλήσεις

Η πιο τυπική περίπτωση μαλακής ετερογενούς συγκόλλησης είναι η κασσιτεροκόλληση. Το υλικό της συγκόλλησης είναι κράμα κασσίτερου και μολύβδου σε διάφορες αναλογίες, με μικρή ποσότητα αντιμονίου, που καθιστά την κόλληση πιο ανθεκτική και την κάνει ταυτόχρονα πιο σκληρή.

Μια άλλη βασική μέθοδος μαλακής ετερογενούς συγκόλλησης είναι η μολυβδοκόλληση. Γίνεται συνήθως χωρίς συγκολλητικό υλικό, επειδή χρησιμοποιείται κυρίως για συγκόλληση μολύβδινων τεμαχίων.

1.4.2. Σκληρές ετερογενείς συγκολλήσεις

Οι σπουδαιότερες σκληρές κολλήσεις είναι κράματα χαλκού και ψευδάργυρου, με μικρή περιεκτικότητα σε κασσίτερο, άργυρο, και νικέλιο. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άργυρο οι σκληρές συγκολλήσεις διακρίνονται σε :

- Μπρουτζοκολλήσεις με περιεκτικότητα σε άργυρο < 8%
- Ασημοκολλήσεις με περιεκτικότητα σε άργυρο > 8%

1.5. Συγκολλήσεις στερεάς φάσης ή πίεσης

1.5.1. Συγκόλληση σύνδεσης στερεάς κατάστασης

Όλα τα μέταλλα και τα κράματα, πλην του χρυσού, περιέχουν επιφανειακό στρώμα οξειδίου. Στην πραγματικότητα το στρώμα οξειδίου αποτελεί προστασία έναντι του περιβάλλοντος. Όσα μέταλλα έχουν ισχυρά προσφυόμενα οξείδια, όπως το αλουμίνιο, προστατεύονται ικανοποιητικά, ενώ όσα παρέχουν χαλαρά προσφυόμενα στρώματα οξειδίου, υπόκεινται σε μεγαλύτερη φθορά από το περιβάλλον. Τα οξείδια μπορούν να απομακρυνθούν αλλά σχηματίζονται σχεδόν αμέσως. Αν δύο επιφάνειες απαλλαγμένες από οξείδια έλθουν σε επαφή μεταξύ τους, τότε συγκολλώνται αυτόματα. Αυτή είναι στην ουσία η αρχή της σύνδεσης στερεάς κατάστασης.

1.5.2. Συγκόλληση σφυρηλάτησης

Με σφυρηλάτηση θραύονται τα επιφανειακά οξείδια και η επιπλέον πλαστική παραμόρφωση φέρνει σε επαφή τις δύο επιφάνειες, πρόκειται δηλαδή για εν ψυχρώ συγκόλληση.

1.5.3. Θερμή συγκόλληση στερεάς φάσης

Σε αυτή την περίπτωση συνδυάζεται θερμότητα και πίεση για να προκαλέσουν μεταφορά με διάχυση του υλικού μέσω της ενδιάμεσης επιφάνειας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν :

- Η συγκόλληση διάχυσης
- Η συγκόλληση θερμής σφυρηλάτησης
- Η συγκόλληση αντίστασης με υψίσυχο ρεύμα

1.5.4. Συγκόλληση με τριβή (Friction Welding)

Η συγκόλληση με τριβή αποτελεί μια παραλλαγή των μεθόδων θερμής στερεάς φάσης. Τα δύο τεμάχια συγκολλώνται με τη βοήθεια της θερμότητας, που παράγεται από την τριβή του ενός πάνω στο άλλο. Στην πράξη, το ένα από τα δύο τεμάχια περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και συμπιέζεται πάνω στο τεμάχιο που θα συγκολληθεί. Οι μεταξύ τους επιφάνειες τρίβονται έντονα, θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία συγκόλλησης και τότε η περιστροφή σταματά. Με τη συνεχιζόμενη πίεση ανάμεσα στα δύο κομμάτια επιτυγχάνεται η συγκόλληση. Αυτή η μέθοδος έχει βρει εφαρμογές στη συγκόλληση των κοπτικών πλακιδίων σε μανέλες κοπτικών εργαλείων, συγκόλληση ράβδων κ.λπ.

1.6 Σφάλματα συγκολλήσεων

1.6.1 Έννοια της ποιότητας συγκόλλησης

Τα τελευταία χρόνια, οι απαιτήσεις που επιβάλλει το κοινωνικό σύνολο για πιο αξιόπιστες κατασκευές, μαζί με τη ταυτόχρονη αύξηση της πολυπλοκότητας της τεχνολογίας και την ανάγκη για την όσο το δυνατό καλύτερη χρήση των πρώτων υλών, έχουν ωθήσει στο να δοθεί μεγάλη

έμφαση στη ποιότητα των συγκολλήσεων. Παρόλα αυτά, δεν είναι σαφές σε πολλές περιπτώσεις τι σημαίνει ο όρος «ποιότητα συγκόλλησης».

Σε γενικές γραμμές μπορεί να αναφερθεί ότι για να έχει μια συγκολλητή κατασκευή την απαιτούμενη αξιοπιστία κατά τη διάρκεια της ζωής της, πρέπει να έχει ικανοποιητική ποιότητα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει:

1. Να έχει σχεδιαστεί κατά τρόπο ώστε να είναι κατάλληλη για την επιδιωκόμενη χρήση της σε όλη τη διάρκεια της υπολογισθείσας ζωής της.

2. Να έχει κατασκευαστεί από υλικά και μεθόδους συγκόλλησης σύμφωνα με τις απαιτήσεις.

3. Να χρησιμοποιείται και να συντηρείται σωστά.

Στη περίπτωση της ποιότητας συγκόλλησης, η καταλληλότητα για την επιδιωκόμενη χρήση συνδέεται άμεσα με τη φιλοσοφία της αποδοχής ορισμένων σφαλμάτων, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να περιέχονται σε κώδικες και προδιαγραφές ή να προκύπτουν από την εφαρμογή της μηχανικής θεωρίας της θραύσης.

Στον όρο ποιότητα συγκόλλησης, περιλαμβάνονται και άλλα χαρακτηριστικά, όπως σκληρότητα, χημική σύνθεση και δυσθραυστότητα της συγκόλλησης. Συνδυάζοντας κανείς όλα αυτά τα χαρακτηριστικά και εκτιμώντας τους πιθανούς τρόπους αστοχίας μιας συγκόλλησης μπορεί κανείς να καταλήξει στο συμπέρασμα του κατά πόσο η συγκόλληση αυτή είναι κατάλληλη για την επιδιωκόμενη χρήση.

Ο καθορισμός των συνολικών απαιτήσεων ποιότητας μιας συγκολλητής κατασκευής είναι μια πολύ σημαντική προσπάθεια στην οποία παίρνουν μέρος ομάδες μελετητών και μηχανικών. Σκοπός της όλης προσπάθειας είναι η καταγραφή των απαιτήσεων που θα οδηγήσουν στο να καταστεί το προϊόν κατάλληλο για την επιδιωκόμενη χρήση. Οι απαιτήσεις αυτές δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ αυστηρές, γιατί έτσι θα αυξηθεί το κόστος παραγωγής χωρίς λόγο, ούτε πολύ χαλαρές, γιατί αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος συντήρησης και σε ελάττωση της χρήσιμης ζωής του προϊόντος.

Βάση των οδηγιών που παρέχονται από τους κώδικες και τις προδιαγραφές πρέπει για τον σκοπό αυτό να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθοι βασικοί παράγοντες:

1. Συνθήκες Υπηρεσίας

- Εντατική κατάσταση. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μεγέθη συγκολλήσεων, ώστε να μη δημιουργούνται υπερβολικά υψηλές τάσεις.
- Είδος τάσεων. Όπου υπάρχουν δυναμικές ή εναλλασσόμενες φορτίσεις, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κόπωση.
- Θερμοκρασίες υπηρεσίας. Χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες απαιτούν μελέτη έναντι ψαθυρής θραύσης και ερπυσμού αντίστοιχα.
- Διάβρωση και φθορά.

2. Ιδιότητες Υλικών. Πρέπει να επιλέγεται υλικό με τις κατάλληλες ιδιότητες αντοχής, δυσθραυστότητας, αντοχής σε διάβρωση κλπ. Ακόμη, ο κατασκευαστής δεν πρέπει να χρησιμοποιεί κατεργασίες που χειροτερεύουν τις ιδιότητες αυτές, π.χ. ψυχρή και θερμή διαμόρφωση, θερμικές κατεργασίες μετά τη συγκόλληση, υπερβολική ή ανεπαρκής πρόσδοση θερμότητας.

3. Γεωμετρικές Ατέλειες. Η μελέτη πρέπει να περιορίζει τις γεωμετρικές ατέλειες, έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ρηγμάτωσης. Ο κατασκευαστής πρέπει να χρησιμοποιεί μεθόδους που να μην επιτρέπουν τη δημιουργία τους στις συγκολλήσεις.

4. Κίνδυνος Δημιουργίας Σφαλμάτων Συγκόλλησης. Ο κίνδυνος δημιουργίας σφαλμάτων είναι μεγάλος όταν, μέταλλα που συγκολλούνται δύσκολα, συγκολλούνται σε ακατάλληλες θέσεις ή σε μέρη που είναι δύσκολη η εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου.

5. Κίνδυνος Μη Εντοπισμού Σφαλμάτων Συγκόλλησης. Οι αυχενικές συγκολλήσεις (σχήματος «T») είναι γενικά δύσκολο να ελεγχθούν εσωτερικά.

6. Επιπτώσεις Πιθανής Αστοχίας. Όπου η πιθανότητα αστοχίας του προϊόντος είναι αυξημένη, εκεί απαιτείται καλύτερη ποιότητα και αυξημένες ανάγκες ελέγχου.

1.6.2 Ταξινόμηση τυπικών σφαλμάτων συγκόλλησης

Μια ασυνέχεια αποτελεί μια διακοπή της τυπικής δομής μιας συγκόλλησης όπως για παράδειγμα είναι η ανομοιογένεια στις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού ή μιας συγκόλλησης ή ακόμα και ανομοιογένεια στις μεταλλουργικές και φυσικές ιδιότητες αυτού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως μια ασυνέχεια δεν αποτελεί απαραίτητα και σφάλμα.

Μια συγκόλληση η οποία δεν πληροί τις ελάχιστες προϋποθέσεις κάποιας συγκεκριμένης τυποποίησης ή ενός κώδικα θεωρείται ως ελαττωματική συγκόλληση. Ταυτόχρονα η αποτίμηση μιας ελαττωματικής συγκόλλησης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αν δεν γίνει με αναφορά κάποια τυποποίηση ή κώδικα σχετικό με την χρήση για την οποία προορίζεται η εκάστοτε συγκόλληση. Όπως αναφέραμε και παραπάνω μια ασυνέχεια σε κάποια συγκόλληση δεν αποτελεί απαραίτητα και ελάττωμα. Κάποιες κατηγορίες και υποκατηγορίες ασυνεχειών είναι οι ακόλουθες :

1. Ασυνέχειες που σχετίζονται με τις γεωμετρικές και σχεδιαστικές απαιτήσεις μιας συγκόλλησης.

- Ανακριβές μέγεθος συγκόλλησης
- Παραμορφώσεις / Διαστρεβλώσεις
- Ανακριβές προφίλ/κατατομή συγκόλλησης
- Ανακριβείς τελικές διαστάσεις
- Υπερβολική ενίσχυση της συγκόλλησης ή αλλιώς υπερβολική χρήση συγκολλητού υλικού

2. Ασυνέχειες που σχετίζονται με την ίδια την συγκόλληση και την εσωτερική δομή αυτής.

- Πόροι/Σπηλαιώσεις
- Εγκλείσματα σκουριάς
- Εγκλείσματα βολφραμίου
- Ατελής τήξη
- Ανεπαρκής διείσδυση
- Υποκοπή
- Ρωγμές
- Επιφανειακές ανωμαλίες

- Λοιπές ανωμαλίες

3. Ασυνέχειες που σχετίζονται με τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των συγκολληθέντων μετάλλων και των υλικών που χρησιμοποιούνται για συγκόλληση.

1.6.3 Ασυνέχειες γεωμετρίας και διαστάσεων

Η δημιουργία μιας αποδεκτής συγκόλλησης απαιτεί την τήρηση συγκεκριμένων μεγεθών και σχημάτων που βρίσκονται σε εναρμόνιση με τα σχέδια της συγκόλλησης. Προφανώς όμως και μπορούν να υπάρξουν κάποιες ανοχές για τις διαστάσεις και τα σχήματα κάποιας συγκόλλησης βάση πάντα κάποια τυποποίηση ή κάποιον κώδικα.

1. Παραμορφώσεις / Στρεβλώσεις

Κατά την διάρκεια μιας συγκόλλησης απαιτείται η θέρμανση και η τήξη του μετάλλου με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Η εμφάνιση υψηλών τάσεων είναι αποτέλεσμα θερμικών συστολών και διαστολών αλλά και αποτέλεσμα της στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης. Αυτές οι τάσεις θα παραμείνουν στην δομή της συγκόλλησης ακόμα και μετά την απόψυξη. Τέτοιες τάσεις έχουν σαν αποτέλεσμα να προκαλούν παραμορφώσεις. Για να αποφευχθούν θα πρέπει τα τεμάχια που θα συγκολληθούν θα πρέπει να σταθεροποιούνται από άκαμπτα εξαρτήματα, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή διαδικασιών συγκόλλησης. Στις περιπτώσεις που οι παραμορφώσεις δεν αποφεύγονται μπορούν να διορθωθούν ως ακολούθως :

- Εφαρμόζεται κατάλληλη διαδικασία σφυρηλάτησης όταν βέβαια αυτή επιτρέπεται από την εκάστοτε τυποποίηση που ακολουθείται
- Επαναφορά της συγκόλλησης στην σωστή διεύθυνση με ή χωρίς την εφαρμογή κατεργασιών θερμότητας
- Αφαίρεση των μερών της συγκόλλησης που προκαλούν την παραμόρφωση

- Επιπρόσθετη συγκόλληση σε συγκεκριμένα σημεία με σκοπό την ανάπτυξη αντίθετων τάσεων από αυτές που παραμόρφωσαν προηγουμένως την κατασκευή

II. Ανακριβές μέγεθος συγκόλλησης

Συγκολλήσεις που δεν διαθέτουν το σωστό μέγεθος, δηλαδή είναι είτε πολύ μεγάλες είτε πολύ μικρές και δεν ακολουθούν τις τυποποιήσεις με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να διαφέρουν από αυτές που η χρήση τους απαιτεί. Συγκολλήσεις εσφαλμένου μεγέθους εντοπίζονται συνήθως είτε με οπτικό τρόπο είτε με την σύγκριση τους με πρότυπα δείγματα.

III. Ανακριβές προφίλ / κατατομή συγκόλλησης

Το προφίλ μιας συγκόλλησης μπορεί να επηρεάσει με αξιοσημείωτο τρόπο την απόδοση αυτής σε διάφορες φορτίσεις. Το προφίλ ενός στρώματος μιας συγκόλλησης που αποτελείται από πολλές στρώσεις μπορεί να έχει μεγάλη σχέση με την εμφάνιση διαφόρων άλλων ασυνεχειών όπως είναι τα εγκλείσματα και η ατελής τήξη. Ένα τέτοιο σφάλμα ανακριβούς προφίλ αποτελεί η λεγόμενη υπερκάλυψη. Η υπερκάλυψη είναι μια κατάσταση στην οποία το μέταλλο συγκόλλησης ξεπερνά τα όρια που έχουν οριστεί για αυτή με αποτέλεσμα να υπερκαλύπτει άλλα μέρη του προς συγκόλληση αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται εγκοπές που είναι επικίνδυνες σε διάφορες συγκεντρώσεις τάσεων και φορτίσεων. Τέτοια σφάλματα προκαλούνται λόγω εσφαλμένων διαδικασιών και τεχνικών συγκόλλησης.

IV. Ανακριβείς τελικές διαστάσεις

Οι συγκολλήσεις όταν κατασκευάζονται ακολουθούν συγκεκριμένες τυποποιήσεις και σχέδια με σκοπό να έχουν συγκεκριμένα μεγέθη και διαστάσεις. Όταν οι διαστάσεις αυτές για διάφορους λόγους, που συνήθως έχουν να κάνουν με την χρήση μη κατάλληλων διαδικασιών και τεχνικών, δεν επιτευχθούν τότε οι ιδιότητες της συγκολλητής κατασκευής δεν θα είναι οι αποδεκτές, είτε διότι δεν θα καλύπτονται οι απαιτήσεις σε φορτίσεις διαφόρων τάσεων, είτε λόγω διαφορετικού τελικού μεγέθους θα είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό που σχεδιάσθηκε.

1.6.4 Ελαττώματα / σφάλματα συγκολλήσεων

Λόγω του θερμικού κύκλου και των συνεπακόλουθων μεταλλουργικών μεταβολών στη θέση μιας ραφής συγκόλλησης αναπτύσσονται ατέλειες και ασυνέχειες στη σύνδεση (discontinuities), με άμεσες συνέπειες στην ποιότητα της συγκόλλησης. Στη συνέχεια περιγράφονται τα συνηθέστερα σφάλματα.

1.6.4.1 Ρωγμές

Οι ρωγμές αποτελούν τη πρώτη βασική κατηγορία σφαλμάτων συγκόλλησης. Η ρωγμή ορίζεται σαν μία ασυνέχεια υλικού οφειλόμενη σε θραύση και χαρακτηρίζεται από οξύ άκρο και μεγάλους λόγους μήκους και πλάτους προς το άνοιγμά της. Οι ρωγμές αποτελούν τη πιο επικίνδυνη μορφή σφάλματος σε συγκολλητές κατασκευές, γιατί κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να επεκταθούν με μεγάλη ταχύτητα και να προκαλέσουν τη κατάρρευση της κατασκευής.

Ανάλογα με την ιστορία της θερμικής ζώνης οι ρωγμές αναπτύσσονται είτε στο σώμα της ραφής είτε στο βασικό μέταλλο (θερμικά επηρεασμένη ζώνη), κοντά στο όριο της ζώνης τήξης (παραπλευρες ρωγμές). Οι τυπικές μορφές των ρωγμών είναι διαμήκεις, εγκάρσιες, επιφανειακές ή εσωτερικές. Η εμφάνιση των ρωγμών αυτών οφείλεται σε έναν ή σε περισσότερα από τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασιακές μεταβολές που δημιουργούν θερμικές τάσεις στη ζώνη συγκόλλησης
- Διακυμάνσεις της χημικής σύστασης στη ζώνη συγκόλλησης που προκαλούν μη συμβιβαστές μεταξύ τους τοπικές συστολές
- Ψαθυροποίηση των ορίων των κόκκων
- Ψαθυροποίηση λόγω παρουσίας υδρογόνου (hydrogen embrittlement)
- Αδυναμία της ζώνης συγκόλλησης να συσταθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης. Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο αυτό είναι αντίστοιχο με την εμφάνιση των θερμών ρωγμών (hot tears) κατά τη χύτευση.

Ως μέτρα αποφυγής εμφάνισης ρωγμών σημειώνονται τα ακόλουθα:

- Τροποποίηση της σχεδίασης της συγκόλλησης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές τάσεις που οφείλονται σε συστολή κατά την ψύξη

- Αλλαγή της ακολουθίας των «πάσων» της συγκόλλησης ή και των παραμέτρων συγκόλλησης

- Προθέρμανση των προς συγκόλληση ελασμάτων

- Αποφυγή της ταχείας ψύξης της συγκολληθείσας κατασκευής

1.6.4.2 Σπηλαιώσεις

Οι σπηλαιώσεις αποτελούν τη δεύτερη πιο μεγάλη κατηγορία των σφαλμάτων συγκόλλησης. Το πιο συνηθισμένο τέτοιο σφάλμα είναι οι πόροι που ορίζονται σαν «σπηλαιώδεις ασυνέχειες που δημιουργούνται από τη παγίδευση αερίων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης». Η εμφάνιση πόρων οφείλεται σε εγκλείσματα αερίων. Τα αέρια αυτά δημιουργούνται κατά την τήξη της περιοχής συγκόλλησης και παγιδεύονται κατά την επαναστερεοποίηση. Γενικά όλες οι συγκολλήσεις περιέχουν κάποιους πόρους οι οποίοι κατά κανόνα έχουν σχήμα σφαιρικό ή μορφή επιμηκυσμένων κοιλοτήτων. Η εμφάνιση των πόρων δεν είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για την λειτουργικότητα της συγκόλλησης εκτός αν υπάρχουν ταυτόχρονα και ρωγμές ή αν το υλικό είναι ψαθυρό ή αν η ραφή καταπονείται σε κόπωση. Το πορώδες των συγκολλήσεων μπορεί να μειωθεί ή να αποφευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Χρήση αποξειδωτικών μέσων

- Επίτευξη ικανοποιητικής ρευστότητας του τηγμένου μετάλλου που επιτρέπει στα αέρια που περιέχονται στη συγκόλληση να απελευθερωθούν

- Τροποποίηση της τεχνικής συγκόλλησης, όπως προθέρμανση της ζώνης συγκόλλησης ή αύξηση του ρυθμού πρόσβασης της θερμότητας.

- Μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης, ώστε να υπάρχει επαρκής χρόνος για την διαφυγή των αερίων.

- Ορθή επιλογή ηλεκτροδίων ή συγκολλητικού υλικού

1.6.4.3 Στερεά εγκλείσματα

Τα στερεά εγκλείσματα εμφανίζονται κυρίως στο εσωτερικό των συγκολλήσεων και περιλαμβάνουν κάθε ξένη ουσία που παγιδεύεται στο μέταλλο συγκόλλησης.

Το πιο συνηθισμένο είδος είναι τα εγκλείσματα σκουριάς, που ορίζονται σαν μη μεταλλικές στερεές ουσίες που παγιδεύονται στο μέταλλο συγκόλλησης, ή μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και βασικού μετάλλου. Ακαθαρσίες από το περιβάλλον, όταν η δράση του προστατευτικού αερίου δεν είναι επαρκής είναι δυνατόν να συμβάλουν επίσης στη δημιουργία εγκλεισμάτων. Συγκολλήσεις που εκτελούνται κατά στρώματα πρέπει να ελέγχονται σε κάθε στρώμα ως προς την εναπόθεση σκουριάς και τη δημιουργία εγκλεισμάτων.

Άλλο είδος εγκλείσματος είναι το έγκλεισμα σκόνης που προέρχεται από τη παγίδευση σκόνης από την επένδυση των ηλεκτροδίων, ή σκόνης της μεθόδου συγκόλλησης με βυθισμένο τόξο, και τα δύο αυτά είδη εγκλεισμάτων μπορεί να έχουν μορφή συνεχή, διακεκομμένη, ή να έχουν τυχαία κατανομή. Σε όλες τις περιπτώσεις έχουν στρογγυλεμένα άκρα.

1.6.4.4 Ελλιπής τήξη ή διείσδυση

Είναι μια οικογένεια ελαττωμάτων που οδηγούν σε μη αποδεκτή συγκόλληση και οφείλονται σε κακό σχεδιασμό της συγκόλλησης ή σε κακή εκτέλεση αυτής.

- Η ελλιπής τήξη (incomplete fusion), κατά κανόνα οφείλεται σε ανεπαρκές επίπεδο θερμοκρασίας στη ζώνη συγκόλλησης, παρουσία οξειδίων, κακό καθαρισμό των προς συγκόλληση επιφανειών, εσφαλμένο σχεδιασμό του γεωμετρικού τύπου συγκόλλησης κλπ. Το ελάττωμα αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τα ακόλουθα:

- Προθέρμανση του προς συγκόλληση υλικού,
- Προσεκτικό καθαρισμό της ζώνης συγκόλλησης πριν την έναρξη της συγκόλλησης

- Τροποποίηση της σχεδίασης της συγκόλλησης (joint design) και του τύπου του ηλεκτροδίου
- Χρησιμοποίηση κατάλληλου προστατευτικού αερίου

Η ατελής διείσδυση της συγκόλλησης (incomplete penetration / lack of penetration προκαλείται όταν το βάθος της ραφής είναι ανεπαρκές και οφείλεται κυρίως σε χαμηλή παροχή θερμότητας, υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης και κακή συναρμογή των προς συγκόλληση τεμαχίων. Το ελάττωμα αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τα ακόλουθα:

- Αύξηση της ροής θερμότητας της ζώνης συγκόλλησης
- Μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης (π.χ. ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου) κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης

1.6.4.5 Ατελές σχήμα ή ανώμαλη όψη

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται μεγάλος αριθμός σφαλμάτων που έχουν σχέση με τη γεωμετρία της ραφής. Τα κυριότερα από αυτά τα σφάλματα είναι τα εξής:

1. *Υποκοπή (undercut)*, είναι ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα αυτής της κατηγορίας. Συνήθως συναντάται στη ρίζα ή στο πρόσωπο της συγκόλλησης παράλληλα προς την ένωση του μετάλλου συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου. Προέρχεται συνήθως είτε από λανθασμένες τεχνικές συγκόλλησης, είτε από υπερβολικά υψηλή ένταση ρεύματος

2. *Υπερκάλυψη (overlap)*, παράλληλα προς τον άξονα της συγκόλλησης. Οι βασικές αιτίες της είναι λανθασμένες τεχνικές συγκόλλησης, λανθασμένη επιλογή των υλικών πλήρωσης, ή ακατάλληλη προετοιμασία του βασικού μετάλλου πριν τη συγκόλληση

3. *Ανεπαρκές γέμισμα (underfill)*, που ορίζεται σαν την εσοχή, στην όψη ή στη ρίζα της συγκόλλησης, που είναι χαμηλότερη από το επίπεδο του βασικού μετάλλου. Οφείλεται στο ότι ο συγκολλητής παρέλειψε να κάνει όλες τις στρώσεις, όπως απαιτούν οι προδιαγραφές. Συνήθως το σφάλμα αυτό,

διορθώνεται με τη προσθήκη μιας ή περισσότερων στρώσεων μετάλλου συγκόλλησης.

4. *Υπερβολική ενίσχυση όψης (excessive reinforcement)*, που είναι το αντίθετο του προηγούμενου σφάλματος.

5. *Ανεπαρκής διάσταση ραφής (insufficient leg)*.

6. *Υπερβολική κυρτότητα όψης (excessive convexity)*.

Τα 3 τελευταία προέρχονται από λανθασμένη εφαρμογή των προδιαγραφόμενων συνθηκών συγκόλλησης όπως τάση, ένταση ρεύματος, ταχύτητα συγκόλλησης, τύπος ηλεκτροδίου κλπ.

Τα σφάλματα της υποκοπής, της υπερκάλυψης και της υπερβολικής ενίσχυσης όψης δημιουργούν οξείες εγκοπές στην επιφάνεια των συγκολλήσεων. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, με αποτέλεσμα τη πιθανότητα έναρξης ρηγματώσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία.

Το σφάλμα της ανεπαρκούς διάστασης ραφής σημαίνει ελάττωση της αντοχής της σύνδεσης έτσι ώστε να αυξάνεται η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής.

1.6.4.6 Διάφορα άλλα σφάλματα

1. *Ανάματα τόξου (arc strikes)*, που συμβαίνουν όταν ο συγκολλητής ανάψει κατά λάθος το τόξο πάνω στο βασικό μέταλλο που γειτονεύει με το μέταλλο της συγκόλλησης με αποτέλεσμα τη προσωρινή τήξη μικρού όγκου από το βασικό μέταλλο.

2. *Υπερβολικό πισίλισμα μετάλλου (excessive spatter)*, που συμβαίνει στην επιφάνεια του βασικού μετάλλου κοντά στη συγκόλληση.

3. *Διάφορα διασταστικά σφάλματα*, όπως μη ευθυγράμμιση ελασμάτων (misalignment), λανθασμένη προετοιμασία ακμών κλπ.

Τα ανάματα τόξου γίνονται κατά λάθος. Για το λόγο αυτό, σε ορισμένες συγκολλήσεις τοποθετείται προστατευτικό κάλυμμα στη περιοχή γύρω από τη συγκόλληση. Είναι ανεπίτρεπτα σε ορισμένες συγκολλητές κατασκευές, γιατί

το τηγμένο βασικό μέταλλο μπορεί να υποστεί ρηγματώση από τη ταχεία απόψυξη, ή γιατί μπορεί να δημιουργηθεί επιφανειακός πόρος σε αυτή τη περιοχή. Οι ασυνέχειες αυτές μπορούν, κάτω από κατάλληλες συνθήκες, να οδηγήσουν σε ρηγματώσεις μεγάλης έκτασης.

Το υπερβολικό πιτσίλισμα μετάλλου μπορεί να οφείλεται σε μαγνητικό φύσημα (arc blow), σε λανθασμένη επιλογή ηλεκτροδίου ή έντασης ρεύματος, ή σε υπερβολικά μεγάλο μήκος του τόξου συγκόλλησης. Μπορεί να διορθωθεί με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, με ρύθμιση της έντασης ρεύματος στη σωστή τιμή για το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο κλπ.

Κεφάλαιο 2.

Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα είναι χάλυβες συγκολλησιμοι, υψηλής αντοχής και ολκιμότητας και παράγονται κυρίως με τη μέθοδο Tempcore (συγκεκριμένη θερμομηχανική κατεργασία). Σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και κανονισμούς προβλέπεται η συγκόλληση των χάλυβων οπλισμού η οποία πραγματοποιείται κυρίως με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου (ηλεκτροσυγκόλληση). Μπορούν να συγκολληθούν είτε μεταξύ τους, είτε με άλλα χάλυβδινα στοιχεία από συγκολλησιμο χάλυβα όπως δομικός χάλυβας, αγκύρια, μηχανικοί σύνδεσμοι, προκατασκευασμένα στοιχεία κ.λπ.

2.1 Κατηγορίες, Τύποι Συνδέσεων και Μεθοδοι Συγκόλλησης

Ανάλογα με τη σχετική θέση των ράβδων διακρίνονται δυο βασικοί τύποι σύνδεσης:

- άκρο με άκρο (μετωπική)
- με παράθεση (επικάλυψη) των ράβδων

Οι συγκολλήσεις με παράθεση είναι περισσότερο εύχρηστες σε σχέση με τις μετωπικές και αφετέρου αποτελούν συχνά την μόνη δυνατή επιλογή μιας και σε μικρές διαμέτρους ράβδων (διάμετρο μικρότερη από 20mm) η

μετωπική συγκόλληση είναι πρακτικά αδύνατη. Η εκτέλεσή τους εξάλλου δεν απαιτεί ιδιαίτερες ικανότητες εκ μέρους του συγκολλητή.

Οι συνδέσεις με συγκόλληση διακρίνονται σε φέρουσες και μη φέρουσες, κατά περίπτωση.

Φέρουσες είναι οι συνδέσεις οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν δύναμη που αντιστοιχεί στην πλήρη αντοχή της ράβδου, πλην των σταυρωτών συνδέσεων, για τις οποίες ορίζεται συντελεστής διάτμησης μικρότερος της μονάδος.

Μη φέρουσες είναι οι συνδέσεις των οποίων η ικανότητα σύνδεσης (αντοχή) δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό (ή οι συγκολλήσεις για τις οποίες οι απαιτήσεις είναι μειωμένες), και αποσκοπούν:

- Στη συγκράτηση συνδετήρων ή συνδέσμων
- Στην εξασφάλιση συγκεκριμένης διάταξης οπλισμού (π.χ. κλωβοί, εσχάρες, στεφάνες κ.λπ.)
- Στην προσωρινή στερέωση οπλισμού

Για τους συγκολλησίμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος εφαρμόζονται οι εξής τύποι σύνδεσης:

- Μετωπική (άκρο με άκρο)
- Κατά παράθεση
- Με λωρίδες
- Σταυρωτή
- Με άλλα στοιχεία από συγκολλησίμο χάλυβα

Οι συνδέσεις μπορούν, κατά περίπτωση, να εκτελεσθούν με τις εξής μεθόδους ή τεχνικές:

- Συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου οι οποίες διακρίνονται σε:
 - Χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW)
 - Ημιαυτόματη συγκόλληση τόξου σε προστατευτική ατμόσφαιρα (GMAW, MAG με μείγμα Ar-CO₂)

- Ημιαυτόματη συγκόλληση τόξου σε προστατευτική ατμόσφαιρα Ar-CO₂ με σωληνωτά ηλεκτρόδια (FCAW)

- Ημιαυτόματη αυτοπροστατευόμενη συγκόλληση τόξου με σωληνωτά ηλεκτρόδια (FCAW).

- Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση:

- Σημειακή (spot resistance welding)

- Μετωπική (resistance butt welding)

- Συγκόλληση με προεξοχή (projection welding)

- Αυτογενή συγκόλληση με συμπίεση και θέρμανση με αέριο (oxy-fuel gas pressure welding)

- Αυτογενή συγκόλληση με σπινθηρισμούς (flash welding)

- Συγκόλληση με τριβή (friction welding).

Εκτός από τις μεθόδους συγκόλλησης με τεχνικές τόξου οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν και στο εργοτάξιο, οι υπόλοιπες μέθοδοι, επειδή απαιτούν σταθερό εξοπλισμό, εκτελούνται μόνο στο εργοστάσιο ή σε άλλο κατάλληλο για τον σκοπό αυτό χώρο (π.χ. μονάδες διαμόρφωσης/κατεργασίας).

Επιτρέπεται η χρήση και άλλων μεθόδων συγκόλλησης με την προϋπόθεση αποδεδειγμένης εμπειρίας, εξειδικευμένου προσωπικού και κατάλληλου εξοπλισμού. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ειδική συμφωνία μεταξύ κατασκευαστή και του κυρίου του έργου.

Απαγορεύεται η χρήση οξυγονοκόλλησης.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι συνήθεις μέθοδοι συγκόλλησης, οι αντίστοιχοι συμβατοί τύποι σύνδεσης και το πεδίο εφαρμογής:

Μέθοδος συγκόλλησης	Τύπος σύνδεσης	Περιοχή ονομαστικών διαμέτρων σε mm	
		Φέρουσες συνδέσεις	Μη φέρουσες συνδέσεις
Συγκολλήσεις τόξου	Μετωπική χωρίς υποστήριξη της ρίζας	≥16	-
	Μετωπική με μόνιμη υποστήριξη της ρίζας	≥12	-
	Κατά παράθεση	6-32	6- 32
	Με λωρίδες	6-40	-
	Σταυρωτή	6-40	6-40
	Με άλλα χαλύβδινα στοιχεία	6-40	-
Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση	Κατά παράθεση	-	6-32
	Σταυρωτή	5-20	6-40
	Μετωπική	6-25	-
Συγκόλληση με προεξοχή (projection welding)	Κατά παράθεση	-	6-32
	Σταυρωτή	5-20	6-40
Αυτογενής συγκόλληση με συμπίεση και θέρμανση με αέριο	Μετωπική	6-40	-
Αυτογενής συγκόλληση με σπινθηρισμούς	Μετωπική	6-40	-
Συγκόλληση με τριβή	Μετωπική	6-40	-
	Με άλλα χαλύβδινα στοιχεία	6-40	-

2.2 Εκτέλεση συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, πρέπει να εκτελούνται έτσι ώστε, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων ράβδων να μην υπολείπονται των απαιτήσεων που ορίζονται στον παρόντα Κανονισμό ή στις ειδικές προδιαγραφές του έργου.

Κατά την εκτέλεση μιας συγκόλλησης θα λαμβάνονται υπόψη και τα παρακάτω:

- **Επιλογή ηλεκτροσυγκολλητή**

Η συγκόλληση θεωρείται εξειδικευμένη εργασία, γι' αυτό και απαιτείται να εκτελείται από συγκολλητές πιστοποιημένους για τον συγκεκριμένο τύπο σύνδεσης και την συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης σύμφωνα με τα Πρότυπα EN ISO 17660-1 και EN ISO 17660-2.

Σε κάθε περίπτωση, και πριν την εκτέλεση μιας συγκόλλησης στο έργο, ο ηλεκτροσυγκολλητής θα πρέπει να κατασκευάσει δοκίμια με τον συγκεκριμένο τύπο σύνδεσης με τη συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης και υπό συνθήκες που προσομοιάζουν με τις πραγματικές συνθήκες του έργου.

- **Αναλώσιμα (Ηλεκτρόδια – Προστατευτικά Αέρια)**

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται κατά τη χειρωνακτική ηλεκτροσυγκόλληση τόξου, ανεξάρτητα από τον τύπο σύνδεσης, πρέπει να είναι με βασική επένδυση ή με επένδυση ρουτιλίου, και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά πρέπει να είναι κατάλληλα για τις συγκολλούμενες ράβδους. Πρέπει να έχουν σε κάθε περίπτωση όριο διαρροής μεγαλύτερο από 355MPa. Ειδικότερα στην περίπτωση μετωπικών συγκολλήσεων, το όριο διαρροής του μετάλλου των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το όριο διαρροής των προς συγκόλληση ράβδων.

Επειδή τα βασικά ηλεκτρόδια είναι εξόχως υγροσκοπικά, θα πρέπει αμέσως πριν από τη χρήση τους να ξηραίνονται σε ειδικά φορητά ξηραντήρια, στις θερμοκρασίες που συνιστά ο κατασκευαστής των ηλεκτροδίων. Η συγκόλληση θα εκτελείται από συγκολλητές εξειδικευμένους στη χρήση τέτοιων ηλεκτροδίων.

- **Αντίξοες καιρικές συνθήκες**

Η συγκόλληση δεν θα γίνεται όταν βρέχει ή χιονίζει ή όταν φυσάει ισχυρός άνεμος, εκτός αν λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις (σκεπάσματα ή πετάσματα).

Οι επιφάνειες που πρόκειται να συγκολληθούν πρέπει να είναι καθαρές και στεγνές. Όταν παρατηρείται συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνειά τους, πρέπει να προηγείται ελαφρά θέρμανση με θερμό αέρα για την απομάκρυνση της υγρασίας.

• Ανύψωση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης

Η συγκόλληση θα εκτελείται αργά, ώστε να παρέχεται επαρκής θερμική παροχή, χωρίς όμως η θερμοκρασία της ράβδου να ξεπεράσει τους 350°C σε απόσταση 25mm από το πέρας της συγκόλλησης σε οποιαδήποτε διεύθυνση.

• Ρυθμός ψύξης της συγκόλλησης

Οι συγκολλούμενες ράβδοι θα αφήνονται να ψυχθούν ήρεμα και αργά στον αέρα. *Απαγορεύεται αυστηρά η επιτάχυνση της ψύξης με χρήση νερού ή άλλων μέσων.*

• Τυχαία τόξα

Τυχαία τόξα, που δημιουργούνται κατά ανεξέλεγκτο τρόπο σε άλλα σημεία, εκτός της συγκόλλησης, πρέπει να αποφεύγονται κατά το δυνατόν. Τοπικές κηλίδες, ρωγμές ή άλλα ελαττώματα που προκύπτουν από τυχαία τόξα πρέπει να απομακρύνονται με μηχανικά μέσα (τροχό, κοπίδι).

• Απομάκρυνση της σκουριάς

Σε μεθόδους συγκόλλησης κατά τις οποίες, από τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια παράγεται σκουριά για την προστασία του συγκολλούμενου μετάλλου, αυτή η σκουριά πρέπει να απομακρύνεται από κάθε κορδόνι πριν εφαρμοσθεί το επόμενο, καθώς και από το τελευταίο κορδόνι, με ιδιαίτερη προσοχή στα άκρα.

• Διαστάσεις ραφής συγκόλλησης

Η υπέρβαση των διαστάσεων της ραφής συγκόλλησης, πέραν των οριζόμενων στις επόμενες παραγράφους, έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα της σύνδεσης, επειδή αυξάνονται οι εσωτερικές τάσεις κατ' αναλογία με τον όγκο του εναποτιθέμενου μετάλλου.

• Ελαττωματικές συνδέσεις

Όταν μία σύνδεση δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του κανονισμού θα αποκόπτονται το εναποτεθέν υλικό θα απομακρύνεται με μηχανικά μέσα και θα εκτελείται νέα υγιής συγκόλληση. Στην περίπτωση αυτή όμως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ενδεχόμενες επιπτώσεις από την εκτέλεση ελαττωματικών συγκολλήσεων (π.χ. εσωτερικές τάσεις, ψαθυροποίηση κλπ) κατά την κρίση του Μηχανικού.

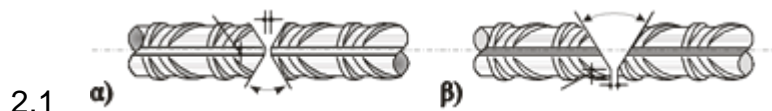
• Κάμψεις και συγκολλήσεις

Οι κάμψεις, εφόσον είναι δυνατόν, θα πρέπει να γίνονται πριν την εκτέλεση των συγκολλήσεων. Η απόσταση της συγκόλλησης από την αρχή της καμπύλωσης θα είναι τουλάχιστον $2d$ για τις μετωπικές, για τις κατά παράθεση και για τις συνδέσεις με λωρίδες και $4d$ για τις σταυρωτές συνδέσεις.

Στη συνέχεια περιγράφεται η μετωπική σύνδεση, που αφορά την παρούσα εργασία.

2.3 Μετωπική σύνδεση (άκρο με άκρο) με τεχνικές τόξου

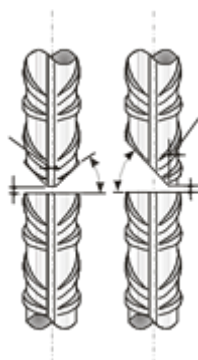
Οι μετωπικές συνδέσεις εκτελούνται πάντοτε μετά από διαμόρφωση των άκρων με λοξοτομές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι λοξοτομές θα διαμορφώνονται με τρόχισμα.



2.1

α)

β)



2.2

γ)

δ)

(α) λοξοτομή διπλού-V στις δύο ράβδους σε οριζόντια θέση για πρόσβαση και από τις δύο πλευρές

(β) λοξοτομή μονού-V στις δύο ράβδους σε οριζόντια θέση για πρόσβαση από τη μία πλευρά

(γ) διπλή λοξοτομή στην άνω ράβδο σε κατακόρυφη θέση για πρόσβαση και από τις δύο πλευρές

(δ) μονή λοξοτομή στην άνω ράβδο σε κατακόρυφη θέση για πρόσβαση από τη μία πλευρά

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην καλή επαφή και σύντηξη μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και των παρειών της λοξοτομής των προς συγκόλληση ράβδων.

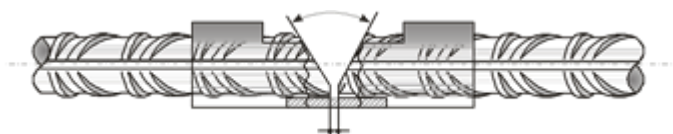
Οι μετωπικές συνδέσεις διακρίνονται σε συνδέσεις χωρίς υποστήριξη της ρίζας και σε συνδέσεις με μόνιμη υποστήριξη της ρίζας.

Μετωπική σύνδεση χωρίς υποστήριξη της ρίζας εφαρμόζεται σε ράβδους διαμέτρου 16mm και άνω (κατά προτίμηση άνω των 20mm). Η μετωπική σύνδεση με μόνιμη υποστήριξη εφαρμόζεται σε ράβδους διαμέτρου 12mm και άνω.

Οι συνδεόμενες ράβδοι επιτρέπεται να είναι διαφορετικής διαμέτρου. Η εκκεντρότητα μετά την συγκόλληση δεν πρέπει να υπερβαίνει το $0,1d_{min}$.

Στην περιοχή της σύνδεσης, λόγω της ραφής, η διάμετρος μπορεί να αυξηθεί κατά $0,2d_{min}$, όπου d_{min} είναι η ονομαστική διάμετρος της λεπτότερης ράβδου.

Όταν χρησιμοποιείται υποστήριγμα της ρίζας της συγκόλλησης (βλέπε παρακάτω σχήμα) το οποίο ενδέχεται να τηχθεί, τότε θα πρέπει και αυτό να είναι από συγκολλησιμο χάλυβα.



2.3 Υποστήριγμα ρίζας της συγκόλλησης

Κεφάλαιο 3.

Έλεγχος Συγκολλήσεων

3.1 Καταστροφικός Έλεγχος Συγκολλήσεων

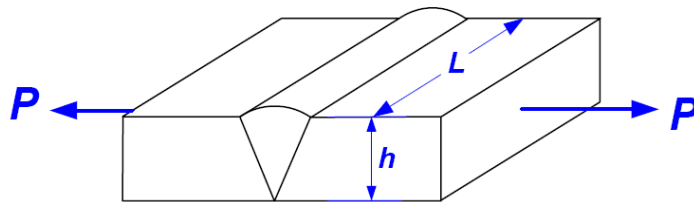
Θεωρώντας ότι μια ραφή συγκόλλησης έχει αντοχή σε εφελκυσμό τουλάχιστον ίση με την αντίστοιχη του βασικού μετάλλου, συνηθίζεται να εξετάζεται η αντοχή της σε διάφορες καταπονήσεις σύμφωνα με τις ιδιότητες του βασικού μετάλλου.

Η συγκόλληση είναι το δαπανηρό μέρος κάθε κατασκευής και ενώ είναι απαραίτητο να εναποτίθεται αρκετή ποσότητα συγκολλητικού υλικού, ώστε η κατασκευή να αντέχει στις φορτίσεις που υπόκειται, εν τούτοις δεν είναι οικονομικά επωφελές να ξοδεύεται μέταλλο περισσότερο από το αναγκαίο. Επίσης υπερβολική ποσότητα συγκολλητικού υλικού μπορεί να γίνει η αιτία δημιουργίας στρέβλωσης και ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων, που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα θραύσης και διάβρωσης αντί να εξασφαλίσουν κάποιο βαθμό ασφάλειας στην κατασκευή.

Για να ελεγχθεί αν μια ραφή συγκόλλησης είναι ικανοποιητική πρέπει να υπολογιστούν οι μέγιστες ορθές, διατμητικές, καμπτικές και στρεπτικές τάσεις, που αναπτύσσονται στην σύνδεση από την εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση. Στην συνέχεια, αυτές οι τάσεις συγκρίνονται είτε με την αντοχή σε διάτμηση (διατμητικές και στρεπτικές τάσεις) ή με αντοχή σε μοναξονικό εφελκυσμό (ορθές και καμπτικές τάσεις).

3.1.1 Εφελκυσμός ή διάτμηση

Μια εσωραφή πλήρους διείσδυσης, φορτιζόμενη με φορτία P θα εμφανίσει μέση τάση στην ραφή ίση με $\sigma = P/(h \cdot l)$, όπου σ η ορθή τάση, h το ύψος της ραφής, l το μήκος της ραφής. Στην παραπάνω σχέση δεν λαμβάνεται υπόψη η ενίσχυση που επιπροστίθεται συνήθως, ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης σύνδεση και τυχόν συγκέντρωση τάσεων που εμφανίζεται λόγω της αλλαγής των διαστάσεων της διατομής στην περιοχή αυτή.



3.1 Καταπόνηση εσωραφής σε εφελκυσμό

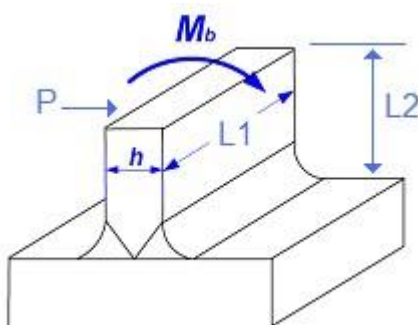
Μια εξωραφή φορτιζόμενη με φορτίο P οδηγεί στην διαπίστωση ότι η σύνδεση υπόκειται σε καθαρή διάτμηση αν οι καμπτικές επιδράσεις είναι μικρές. Όμως η αλλαγή των διαστάσεων της διατομής και της μορφής γύρω από την σύνδεση προκαλεί την επίδραση μεγάλων συγκεντρώσεων τάσεων, που περιπλέκουν σημαντικά την κατάσταση. Στην πραγματικότητα η ακριβής τασική κατάσταση δεν είναι αρκετά γνωστή. Όμως στην πράξη οι εξωραφές συνήθως αστοχούν σε διάτμηση με ισοδύναμη επιφάνεια της ραφής ίση με $A = 0,707 \cdot h$. Ο αρμός θεωρείτε διπλός, ένας καταπονούμενος σε καθαρή διάτμηση και ένας καταπονούμενος σε εφελκυσμό. Η επιφάνεια A της ραφής υποτίθεται ότι φέρει εξ'ολοκλήρου το φορτίο P , οπότε η διατμητική τάση δίνεται από την σχέση $\tau = (P \cdot 0,707) / (h \cdot L)$. Η σύνδεση θεωρείται επίσης ότι υπόκειται σε ορθή τάση του ίδιου μεγέθους $\sigma = \tau$. Όμως επειδή η αντοχή σε διάτμηση ενός τυπικού υλικού είναι μόνο το 60% της αντοχής σε εφελκυσμό, πρέπει να αναμένεται καταστροφική καταπόνηση σε διάτμηση σύμφωνα με την εξίσωση $\tau = (P \cdot 0,707) / (h \cdot L)$. Οπότε σύμφωνα με τα προηγούμενα η

διατμητική τάση μιας περιμετρικής εξωραφής υπολογίζεται από την σχέση $\tau=(P*0,707)/(\Sigma(h*L))$.

3.1.2 Κάμψη

Ας υποθέσουμε ότι ένα ζεύγος ραφών χρησιμοποιείτε για την κατασκευή μιας διατομής μορφής T. Αστοχία ή καταστροφή του δοκιμίου μπορεί να οφείλεται σε:

- Σε διάτμηση στις ραφές όπου $\tau=P/(h*L1)$
- Σε κάμψη με την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων στις ίνες $\sigma=(M*y)/I$, όπου $M=P*L2$ η ροπή στις ραφές, I η ροπή αδράνειας της διατομής της ραφής και y η απόσταση του άξονα της ραφής από την εξωτερική ίνα.



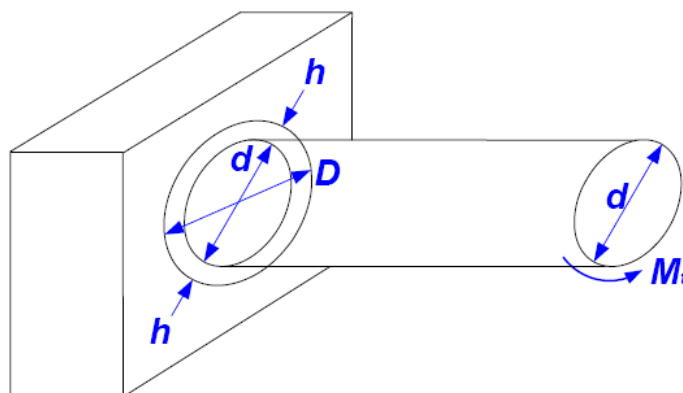
3.2 Καταπόνηση ραφής σε κάμψη

Επειδή είτε διάτμηση είτε κάμψη μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του δοκιμίου, πρέπει να υπολογίζονται και οι δύο περιπτώσεις και να συγκρίνονται προς την αντοχή του υλικού σε διάτμηση και εφελκυσμό αντίστοιχα.

3.1.3 Στρέψη

Μια εξωραφή που καταπονείται σε στρέψη εμφανίζει ροπή που δρα στην κυκλική διατομή και ισορροπείται από μια αντίθετη ροπή στην ραφή ίση με $Mt=P*r$, όπου r η ακτίνα της κυκλικής διατομής. Συγχρόνως η τάση

αντίδρασης είναι όπου $D \tau = (Mr/Jp) * (d/2)$, όπου d η διάμετρος της δοκού και Jp η πολική ροπή αδράνειας. Βέβαια ο τύπος ανάλογα το είδος της συγκόλλησης και την γεωμετρία του αντικειμένου αλλάζει.



3.3 Στρέψη συγκόλλησης δακτυλιοειδούς σχήματος

Αφού υπολογιστεί η μέγιστη τάση, μπορεί να καθοριστεί το μέγεθος της ραφής συγκόλλησης. Καταρχάς η διατμητική τάση και οι κύριες εφελκυστικές τάσεις συγκρίνονται προς την αντοχή του συγκολλητικού υλικού σε διάτμηση και εφελκυσμό αντίστοιχα. Αν η αντοχή του υλικού είναι μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα τάση, η ραφή είναι αποδεκτή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να γίνει επανεκτίμηση.

Στην πράξη η επιτρεπόμενη τάση σε μια ραφή είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντοχή του υλικού. Για παράδειγμα οι κανονισμοί συγκολλήσεων του American Institute of Steel Construction (AISC) επιτρέπουν επίπεδα διατμητικών τάσεων για ραφές συγκολλητών κατασκευών μόνο 105Mpa, ενώ η αντοχή σε διάτμηση του συγκολλητικού υλικού είναι περίπου 155Mpa. Τα χαμηλά επίπεδα επιτρεπόμενων τάσεων εξασφαλίζουν έναν ικανό «συντελεστή ασφάλειας» της κατασκευής.

3.1.4 Παραμένουσες τάσεις

Ο μηχανικός που χρησιμοποιεί την συγκόλληση σαν τεχνική κατασκευής πρέπει να ασχολείται ιδιαίτερα με τις παραμένουσες τάσεις πρώτα γιατί προκαλούν πλαστική στρέβλωση του κατεργάσιμου τεμαχίου και οι ανοχές

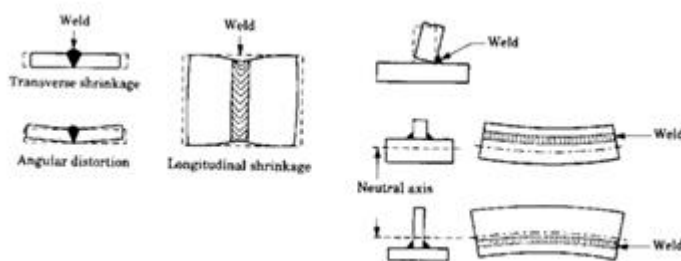
επιτυγχάνονται δύσκολα, και δεύτερο γιατί μπορεί να σχηματιστούν ρωγμές μέσα και γύρω από την συγκόλληση, όταν υπάρχει ανεπαρκής πλαστικότητα που να εξομαλύνει τις παραμένουσες τάσεις.

Οι παραμένουσες τάσεις γύρω από μια συγκόλληση οφείλονται στην θερμική συστολή. Καθώς η συγκόλληση ψύχεται, η συστολή που συμβαίνει στην ζώνη τήξης παρεμπδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Με τον τρόπο αυτό η συστολή της ζώνης συγκόλλησης εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση στην περιοχή αυτή. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις εξισορροπούνται από αντιδρώσες θλιπτικές τάσεις στο βασικό μέταλλο. Αναπτύσσονται διαμήκεις και εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφελκυστική συστολή εμφανίζεται σε μια επιφάνεια δεκαπλάσια περίπου από την επιφάνεια συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή γύρω από την ραφή υπόκειται σε τοπική πλαστική παραμόρφωση μετά την απομάκρυνση της πηγής θερμότητας. Το υλικό που περικλείεται στην γραμμοσκιασμένη περιοχή της εικόνας διαστέλλεται λόγω θερμότητας. Η πλαστική διαστολή είναι μάλλον εγκάρσια προς την ραφή, περιορίζεται δε κατά μήκος από το ψυχρό βασικό μέταλλο. Στην πραγματικότητα το μέταλλο στην περιοχή αυτή συστέλλεται κατά μήκος και διαστέλλεται κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Όταν το υλικό ψυχθεί, η διαμήκης συστολή έχει σαν συνέπεια την ανάπτυξη εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων.

Η διανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων, που εμφανίζονται σε συγκολλημένο έλασμα φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα. Αυτές οι τάσεις όπως και οι διαμήκεις παραμένουσες τάσεις, είναι αποτέλεσμα της ανομοιόμορφης συστολής γύρω από την συγκόλληση, ο μηχανισμός όμως δημιουργίας αυτών διαφέρει σε σχέση με τον προηγούμενο. Βασικά η εγκάρσια διανομή τάσεων είναι αποτέλεσμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο επίπεδο της συγκολλούμενης διατομής λόγω της διαμήκους συστολής. Σε κάποια έκταση η διαμήκης συστολή προκαλεί την δημιουργία μιας βαρελοειδούς μορφής του αρχικού ελάσματος, με συνέπεια την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στις κεντρικές περιοχές και θλιπτικές τάσεις στα άκρα της ραφής.

Σε συγκολλημένα ελάσματα χωρίς εξωτερικές πακτώσεις οι τιμές των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων είναι συνήθως μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές των διαμήκων. Όμως, αν το έλασμα είναι πακτωμένο, πρέπει να προστίθεται στις εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις μια αντιδρώσα τάση αναπτύσσοντας έτσι υψηλότερες τιμές. Επίσης σε πολύπλοκες διατομές, όπου υπάρχει υψηλή τρισδιάστατη ακαμψία και πιθανή ύπαρξη ανυψωτών τάσεων του ενός ή του άλλου είδους, παραμένουσες τάσεις κατά την έννοια του πάχους και εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαμήκεις παραμένουσες τάσεις.



3.4 Παραμένουσες τάσεις σε διαφορετικά είδη συγκολλήσεων

3.2 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι Συγκολλήσεων (ΜΚΕ)

Ο γενικός όρος «Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι» (ΜΚΕ) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει όλες εκείνες τις μεθόδους επιθεώρησης που επιτρέπουν την αξιολόγηση των συγκολλήσεων και των σχετικών υλικών, χωρίς αυτές να καταστρέφονται.

Οι πιο συχνές μέθοδοι ΜΚΕ που συναντούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι οι ακόλουθες :

1. Οπτική επιθεώρηση
2. Ραδιογραφία (ακτίνες Χ, ακτίνες γ, δέσμη νετρονίων)
3. Υπέρηχοι
4. Μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων
5. Μέθοδος διεισδυτικών υγρών
6. Μέθοδος ρεύματος αυτεπαγωγής (δινορεύματα)
7. Μέθοδος ακουστικών εκπομπών
8. Έλεγχος διαρροής με αέρα υπο πίεση

Οι ΜΚΕ δεν δημιουργήθηκαν με σκοπό να αντικαταστήσουν τις Καταστροφικές Μεθόδους Ελέγχου. Ο εκάστοτε ελεγκτής συγκολλήσεων θα πρέπει να γνωρίζει ότι αρκετές φορές οι Καταστροφικοί Έλεγχοι χρησιμοποιούνται σαν συμπλήρωμα των ΜΚΕ και πως κάθε μέθοδος ελέγχου μπορεί να συμπληρώσει κάποια άλλη. Εξάλλου δεν είναι ασύνηθες τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης για μια μέθοδο ΜΚΕ να αναπτύχθηκαν από έρευνες που σχετίζονται με τα αποτελέσματα Καταστροφικών Ελέγχων.

Κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Όμως, οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι προαναφερθέντες έλεγχοι.

3.2.1 Οπτική επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση συγκολλήσεων είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος μη καταστροφικού ελέγχου αλλά πρέπει να εκτελείται συνεχώς, δηλαδή πριν, κατά και μετά την συγκόλληση. Τα εργαλεία για οπτική επιθεώρηση είναι απλά:

- ένα υποδεκάμετρο τσέπης
- ένας μετρητής διαστάσεων συγκόλλησης
- ένας μεγενθυντικός φακός και
- μία γωνία για έλεγχο ευθύτητας, ευθυγράμμισης και καθετότητας (εάν χρειάζεται)

Από όλες τις μεθόδους ΜΚΕ που χρησιμοποιούνται, ο οπτικός έλεγχος είναι ο πιο εύκολος στην εφαρμογή του, ο πιο γρήγορος, σχετικά μικρού κόστους και δεν χρειάζεται κάποιο ειδικό εξοπλισμό εκτός από την καλή όραση του ελεγκτή. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι ο οπτικός έλεγχος δίνει αρκετά σημαντικές πληροφορίες που συμφωνούν με τις προδιαγραφές συγκολλήσεων που υπάρχουν.

Συγκολλήσεις οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά σε κάποιο προϊόν του οποίου η κατεργασία έχει τελειώσει, θα πρέπει να ελέγχονται κατά την διάρκεια της παραγωγής του προϊόντος. Παρόλο που η οπτική μέθοδος είναι η πιο απλή μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου, για την εξασφάλιση σωστών αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνεται χρήση και άλλων μεθόδων.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Οικονομική μέθοδος
- Σχετικά αξιόπιστη
- Απαιτεί σχετικά μικρή εκπαίδευση
- Απαιτεί σχετικά μικρό εξοπλισμό για τις περισσότερες εφαρμογές

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Η μέθοδος περιορίζεται σε εξωτερικούς ή επιφανειακούς ελέγχους μόνο.

- Η μέθοδος βασίζεται στην οπτική οξυδέρκεια τους παρατηρητή-ελεγκτή.

3.2.2 Ραδιογραφία (ακτίνες Χ, ακτίνες γ, δέσμη νετρονίων)

α) Ραδιογραφία νετρονίων

Η ραδιογραφία νετρονίων χρησιμοποιεί την βασική αρχή σύμφωνα με την οποία μια ακτίνα βασικών σωματιδίων του πυρήνα ενός ατόμου, τα νετρόνια στην παρούσα περίπτωση, μπορεί να διαπεράσει τα μόρια ενός υλικού, και να «δει» την εσωτερική δομή του αντικειμένου. Για την ραδιογραφία νετρονίων μόνο τα λεγόμενα «θερμικά» νετρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν επειδή τα «γρήγορα» νετρόνια θα περνούσαν εξ ολοκλήρου τόσο δια μέσω του αντικειμένου εξέτασης όσο και δια μέσου του φιλμ της ραδιογραφίας.

Σε μια ραδιογραφία τα περισσότερα από τα νετρόνια περνούν αμέσως δια μέσω του αντικειμένου, εντούτοις, πολλά επιβραδύνονται ή σταματούν μέσω μιας διαδικασίας αποκαλούμενης εξασθένιση. Η μείωση των νετρονίων εμφανίζεται μέσω της ελαστικής διασποράς, της ανελαστικής διασποράς (που αναπηδούν μακριά), της απορρόφησης νετρονίων, και των πυρηνικών αντιδράσεων. Για τα «θερμικά» νετρόνια που χρησιμοποιούνται στην ραδιογραφία νετρονίων, η απορρόφηση τους είναι η αρχική αλληλεπίδραση, εντούτοις, εμφανίζεται και κάποια διασπορά.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός περιλαμβάνει πηγές νετρονίων, κάμερες και προβολείς ακτίνων γάμμα, φιλμ για καγραφή της ακτινοβολίας, εξοπλισμό για την επεξεργασία φιλμ, εικονοσκόπια, εξοπλισμό παρακολούθησης ραδιενέργειας και τις εγκαταστάσεις στις οποίες θα γίνει η ραδιογραφία με ασφάλεια.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποκαλύψει την πλειονότητα των διάφορων ασυνεχειών των συγκολλήσεων όπως ρωγμές, παρουσία πόρων, ελλιπής τήξη κλπ.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Μεγάλη διεισδυτικότητα σε πλήθος διαφορετικών υλικών.

- Υψηλή αντίθεση στην αναπαράσταση λεπτών υποστρωμάτων και υλικών που περιέχουν υδρογόνο.

- Μεγάλη και ευκρινής ανάλυση σε πολύπλοκα τρισδιάστατα αντικείμενα

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Για την εκτέλεση της μεθόδου απαιτείται πυρηνικός αντιδραστήρας, ώστε να αποσπαστούν τα κατάλληλα νετρόνια

- Απαιτείται αυστηρή τήρηση των κανόνων ασφαλείας εξαιτίας της επικινδυνότητας των ακτίνων νετρονίων σε ζωντανούς ιστούς.

- Απαιτείται ακριβός και εξειδικευμένος εξοπλισμός.

- Η ποιότητα της ραδιογραφίας εξαρτάται άμεσα από το μέσο αποτύπωσης ακόμα και αν η διαδικασία της ραδιογραφίας έχει εκτελεστεί άψογα

β) Ακτίνες X και ακτίνες γ

Οι ακτίνες γάμα διαφέρουν από τις ακτίνες X μόνο στο γεγονός πως δημιουργήθηκαν από διαφορετικές πηγές. Οι ακτίνες X παράγονται από μια γεννήτρια ακτίνων X ενώ οι ακτίνες γάμα παράγονται από ραδιοϊσότοπα υλικά. Ανήκουν και οι δύο στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Πιο συγκεκριμένα οι ακτίνες X και γάμα είναι κυματομορφές όπως το ορατό φως, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα, οπότε τις ακτίνες X και γάμα δεν μπορούμε ούτε να τις δούμε με το ανθρώπινο μάτι ούτε να νιώσουμε άμεσα την επίδρασή τους πάνω μας, αλλά ούτε και να τις ακούσουμε. Συνήθως οι ακτίνες X και γάμα «ταξιδεύουν» σε ευθεία γραμμή και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειώσουμε εδώ πως μπορούν να σκεδαστούν με τρόπο παρόμοιο με αυτό που σκεδάζεται το ορατό φως.

Λόγω του γεγονότος ότι διαθέτουν μικρό μήκος κύματος μπορούν και μεταφέρουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας μέσω της ύλης σε σχέση με άλλες ακτινοβολίες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι οι ακτίνες καθώς διαπερνούν κάποιο υλικό σκεδάζονται, απορροφώνται από αυτό και ένα μέρος καταφέρνει να διαπεράσει εξ ολοκλήρου το υλικό. Βέβαια όλα αυτά

εξαρτώνται άμεσα από την φύση του υλικού και από τα επίπεδα ενέργειας της ακτίνας.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη μέθοδο αυτή περιλαμβάνει: πηγές ακτίνων γάμμα, κάμερες και προβολείς ακτίνων γάμμα, πηγές ακτίνων Χ, πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, φιλμ για καγραφή της ακτινοβολίας, εξοπλισμό για την επεξεργασία φιλμ, εικονοσκόπια, εξοπλισμό παρακολούθησης ραδιενέργειας και τις εγκαταστάσεις στις οποίες θα γίνει η ραδιογραφία με ασφάλεια.

Όπως και ο έλεγχος με τη δέσμη νετρονίων, η μέθοδος αυτή μπορεί να αποκαλύψει την πλειονότητα των διάφορων ασυνεχειών των συγκολλήσεων όπως ρωγμές, παρουσία πόρων, ελλιπής τήξη κλπ.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου με ακτίνες γ είναι:

- Η τήρηση αρχείων (υπό την μορφή φιλμ) επιτρέπει την επανεξέταση των αντικειμένων
- Ενεργειακά αποδοτική πηγή που δεν απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή των ακτίνων γάμμα
- Δίνει την δυνατότητα να αξιολογηθούν σημεία τα οποία είναι δύσκολο να προσεγγιστούν

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Λόγω χρήσης ραδιενέργειας απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις αλλά και όργανα μέτρησης των επιπέδων της ραδιενέργειας καθώς και των επιπέδων έκθεσης του προσωπικού σε αυτή
- Οι πηγές ακτίνων γάμμα εξασθενούν με τον χρόνο οπότε και αυτές θα πρέπει να αντικαθιστούνται περιοδικά
- Οι πηγές ακτίνων γάμμα έχουν μια σταθερή ενεργειακή απόδοση η οποία δεν μπορεί να ρυθμιστεί
- Οι πηγές ακτίνων γάμμα αλλά και οι άδειες λειτουργίας που απαιτούνται είναι ιδιαίτερα ακριβές

- Η ραδιογραφία απαιτεί προσωπικό με ικανότητες χειρισμού των περίπλοκων μηχανημάτων που απαιτούνται αλλά και ικανότητα να κατανοούν τα αποτελέσματα

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου με ακτίνες Χ είναι:

- Προσαρμόσιμα ενεργειακά επίπεδα, γενικότερα παράγονται ραδιογραφίες υψηλότερης ποιότητας σε σχέση με αυτές των ακτίνων γάμμα.
- Τήρηση μόνιμων αρχείων για μελλοντική επανεξέταση

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Υψηλό αρχικό κόστος για τον εξοπλισμό που απαιτείται
- Λόγω χρήσης ραδιενέργειας απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις αλλά και όργανα μέτρησης των επιπέδων της ραδιενέργειας καθώς και των επιπέδων έκθεσης του προσωπικού σε αυτή
- Η ραδιογραφία απαιτεί προσωπικό με ικανότητες χειρισμού των περίπλοκων μηχανημάτων που απαιτούνται αλλά και ικανότητα να κατανοούν τα αποτελέσματα.

3.2.3 Υπέρηχοι

Ο έλεγχος με υπερήχους αποτελεί έναν Μη Καταστροφικό Έλεγχο που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό, τον έλεγχο και την αξιολόγηση εσωτερικών ασυνεχειών σε μέταλλα και άλλα υλικά. Η βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι η παραγωγή μιας δέσμης ήχου υψηλής συχνότητας με κατεύθυνση προς το υπό έλεγχο υλικό, το οποίο σε περίπτωση εσωτερικών ασυνεχειών ανακλά την εν λόγω δέσμη. Αυτή η ασυνέχεια εμφανίζεται σαν μια απότομη κάθετη κατακόρυφη γραμμή σε μια CRT οθόνη. Η εύρεση, ο εντοπισμός και η αξιολόγηση εσωτερικών ασυνεχειών κάποιου υλικού με την μέθοδο των υπερήχων βασίζεται στις ακόλουθες αρχές :

1. η ταχύτητα του ήχου εντός ενός υλικού δεδομένης πυκνότητας και σχήματος είναι σταθερή, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μέτρηση αποστάσεων.

2. το σχετικό εύρος ενός απεικονιζόμενου παλμού είναι ανάλογο του μεγέθους του ανακλαστήρα.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει κάποιο όργανο παλμών ικανό να παράγει υπερήχους μέσα στο προς έλεγχο αντικείμενο, επίσης απαιτείται μια οθόνη CRT ικανή να απεικονίζει τα μεγέθη της ηχητικής ενέργειας που λαμβάνονται. Τέλος ιδιαίτερα απαραίτητα είναι και τα διάφορα μέτρα βαθμονόμησης.

Οι συσκευές ρυθμίζονται σε πρότυπα διακριβωμένα δοκίμια, γνωστού πάχους και από υλικό με ίδια ακουστική συμπεριφορά με το προς μέτρηση υλικό, χρησιμοποιώντας το πάχος εκείνο του δοκιμίου που είναι ίσο με το ελάχιστο αποδεκτό πάχος του αντικειμένου .

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Μέθοδος πιο ευαίσθητη σε δισδιάστατα ελαττώματα.
- Τα αποτελέσματα των ελέγχων γίνονται γνωστά αμέσως.
- Φορητός εξοπλισμός.
- Η πλειονότητα του εξοπλισμού υπερήχων δεν απαιτεί ηλεκτρική παροχή από το δίκτυο.
- Ικανότητες υψηλής διεισδυτικότητας.
- Είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μεγέθους και του είδους του σφάλματος.
- Ασφαλής μέθοδος που δεν απαιτεί εξειδικευμένα μέτρα ασφαλείας για το προσωπικό.
- Ευέλικτη μέθοδος αφού απαιτείται πρόσβαση μόνο της μιας πλευράς του υπό εξέταση αντικειμένου.

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Η επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το μηχάνημα του υπερήχου θα πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένη και απαιτείται η χρήση ειδικού υγρού.

- Συγκολλήσεις ελασμάτων μικρού πάχους είναι δύσκολο να ελεγχθούν.

- Απαιτούνται συγκεκριμένα τυποποιημένα πρότυπα-δοκίμια βαθμονόμησης του οργάνου.

- Απαιτείται ικανός χειριστής του εξοπλισμού.

3.2.4 Μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων

Με την μέθοδο του μαγνητικού ελέγχου μπορούν να ελεγχθούν συγκολλήσεις αλλά και τα άκρα των προς συγκόλληση μετάλλων (δηλαδή πριν γίνει κάποια συγκόλληση), καθώς και συγκολλητές επισκευές. Επίσης μπορούν να εντοπιστούν επιφανειακές ρωγμές όλων των ειδών τόσο σε συγκολλήσεις όσο και σε συμπαγή υλικά, ελαττώματα στα προς συγκόλληση άκρα κάποιου μετάλλου, ενώ είναι δυνατός ο έλεγχος ατελής τήξης, εσωτερικών ρωγματώσεων αλλά και ανεπαρκούς διείσδυσης.

Σε κάποιο μέταλλο δεν είναι απαραίτητο οι όποιες ασυνέχειες που μπορεί να υπάρχουν εντός αυτού να έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της ικανοποιητικής απόδοσης του κατά την χρήση αυτού. Για αυτό τον λόγο όταν γίνεται χρήση της μεθόδου των μαγνητικών σωματιδίων ο ελεγκτής πρέπει να βρίσκεται σε θέση να κρίνει από τις ασυνέχειες που θα ανακαλύψει, ποιες από αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν ως ελαττώματα. Έτσι γίνεται εύκολα κατανοητό ότι μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να υπάρξει ευρεία παραλλαγή στα διάφορα αποτελέσματα ανάλογα την κρίση του ελεγκτή.

Ο έλεγχος υλικών και συγκολλήσεων με την μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων είναι εφικτός και εφαρμόσιμος μόνο σε φερομαγνητικά υλικά στα οποία το υλικό της συγκόλλησης είναι επίσης φερομαγνητικό. Έτσι γίνεται κατανοητό πως αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη φερίτικά υλικά ή σε μέταλλα ωστενίτη, καθώς επίσης είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν σημαντικές δυσκολίες στον έλεγχο συγκολλήσεων όπου τα

μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού με το οποίο θα γίνει η συγκόλληση είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά του προς συγκόλληση μετάλλου.

Κατά τον έλεγχο γίνεται αξιολόγηση των ενδείξεων:

α. σε συνήθειες (ελαττώματα)

β. σε μη συνήθειες (αμφισβητούμενα ελαττώματα).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Η μέθοδος δίνει γρήγορα αποτελέσματα
- Σχετικά οικονομική και αξιόπιστη μέθοδος.
- Ο εξοπλισμός είναι φορητός.
- Αντίθετα από τις διεισδυτικές βαφές, τα μαγνητικά σωματίδια είναι ικανά να εντοπίσουν ασυνέχειες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Εφαρμόζεται μόνο σε φερο-μαγνητικά υλικά.
- Τα διάφορα μέρη θα πρέπει να είναι καθαρά πριν και μετά από την χρήση.
- Πυκνές επικαλύψεις μπορούν να καλύψουν σημαντικές ενδείξεις.
- Σε ορισμένες εφαρμογές απαιτείται απομαγνητισμός των διάφορων μερών μετά την επιθεώρηση.
- Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για τις περισσότερες εφαρμογές.
- Σφάλματα και ασυνέχειες που βρίσκονται βαθιά εντός του υλικού δεν είναι δυνατόν να αναδειχθούν.
- Δεν είναι εύκολη η διατήρηση των αποτελεσμάτων σε μορφή αρχείων ώστε να μπορεί ο ελεγκτής να ανατρέξει στα αποτελέσματα σε άλλη χρονική στιγμή.

3.2.5 Μέθοδος διεισδυτικών υγρών

Η μέθοδος ελέγχου με διεισδυτικά υγρά βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων υγρών να εισέρχονται σε χαραμάδες ή ρωγμές και να παραμένουν

εκεί ακόμα και όταν η επιφάνεια του υλικού καθαριστεί από αυτά τα υγρά. Οπότε είναι εύκολα κατανοητό πως αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη στο να αναδεικνύει ασυνέχειες οι οποίες ξεκινούν από την επιφάνεια. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές αυτής της μεθόδου, με την κάθε μια να παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός περιλαμβάνει διεισδυτικές βαφές ή φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά, καθαριστικούς διαλύτες, καθώς και συγκεκριμένα υγρά εμφάνισης. Επίσης απαιτείται κατάλληλος εξοπλισμός καθαρισμού της επιφάνειας του δοκιμίου πάνω στο οποίο εφαρμόστηκαν τα διεισδυτικά υγρά. Τέλος απαραίτητη είναι και μια πηγή υπεριώδους φωτός σε περίπτωση χρήσης φθορίζουσας βαφής.

Η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθηθεί περιγράφεται σε 7 βασικά βήματα τα οποία είναι :

1. Καθαρισμός της υπό εξέταση επιφάνειας.
2. Εφαρμογή του διεισδυτικού υγρού.
3. Αναμονή συγκεκριμένου χρόνου μέσα στον οποίο το υγρό θα αρχίσει να δρα.
4. Αφαίρεση περισσευούμενου υγρού από την εξεταζόμενη επιφάνεια.
5. Εφαρμογή του εμφανιστή.
6. Εξέταση και έλεγχος του υλικού και των αποτελεσμάτων.
7. Περαιτέρω καθαρισμός του υλικό εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα μη πορώδη υλικά.
- Φορητότητα εξοπλισμού.
- Σχετικά χαμηλό κόστος εξοπλισμού.
- Αξιόπιστα αποτελέσματα των ελέγχων.
- Αποτελέσματα που μπορούν να γίνουν εύκολα και γρήγορα κατανοητά.
- Δεν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια εκτός από αυτή που χρειάζεται για τις πηγές φωτός.

- Οι όποιες ενδείξεις μπορούν αν εξετασθούν περαιτέρω με την βοήθεια της οπτικής μεθόδου.

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Επιφανειακά φιλμ όπως, στρώματα επικάλυψης, φύλλα, αλοιφές μετάλλων, σκεπάζουν ή κρύβουν πιθανές αστοχίες.

- Τα διάφορα μέρη θα πρέπει να καθαρίζονται πριν και μετά από τον έλεγχο.

- Θα πρέπει να τηρούνται αυστηροί κανόνες ασφαλείας για την διαχείριση των υγρών και των διαφόρων χημικών που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο.

- Η μέθοδος των δεισδυτικών υγρών δεν μπορεί να εντοπίσει και να αναδείξει ατέλειες και σφάλματα που υπάρχουν εντός του υλικού

3.2.6 Μέθοδος ρεύματος αυτεπαγωγής (δινορεύματα)

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος με την μέθοδο του ρεύματος αυτεπαγωγής βασίζεται στην αρχή πως το ηλεκτρικό ρεύμα θα διέλθει μέσα από οποιονδήποτε αγωγό ο οποίος υπόκειται σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο συγκολλήσεων τόσο σε μαγνητικά όσο και σε μη μαγνητικά υλικά.

Ο έλεγχος με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα αυτεπαγωγής έχει να κάνει με την παρατήρηση των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που έχουν δημιουργηθεί και τα υπό εξέταση μεταλλικά υλικά. Τρία πράγματα απαιτούνται για αυτή την μέθοδο:

1. Ένα ή περισσότερα πηνία από τα οποία θα διέρχεται εναλλασσόμενο ρεύμα.

2. Τα μέσα τα οποία θα μας δώσουν την ικανότητα να μετρήσουμε τις ηλεκτρικές ιδιότητες των πηνίων.

3. Το προς εξέταση υλικό.

Μεταβλητές οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου ανάλογα το υλικό είναι :

- Το σχήμα, οι εξωτερικές διαστάσεις και το πάχος του υλικού.
- Απόσταση ανάμεσα στο πηνίο που παράγει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και το προς εξέταση υλικό.
- Πάχος στρωμάτων επικάλυψης.
- Χημική σύνθεση του υλικού.
- Κατανομή των ατόμων του υλικού ανάλογα την επεξεργασία που του έχει γίνει.
- Ατέλειες στην κρυσταλλική δομή του υλικού.
- Θερμοκρασία του υλικού.
- Ασυνέχειες και ανομοιογένειες εντός του υλικού.
- Στα φερομαγνητικά υλικά οι παραμένουσες και εφαρμόσιμες τάσεις.

Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω το αποτέλεσμα της μέτρησης του «βολτάζ», που αποτελεί και την μεταβλητή που συνήθως καταγράφει ο εξοπλισμός αυτής της μεθόδου, θα πρέπει να αναλύεται πολύ προσεκτικά ώστε να απομονώνονται από τα αποτελέσματα του ελέγχου μετρήσεις που προκλήθηκαν από αιτίες που δεν έχουν να κάνουν με ασυνέχειες ή σφάλματα εντός του υλικού.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Σχετικά αξιόπιστη και χαμηλού κόστους μέθοδος.
- Μπορεί να αυτοματοποιηθεί σαν μέθοδος στην περίπτωση που γίνεται έλεγχος σε συμμετρικά κομμάτια.
 - Δεν χρειάζονται ηλεκτρικές ενώσεις.
 - Ο εξοπλισμός δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται σε απευθείας επαφή με το ελεγχόμενο κομμάτι.
- Υπό συγκεκριμένες συνθήκες οι ενδείξεις που καταγράφονται από τα όργανα είναι ανάλογες του πραγματικού μεγέθους του ελαττώματος

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Η μέθοδος περιορίζεται σε αγώγιμα υλικά.
- Μικρό βάθος σάρωσης.
- Ορισμένες ενδείξεις ενδεχομένως να μη φανούν λόγω γεωμετρίας.
- Απαιτείται αναγνωρισμένος κώδικας αναφοράς για την χρήση της μεθόδου

3.2.7 Μέθοδος ακουστικών εκπομπών

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών αποτελεί κατά κύριο λόγο μια βοηθητική-συμπληρωματική μέθοδο για τον εντοπισμό ασυνεχειών. Η ακουστική εκπομπή (Acoustic Emission Testing) αναφέρεται στην παραγωγή παροδικών ελαστικών ηχητικών κυμάτων που παράγονται από μια ξαφνική ανακατανομή της πίεσης σε ένα υλικό. Όταν μια δομή υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα (ή αλλαγή σε πίεση, φόρτιση ή θερμοκρασία), τότε πραγματοποιείται έκκληση ενέργειας, υπό μορφή κυμάτων πίεσης, τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια και καταγράφονται από αισθητήρες. Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εποπτεία κατασκευών που βρίσκονται υπό λειτουργία προσφέροντας έτσι πολλά πλεονεκτήματα.

Με τον σωστό εξοπλισμό, οι κινήσεις και η διάδοση των κυμάτων μπορούν να προσδιοριστούν. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει αισθητήρες, ενισχυτές, φίλτρα, μαζί με όργανα μέτρησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, αλλά και τον εξοπλισμό αποθήκευσης (π.χ. παλμογράφοι, βολτόμετρα, και προσωπικοί Η/Υ). Οι ακουστικοί αισθητήρες αποκρίνονται στη δυναμική κίνηση που προκαλείται από κάποιο γεγονός. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μετατροπέν που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια του ακουστικού σήματος σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Βασικό στοιχείο αυτών των μετατροπέν είναι σχεδόν πάντα ένας πιεζοηλεκτρικός ρύσταλλος.

Λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και συμπτωμάτων κοπωσης (πχ δημιουργία ρωγμής, διάδοση ρωγμής, δημιουργία γραμμών ολίσθησης) απελευθερώνεται ενέργεια που συντελεί στην παραγωγή υψίσυχων

ταλαντώσεων με αποτέλεσμα να εκπέμπονται ηχητικοί παλμοί. Οι παλμοί αυτοί παραλαμβάνονται από τον πιεζοηλεκτρικό δέκτη, μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και αναλύονται. Η μορφή το εύρος και το φάσμα συχνοτήτων προσφέρει σημαντικές ενδείξεις για τις πλαστικές παραμορφώσεις σε μικρο- και μακροσκοπικές θέσεις σφαλμάτων. Με περισσότερους δέκτες μπορεί να εντοπισθεί η θέση εκπομπής των ηχητικών παλμων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια μακροχρόνιων εξετάσεων σε δοκίμια για τον προσδιορισμό του τόπου και του χρόνου έναρξης ρωγμής.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Έλεγχος και παρακολούθηση του ελεγχόμενου αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο.
- Ο έλεγχος μπορεί να γίνει και εξ αποστάσεως.
- Φορητότητα εξοπλισμού.

Ενώ τα μειονεκτήματα:

- Απαιτεί διατάξεις μετατροπής συνδεδεμένες με την επιφάνεια του ελεγχόμενου αντικειμένου.
- Πιθανός "θόρυβος" θα πρέπει να απομακρυνθεί από το σύστημα ελέγχου με φίλτρα.
- Μαλακά υλικά αποδίδουν εκπομπές μικρού πλάτους

3.2.8 Έλεγχος διαρροής με αέρα υπο πίεση

Η δοκιμή στεγανότητας με αέρα διενεργείται όταν η κατασκευή είναι αρκετά κοντά στην περάτωσή της, αφού έχουν ολοκληρωθεί οι θερμές εργασίες, τα εξαρτήματα, ο εξοπλισμός ή οι διαβάσεις οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την αντοχή ή στεγανότητα της κατασκευής, και πριν την τοποθέτηση ορόφων και υλικών επικάλυψης των ελεγχόμενων ραφών.

Η εφαρμογή του τελικού χρωματισμού γίνεται μετά την δοκιμή στεγανότητας με αέρα όλων των συγκολλήσεων ανέγερσης και όλων των γωνιακών συγκολλήσεων στα όρια των δεξαμενών, συμπεριλαμβανομένων των διαβάσεων. Η εφαρμογή του τελικού χρωματισμού για άλλες συγκολλήσεις μπορεί να γίνει πριν την δοκιμή στεγανότητας με αέρα υπό την προϋπόθεση ότι ο επιθεωρητής του έργου είναι ικανοποιημένος με τις συγκολλήσεις.

ο εξοπλισμός που απαιτείται πρέπει να εισάγει πιέσεις και να διαθέτει συσκευές εντοπισμού ικανές να καταγράψουν την διαρροή.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Σε ορισμένες εφαρμογές δεν απαιτείται ιδιαίτερη εκπαίδευση.
- Τα αποτελέσματα είναι συνήθως αξιόπιστα.

Ενώ τα μειονεκτήματα:

• Ορισμένες μέθοδοι απαιτούν ειδικές εγκαταστάσεις αλλά είναι και ιδιαίτερα χρονοβόρες.

• Εφαρμογές οι οποίες απαιτούν υψηλά επίπεδα ευαισθησίας είναι συνήθως αντισυμβαλλόμενες και απαιτούν προσωπικό με εκτενή εκπαίδευση στο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 4.

Διάδοση Κυμάτων

4.1 Γενικά – ορισμοί

Ως κύμα ορίζουμε μία διαταραχή, συνήθως περιοδική, που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα διαμέσου ενός ή περισσότερων μέσων.

Μέσω του κύματος, έχουμε διάδοση ενέργειας στο μέσο και μεταφορά της σε άλλο σημείο του μέσου. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ότι το μέσο μπορεί να παραμορφώνεται σταδιακά, να υφίσταται τοπικές μετατοπίσεις και να ταλαντώνεται κατά τη διέλευση του κύματος, χωρίς κατ' ανάγκη να παρατηρείται κάποια παραμόρφωση, ή μετατόπιση στο σύνολο του μέσου.

• Προκύπτει ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν τρεις ταχύτητες που σχετίζονται με ένα κύμα:

• Η κυματική ή φασική ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα, δηλαδή οι ισοφασικές επιφάνειες, στο μέσο.

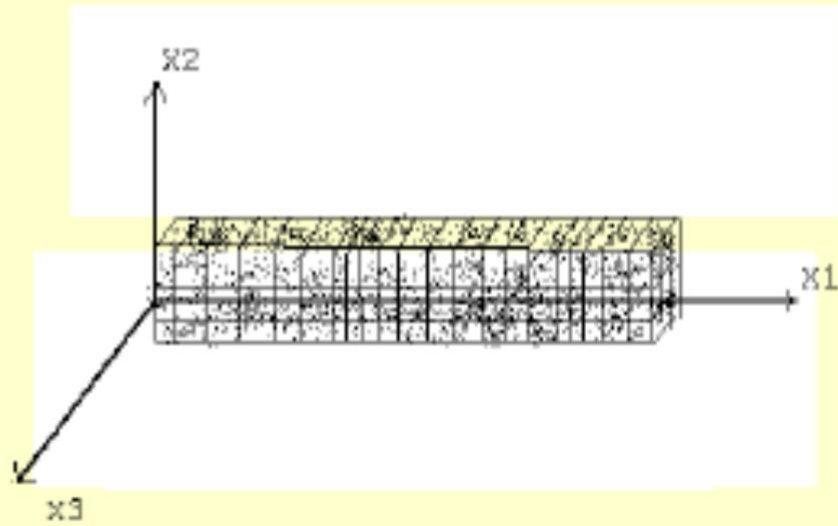
• Η σωματιδιακή ή μοριακή ταχύτητα. Είναι η ταχύτητα με την οποία ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας του, το κάθε τμήμα του μέσου.

• Η ομαδική ταχύτητα. Για την περίπτωση υπέρθεσης κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες, μήκη κύματος και ταχυτήτων, έχουμε τη δημιουργία ενός κυματοπακέτου. Η ομαδική ταχύτητα περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης της ενέργειας του κυματοπακέτου.

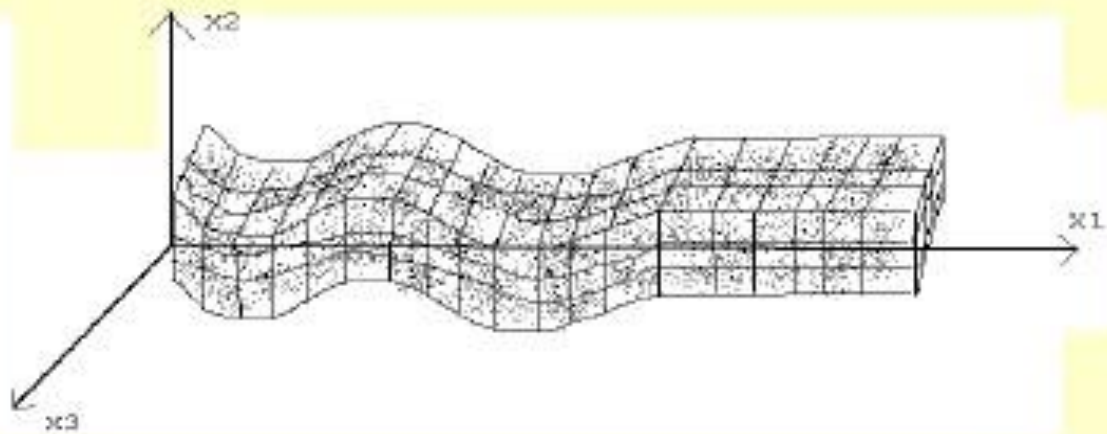
Διαμήκη λέγονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι παράλληλες.

Εγκάρσια λέγονται τα κύματα όταν η διεύθυνση διάδοσής τους και η διεύθυνση των ταλαντώσεων ή μετατοπίσεων του μέσου είναι κάθετες.

Η κίνηση του ελαστικού μέσου για ένα διαμήκες και ένα εγκάρσιο κύμα που διαδίδεται σε δισδιάστατο χώρο κατά τη διεύθυνση x_1 , φαίνεται στα σχήματα 4.1 και 4.2



4.1 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός διαμήκους κύματος.



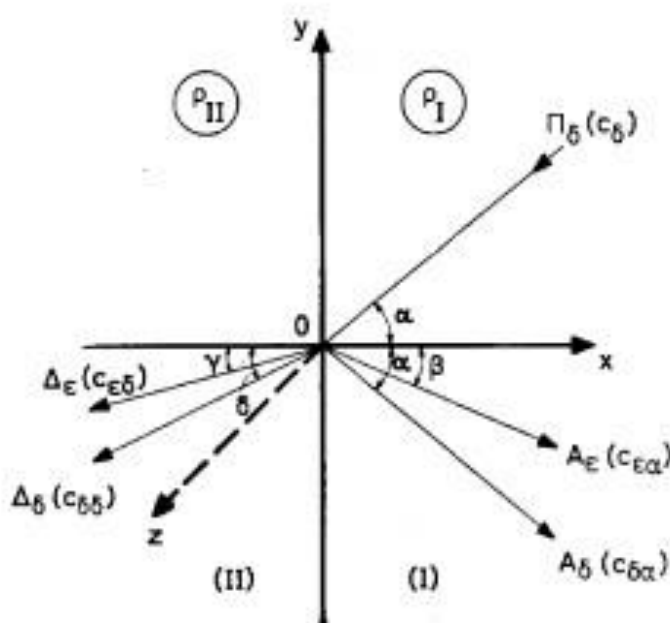
4.2 Παραμόρφωση ελαστικού μέσου κατά τη διέλευση ενός εγκάρσιου κύματος.

Κρουστικός παλμός δημιουργείται από κρουστικό φορτίο. Κρουστικό λέγεται το φορτίο όταν η διάρκεια της επιβολής του σε μία κατασκευή είναι συγκρίσιμη με τη θεμελιώδη φυσική περίοδο της κατασκευής. Συγκεκριμένα, ένα φορτίο θεωρείται κρουστικό, όταν ο συνολικός χρόνος επιβολής του είναι το πολύ ίσος με τη θεμελιώδη φυσική περίοδο της κατασκευής, ενώ θεωρείται στατικό, όταν είναι μεγαλύτερος από τον τριπλάσιο της φυσικής περιόδου.

Αποτέλεσμα της κρουστικής καταπόνησης είναι η δημιουργία μηχανικής διαταραχής σε ένα σημείο του σώματος, που στη συνέχεια διαδίδεται με τη μορφή μηχανικών κυμάτων (τασικών και παραμορφωσιακών) στο υλικό.

Τα τασικά κύματα ακολουθούν τους γνωστούς νόμους των κυμάτων, ανάκλασης, διάθλασης, σκέδασης κλπ. Όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα ανακλάται σε μία ελεύθερη επιφάνεια, οι συνοριακές συνθήκες δεν ικανοποιούνται αν θεωρήσουμε ως ανακλώμενο μόνο διάμηκες κύμα. Αντίθετα, ικανοποιούνται αν θεωρήσουμε ότι επιπρόσθετα ανακλάται και ένα εγκάρσιο κύμα.

Γενικά όταν ένα επίπεδο διάμηκες κύμα προσπέσει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων τότε θα δημιουργηθούν τέσσερα κύματα, (σχήμα 4.3), δύο από ανάκλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο και δύο από διάθλαση, ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο.

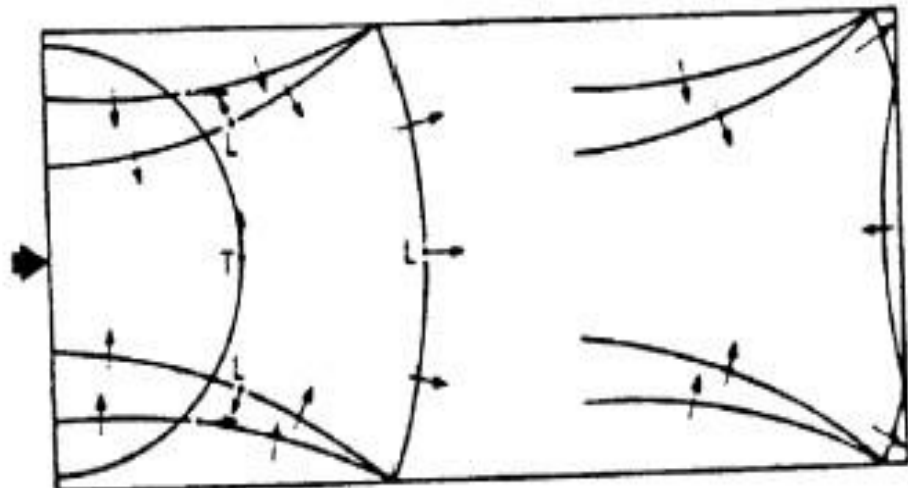


4.3 Ανάκλαση και διάθλαση προσπίπτοντος διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.

Ισχύει δε ότι:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{\delta}} = \frac{\sin \alpha}{c_{\delta\alpha}} = \frac{\sin \beta}{c_{\epsilon\alpha}} = \frac{\sin \gamma}{c_{\epsilon\delta}} = \frac{\sin \delta}{c_{\delta\delta}}$$

Για κάθε περίπτωση δεν υπάρχει πάντα ανακλώμενο εγκάρσιο κύμα. Το ανακλώμενο διάμηκες, έχει το ίδιο πλάτος με το προσπίπτον, αλλά αντίθετο πρόσημο. Αν το προσπίπτον κάθετα σε επιφάνεια κύμα είναι θλιπτικό, τότε το ανακλώμενο διάμηκες είναι εφελκυστικό. Σχηματική παράσταση έχουμε στο παρακάτω σχήμα 4.4



4.4 Τασικά κύματα σε πλάκα

4.2 Η κυματική εξίσωση

Τα περισσότερα είδη κυμάτων εκφράζονται μαθηματικά με την κυματική εξίσωση, που είναι μία γραμμική μερική διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού:

$$\nabla^2 F = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

Όπου c είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο μέσον και F , μια χρονοεξαρτώμενη συνάρτηση, που περιγράφει τη διαταραχή, π.χ. $F(x \pm ct)$.

Για τον καθορισμό των εξισώσεων κίνησης σε ελαστικό στερεό, θεωρούμε στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πλευρών dx, dy, dz και θεωρούμε τις μεταβολές των τάσεων στις πλευρές του.

Από το δεύτερο νόμο κίνησης του Νεύτωνα, για τον άξονα x αρχικά, έχουμε:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz = \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του σώματος και u η μετατόπιση κατά τον άξονα x .

Για τους τρεις άξονες θα έχουμε τις γενικευμένες διαφορικές εξισώσεις μεταξύ τάσεων και μετατοπίσεων u, v, w :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Για ομογενές ιστροπικό ελαστικό υλικό όπου ισχύουν οι γνωστές σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_{zz}\end{aligned}\tag{4.3}$$

$$\tau_{xy} = 2G\varepsilon_{xy}$$

$$\tau_{yz} = 2G\varepsilon_{yz}$$

$$\tau_{zx} = 2G\varepsilon_{zx}$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης, λ , μ οι σταθερές Lamé, $\mu = G$, και Θ η διόγκωση με:

$$\Theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

Και από τις σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις που εκφράζουν τις συνθήκες κίνησης:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (4.4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w$$

Ο τελεστής εκφράζεται από την:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Διαφορίζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (4.4) ως προς x,y,z αντίστοιχα και προσθέτοντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Theta \quad (4.5)$$

Η εξίσωση (4.5) είναι της μορφής (4.1) και εκφράζει την κυματική εξίσωση του ισότροπου και ομογενούς ελαστικού σώματος.

4.3 Ταχύτητα κύματος

Η κυματική εξίσωση δείχνει ότι η διόγκωση Θ διαδίδεται με ταχύτητα:

$$\left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Διαφορίζοντας τη δεύτερη και την τρίτη των σχέσεων (3.4) ως προς y, z αντίστοιχα και αφαιρώντας έχουμε:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \omega_x \quad (4.6)$$

Όπου: $\omega_x = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$ εκφράζει την περιστροφή γύρω από τον άξονα x .

Αντίστοιχες εκφράσεις ισχύουν με κυκλική εναλλαγή.

Δηλαδή η περιστροφή διαδίδεται με ταχύτητα: $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$

Επομένως στο εσωτερικό του σώματος το κύμα διαδίδεται με δύο διαφορετικές ταχύτητες.

• Τα κύματα που δεν περιλαμβάνουν περιστροφές, δηλαδή τα διαμήκη, που διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_{\delta} = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{3K + 4G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου K το μέτρο διόγκωσης.

• Τα κύματα που περιλαμβάνουν μόνο περιστροφές, δηλαδή τα εγκάρσια, που διαδίδονται με ταχύτητα:

$$c_{\varepsilon} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι οι παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή όγκου αλλά όχι σχήματος (σχήμα 4.1), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα c_{δ} , ενώ παραμορφώσεις που οδηγούν σε αλλαγή σχήματος, χωρίς αλλαγή όγκου, (σχήμα 4.2), διαδίδονται με τη φασική ταχύτητα c_{ε} . Επίσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών είναι μεγαλύτερη των εγκαρσίων κυμάτων και ότι και οι δύο ταχύτητες δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα κρούσεως, αλλά από τις μηχανικές σταθερές του σώματος. Αντίθετα, η σωματιδιακή ταχύτητα εξαρτάται.

Η σωματιδιακή ταχύτητα διαχωρίζεται και αυτή σε δύο, στην προκαλούμενη από τη δίοδο του διαμήκους με τιμή: $v_{\delta} = \frac{\sigma}{\rho c_{\delta}}$, όπου σ η υπάρχουσα στη θέση ορθή τάση και στην προκαλούμενη από τη δίοδο του εγκαρσίου, με τιμή: $v_{\varepsilon} = \frac{\tau}{\rho c_{\varepsilon}}$, όπου τ η διατμητική τάση στην υπόψη θέση.

Κεφάλαιο 5.

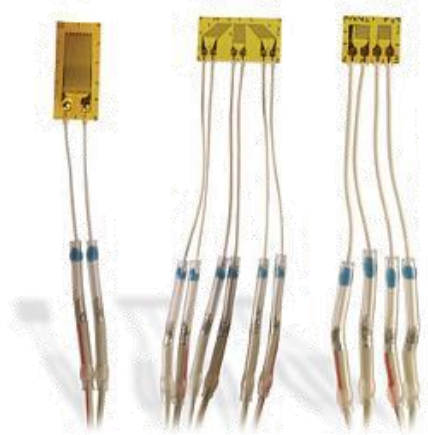
Πειραματική διαδικασία

5.1 Εισαγωγή

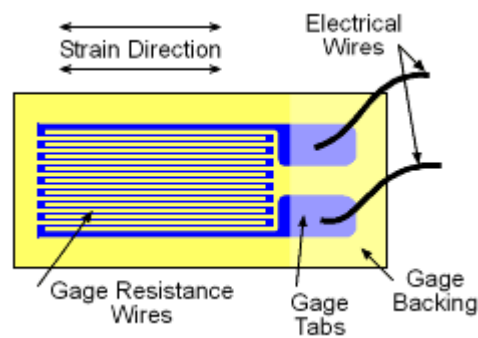
Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος. Κατά μήκος και εγκάρσια της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων, περίπου στο μέσο αυτών, επικολλήθηκαν ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης. Στη συνέχεια παρήχθη τασικός παλμός σε κάθε δοκίμιο και καταγράφηκαν οι τιμές των διαμήκων και εγκάρσιων παραμορφώσεων. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων. Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων.

5.2 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges)

Προκειμένου να μετρηθεί η παραμόρφωση των δοκιμίων που θα προκληθεί από την κρουστική καταπόνησή τους, επικολλήθηκαν σε κατάλληλα σημεία τους ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης.



5.1 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης



5.2 Σχηματική παράσταση μετρητή

Οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης είναι ωμικές αντιστάσεις, ιδιαίτερα ευαίσθητες στην αλλαγή του μήκους τους. Το μήκος και το πλάτος του μετρητή, καθώς και η αντίστασή του είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά του και αναφέρονται στον τύπο του.

Όπως είναι γνωστό από τον ηλεκτρισμό, η αντίσταση R ηλεκτρικού αγωγού μήκους L , ειδικής αντίστασης ρ και εμβαδού διατομής S , δίνεται από

$$\text{τη σχέση: } R = \rho \frac{L}{S} .$$

Επομένως μεταβολή του μήκους του αγωγού επιφέρει αναλόγως μεταβολή στην ηλεκτρική του αντίσταση. Επιπλέον είναι γνωστό ότι κατά τη

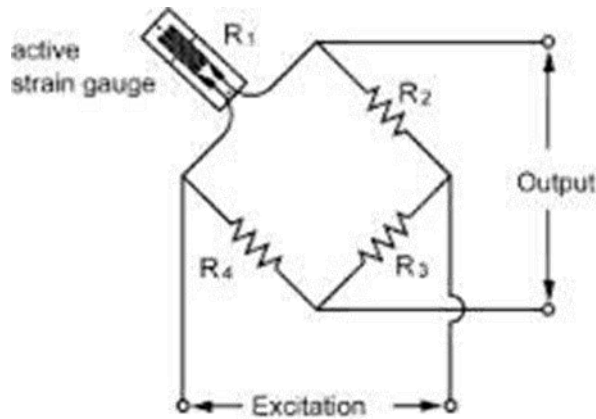
μονοαξονική καταπόνηση σώματος σε εφελκυσμό ή θλίψη, το μήκος του L θα υποστεί μεταβολή ΔL , οπότε η ορθή παραμόρφωση ε δίνεται από τη σχέση:

Συνεπώς, όταν ένα δοκίμιο, στο οποίο έχει επικολληθεί ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης, υποστεί εφελκυστική ή θλιπτική καταπόνηση, τότε η ορθή παραμόρφωσή του είναι ανάλογη με τη μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτρικού μετρητή παραμόρφωσης: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$.

Συνεπώς, όταν ένα δοκίμιο, στο οποίο έχει επικολληθεί ηλεκτρικός μετρητής παραμόρφωσης, υποστεί εφελκυστική ή θλιπτική καταπόνηση, τότε η ορθή παραμόρφωσή του είναι ανάλογη με τη μεταβολή της αντίστασης του ηλεκτρικού μετρητή παραμόρφωσης:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} \quad (5.1)$$

όπου R η αντίσταση του μετρητή, ΔR η μεταβολή της αντίστασής του η οφειλόμενη στην παραμόρφωση του δοκιμίου και K ο συντελεστής του μετρητή (gauge factor) που δίνεται από τον κατασκευαστή. Επειδή η μεταβολή της αντίστασης ΔR του μετρητή είναι εν γένει μικρή, προκειμένου να μετρηθεί και να έχουμε έτσι την τιμή της παραμόρφωσης, απαιτείται η αντίσταση του μετρητή να αποτελείσει τμήμα του κυκλώματος μίας «γέφυρας Wheatstone», όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3.



5.3 Η γέφυρα Wheatstone

όπου Output (e) είναι η τάση εξόδου, Excitation (E) είναι η τάση της γέφυρας, R_1 η αντίσταση του μετρητή και R_2, R_3, R_4 , γνωστές σταθερές αντιστάσεις. Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση μεταβολής της αντίστασης του μετρητή ΔR_1 λόγω της παραμόρφωσης του δοκιμίου, δημιουργείται ανάλογη μεταβολή Δe στην τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία στην περίπτωση που όλες οι αντιστάσεις είναι ίσες, γίνεται:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} E \quad (5.3)$$

και επειδή $\Delta R \ll R$, λόγω της σχέσης (5.1), θα είναι:

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R} E = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad (5.4)$$

Επομένως από τη διαφορά δυναμικού Δe της τάσης εξόδου της γέφυρας μπορεί να μετρηθεί άμεσα η παραμόρφωση ε , με αναλογικό ή ψηφιακό τρόπο.



5.4 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης επικολλημένοι σε δοκίμιο



5.5 Ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης, κολλητική ταινία και δοκίμιο

5.3 Προετοιμασία των δοκιμών

Από θώρακα οπλισμού που φαίνεται στη φωτογραφία 5.6 αφαιρέθηκαν ράβδοι από κατασκευαστικό χάλυβα με νευρώσεις διατομής $\Phi 12$ και μήκους 48cm. Αυτές κόπηκαν στη μέση με τροχό (φωτογραφία 5.7) ώστε να συγκολληθούν μεταξύ τους. Κατόπιν έγινε επιφανειακή λείανση με σμυριδοτροχό (φωτογραφία 5.8) γύρω στα 2 εκατοστά πριν και μετά το κέντρο των ράβδων έτσι ώστε να κολληθούν οι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges).



5.6 Θώρακας οπλισμού από όπου προήλθαν οι ράβδοι



5.7 Κοπή των ράβδων με τροχό



5.8 Επιφανειακή λείανση με σμυριδοτροχό

Η κάθε ράβδος που κόπηκε σε δύο τμήματα συγκολλήθηκε με ηλεκτροσυγκόλληση τόξου (φωτογραφίες 5.9 και 5.10). Η συγκόλληση ήταν επιτηδευμένα κακής ποιότητας και διέφερε από ράβδο σε ράβδο όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



5.9 Ηλεκτροσυγκόλληση τόξου και μάσκα προστασίας



5.10 Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκολλήσεις

Στα συγκολλημένα δοκίμια έγινε επικόλληση ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης (strain gauges) τύπου Kyowa KFG-02-120-C1-11 για μέταλλα. Σε κάθε δοκίμιο κολλήθηκαν 4 μετρητές: δύο πριν το σημείο συγκόλλησης διαμήκως και εγκάρσια, και δύο μετά επίσης διαμήκως και εγκάρσια, σε απόσταση 1-2 cm περίπου, όπως φαίνεται στις φωτο 5.11 και 5.12.

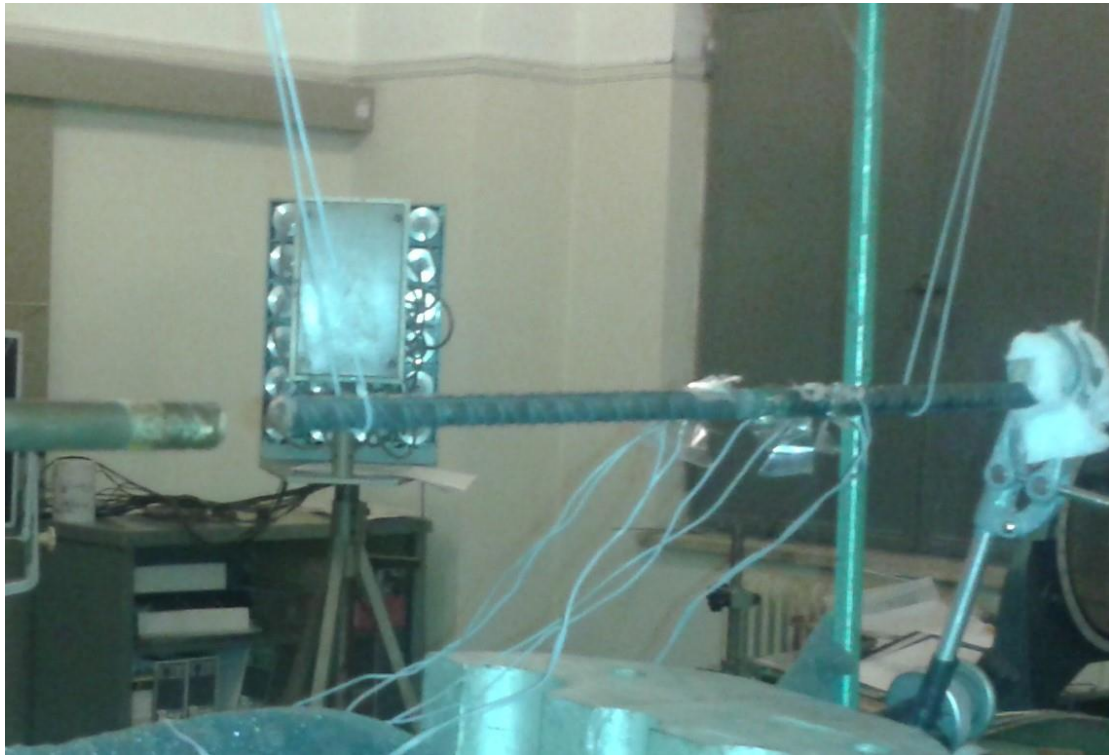


5.11 Επικόλληση ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης στο δοκίμιο



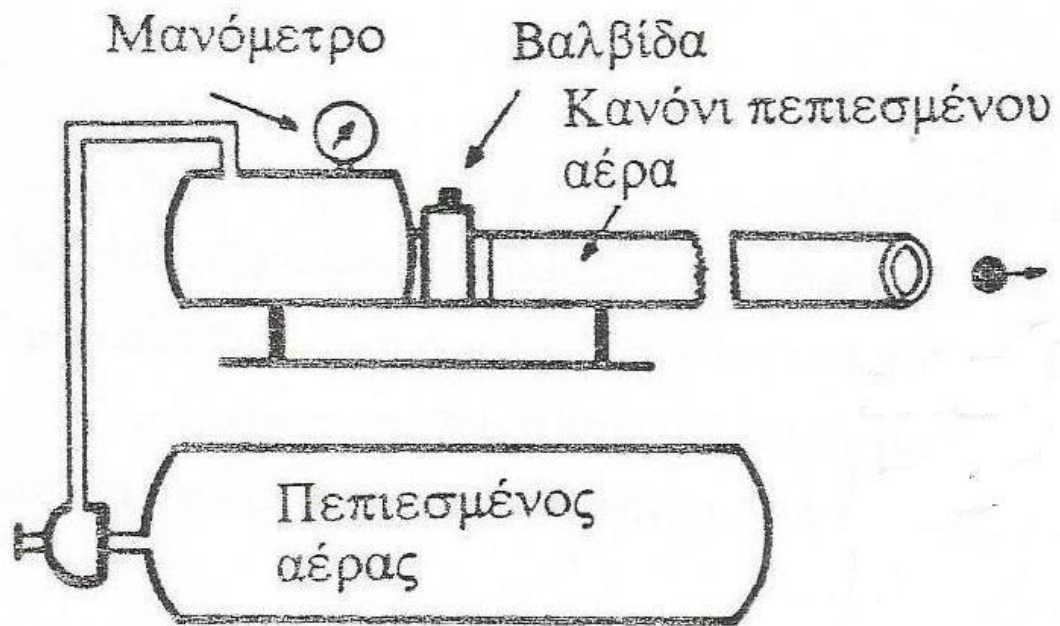
5.12 Επικόλληση ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης στο δοκίμιο

Ύστερα με ηλεκτρικό κολλητήρι συγκολλήθηκαν οι ακροδέκτες των ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης με καλώδια για τη σύνδεση με το μετρητικό σύστημα, που περιγράφεται παρακάτω, όπως φαίνεται στη φωτογραφία 5.13:



5.13 Καλώδια σύνδεσης του δοκιμίου με το μετρητικό σύστημα

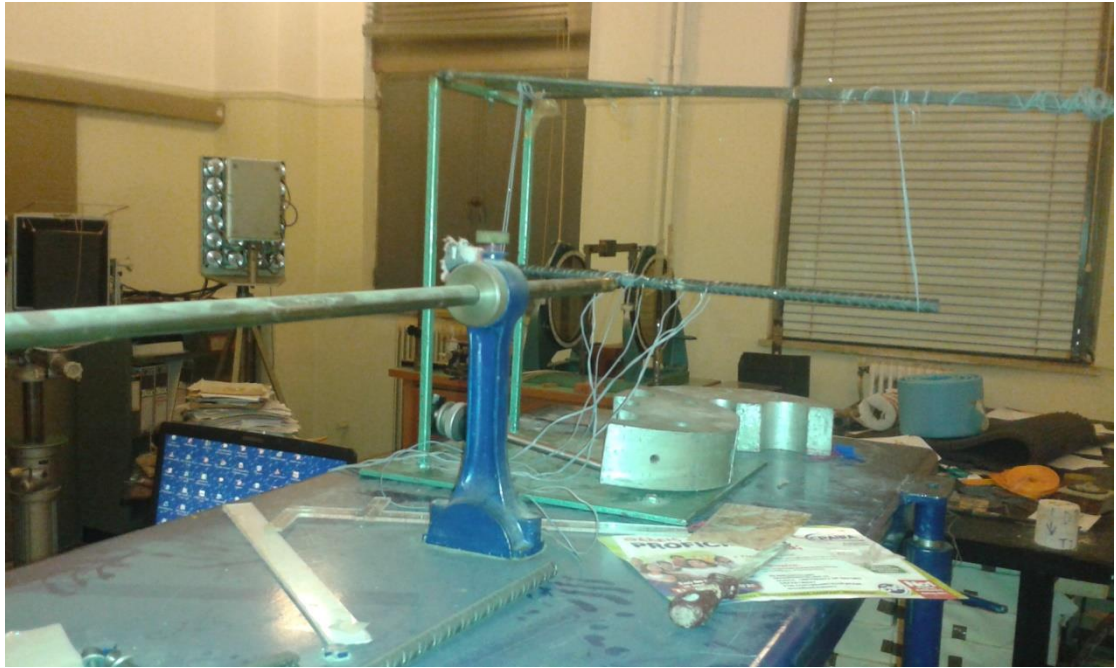
Το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε μπροστά από την κώνη αεριοβόλου πεπιεσμένου αζώτου του εργαστηρίου Αντοχής Υλικών, η πειραματική διάταξη του οποίου φαίνεται στη φωτογραφία 5.14:



5.14 Διάταξη της κάνης αεριοβόλου πεπιεσμένου αέρα του εργαστηρίου Αντοχής Υλικών

Το κανόνι σπλιζόταν με σφαιρίδιο διαμέτρου 1cm. Με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας, που ο χρόνος λειτουργίας της ήταν πολύ μικρός, υπήρχε σταθερή επιτάχυνση της σφαίρας στο κανόνι. Έτσι η ταχύτητα εξόδου της ήταν σταθερή για δεδομένη εφαρμοζόμενη πίεση. Στα πειράματα που έγιναν εφαρμόστηκε πίεση 3 bar. Η ταχύτητα των βλημάτων ήταν περίπου 10 m/sec, όπως είχε υπολογιστεί από σύστημα διακοπής δέσμης φωτοκυτάρων.

Το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στην αρχή με τον διαμήκη άξονά του σε συνέχεια του άξονα της κάνης και μετά κάθετα σε αυτήν, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες 5.15 και 5.16:



5.15 Εγκάρσια τοποθέτηση της ράβδου



5.16 Διαμήκης τοποθέτηση της ράβδου

Τα δοκίμια αναρτήθηκαν από μια σιδηροκατασκευή με τη βοήθεια καλωδίων χάρη στα οποία επετεύχθη το κατάλληλο ύψος τους έτσι ώστε να είναι σε ευθυγράμμιση με την κάνη. Για λόγους ευστάθειας και κυρίως για να εμποδιστεί η μετακίνησή του από τη δύναμη κρούσης του σφαιριδίου, το άκρο

της ράβδου περιορίστηκε μέσα σε μία αρπάγη στην οποία είχε τοποθετηθεί βαμβάκι για να απορροφήσει τους ανεπιθύμητους κραδασμούς, χωρίς να προσθέτει επιπλέον στήριξη. Τοποθετήθηκε επίσης απορροφητικό υλικό μεταξύ της κατασκευής που στήριζε τα δοκίμια και του τραπεζιού πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το κανόνι, για να δημιουργηθούν συνθήκες μόνωσης πιθανής διάδοσης του κύματος στην υπόλοιπη κατασκευή.

5.4 Παράμετροι του πειράματος

1) Στο εξεταζόμενο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια. Όπως αναφέρθηκε αυτά κόπηκαν στη μέση και μετά συγκολλήθηκαν.

- Στο πρώτο δοκίμιο (δοκίμιο 1) χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο απλού σιδήρου, όχι St όπως έπρεπε, το οποίο επιπλέον είχε υγρασία. Έγινε μία μόνο σταγόνα για τη συγκόλληση.
- Στο δεύτερο δοκίμιο (δοκίμιο 2) χρησιμοποιήθηκε ίδιου τύπου ηλεκτρόδιο αλλά δεν είχε υγρασία. Επιπλέον η συγκόλληση ήταν αρκετά πιο στιβαρή.
- Τέλος στο τρίτο δοκίμιο (δοκίμιο 3) με ίδιου τύπου ηλεκτρόδιο η συγκόλληση έγινε όπως έπρεπε αλλά η ράβδος ψύχθηκε αμέσως με νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αποδυναμώνεται η συγκόλληση αφού η ψύξη πρέπει να γίνεται αργά με τον αέρα του περιβάλλοντος χώρου.

2) Τοποθετήθηκαν επί των δοκιμίων δύο μετρητές παραμόρφωσης πριν το σημείο συγκόλλησης, ένας κατά μήκος και ένας κάθετα, και δύο μετά το σημείο συγκόλλησης με αντίστοιχη διάταξη.

3) Το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε με δύο τρόπους σε σχέση με την διεύθυνση του κρουστικού παλμού. Πρώτα με τον διαμήκη άξονά του κατά την διεύθυνση της διάδοσης του παλμού και μετά κάθετα σε αυτήν.

5.5 Το μετρητικό σύστημα

Σύμφωνα με το αντικείμενο της εργασίας στα δοκίμια δημιουργήσαμε τασικό παλμό μέσω κρούσης με ένα σφαιρίδιο, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή και να μετρηθούν οι παραμορφώσεις στα επιλεγμένα σημεία των δοκιμίων, απαιτείται μετρητικό σύστημα κατάλληλο για δυναμικές μετρήσεις.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πολυκαναλικό σύστημα ταχείας λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων (DAS – Data Acquisition System) που είναι το Model 635 της Pacific Instruments, το οποίο αποτελείται από τα εξής:

- Την κεντρική μονάδα με βυσματούμενες κάρτες συλλογής δεδομένων, δυνατότητας 4 υποδοχών των 8 καναλιών, με θύρα USB
- Δύο 8-καναλικές βυσματούμενες μονάδες-ψηφιοποιητές
- Λογισμικό για την αποθήκευση, την επεξεργασία και την παρουσίαση δεδομένων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή
- Φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή

Οι μετρήσεις έγιναν με 70.000 λήψεις/sec ανά κανάλι.

Κεφάλαιο 6.

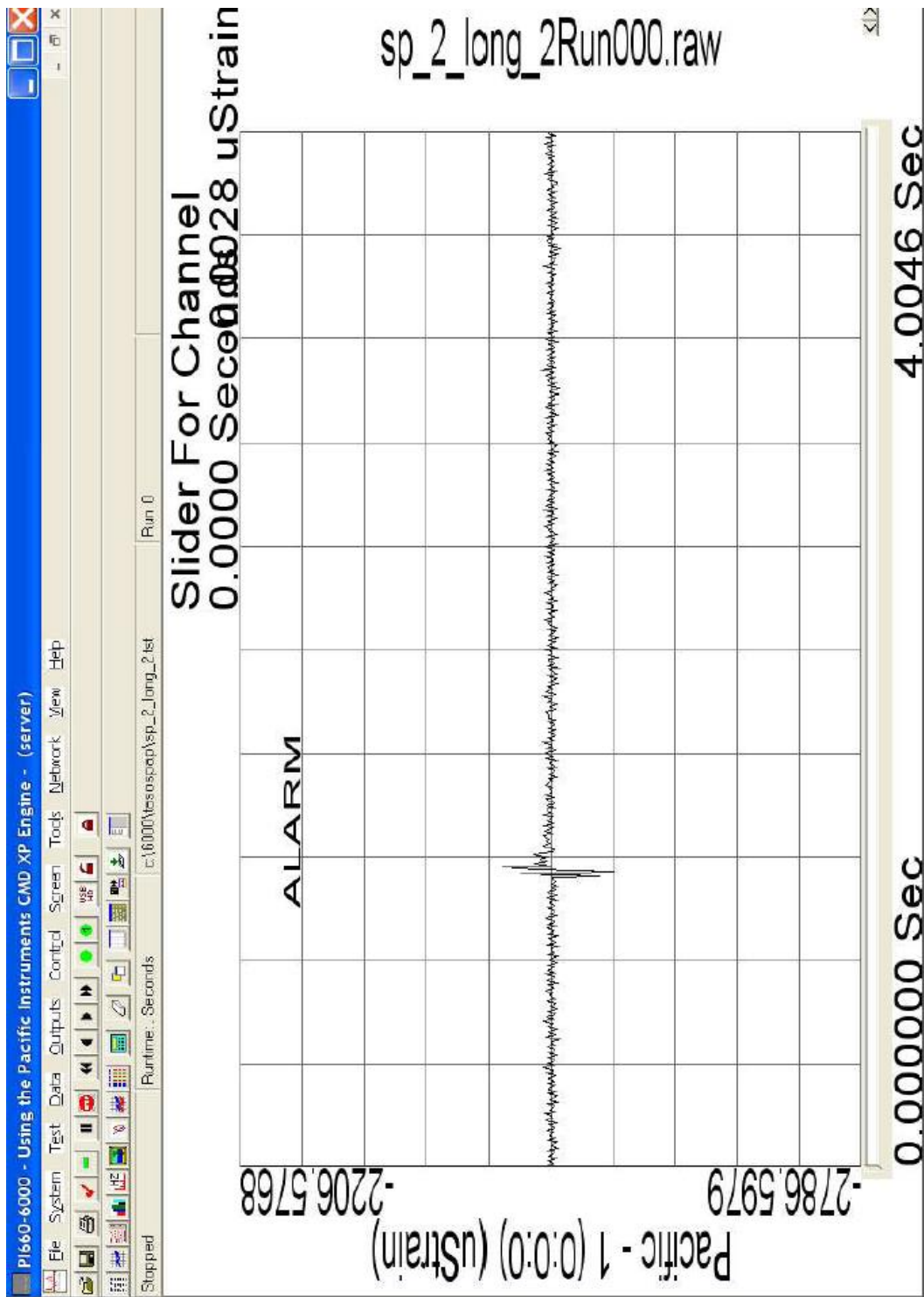
Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (σε μορφή διαγραμμάτων) του πειράματος και ακολουθούν τα συμπεράσματα και ο σχολιασμός.

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PI660-6000 του μετρητικού συστήματος Model 635 της Pacific Instruments για κάθε μέτρηση παίρναμε δύο ειδών διαγράμματα: το Quick Plot και το Oscilloscope.

Στο Quick Plot (σχήματα 6.1, 6.2) φαίνεται η παραμόρφωση σε όλο τον χρόνο καταγραφής, ο οποίος χονδρικά ήταν περίπου 3-4 sec. Η μεταβλητή της παραμόρφωσης απεικονίζεται στο κάθετο άξονα ενώ αυτή του χρόνου στον οριζόντιο. Σε κάθε άξονα αναφέρεται μόνο η αρχική και η τελική τιμή του εκάστοτε μεγέθους αλλά και οι δύο άξονες είναι χωρισμένοι σε δέκα ίσα τμήματα έτσι ώστε να υπολογίζονται ευκολότερα οι ενδιάμεσες τιμές. Να σημειωθεί ότι ο άξονας της παραμόρφωσης μετράει το μέγεθος *σχετικά*, δηλαδή δεν μας ενδιαφέρει η απόλυτη τιμή της παραμόρφωσης αλλά η σχετική μεταβολή της με τον χρόνο. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μιας κάθετης γραμμής (slider) η οποία μεταφερόμενη με τον κέρσορα μας δείχνει την τιμή του χρόνου σε όποιο σημείο του διαγράμματος θέλουμε. Τέλος στο αριστερό μέρος μπορούμε να διαβάσουμε σε ποιο κανάλι (και άρα σε ποιο μετρητή) αντιστοιχεί το διάγραμμα αυτό, ενώ στα δεξιά διαβάζουμε την ονομασία που έχουμε δώσει στη συγκεκριμένη κρούση.



6.1 Παράδειγμα διαγράμματος Quick Plot

Στο Oscilloscope (σχήματα 6.3, 6.4) μας δίνεται η δυνατότητα να ανοίξουμε ένα παράθυρο χρόνου και να δούμε με λεπτομέρεια την παραμόρφωση που κατέγραψε ο μετρητής. Και εδώ ο οριζόντιος άξονας μετράει χρόνο ενώ ο κάθετος παραμόρφωση. Η τιμή κάτω αριστερά αφορά το κατώτατο όριο παραμόρφωσης του συγκεκριμένου διαγράμματος ενώ η πάνω αριστερά το ανώτερο. Οι τιμές αυτές πάλι είναι σχετικές: μας αφορούν ως διαφορές. Κατά τα γνωστά οι άξονες έχουν διαιρεθεί σε 10 ίσα τμήματα για ευκολία στις μετρήσεις ενδιάμεσων τιμών ενώ η τιμή στη μέση και πάνω από το διάγραμμα μας λέει σε πόση παραμόρφωση αντιστοιχεί το κάθε κουτάκι.

Η σημαντική διαφορά σε σχέση με τα διαγράμματα Quick Plot αφορά τη χρήση του slider: εδώ με τον έλεγχο του κέρσορα δίνεται η δυνατότητα να γνωρίζουμε την τιμή της παραμόρφωσης σε κάθε σημείο του διαγράμματος, η οποία και αναγράφεται πάνω δεξιά.

Ακολουθούν δύο τυχαία παραδείγματα διαγραμμάτων Oscilloscope:



6.3 Παράδειγμα διαγράμματος Oscilloscope



6.4 Παράδειγμα διαγράμματος Oscilloscope

6.2 Διαγράμματα

Ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων-μετρήσεων. Όπως έχει αναφερθεί χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια στα οποία έγιναν κρούσεις κατά τον άξονα τους (διαμήκες χτύπημα) και κάθετα σε αυτόν (εγκάρσιο χτύπημα). Στο κάθε δοκίμιο είχαν τοποθετηθεί 4 μετρητές: ένας διαμήκως και ένας εγκαρσίως πριν το σημείο συγκόλλησης και άλλοι δύο αντίστοιχοι μετά το σημείο συγκόλλησης.

Ο τρόπος παρουσίασης έχει ως εξής:

- Η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων αφορά το *διαμήκες* χτύπημα. Παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο χωριστά τα αποτελέσματα που κατέγραψαν οι δύο μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί παράλληλα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι *διαμήκεις*. Επίσης παρουσιάζονται και κάποια αποτελέσματα μετρητών που είχαν τοποθετηθεί κάθετα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι *εγκάρσιοι*. Σε κάθε σελίδα το πρώτο διάγραμμα αφορά τον μετρητή *πριν* το σημείο συγκόλλησης και το δεύτερο αυτόν *μετά*. Πρώτα παρουσιάζονται τα Quick Plot (QP) διαγράμματα και μετά τα Oscilloscope (Osc).
- Η δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων αφορά το *εγκάρσιο* χτύπημα. Παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο χωριστά τα αποτελέσματα που κατέγραψαν οι δύο μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί κάθετα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι *εγκάρσιοι*. Επίσης παρουσιάζονται και κάποια αποτελέσματα μετρητών που είχαν τοποθετηθεί παράλληλα με τον άξονα της κάθε ράβδου, δηλαδή οι *διαμήκεις*. Σε κάθε σελίδα το πρώτο διάγραμμα αφορά τον μετρητή *πριν* το σημείο συγκόλλησης και το δεύτερο αυτόν *μετά*. Πρώτα παρουσιάζονται τα Quick Plot (QP) διαγράμματα και μετά τα Oscilloscope (Osc).

Προκειμένου να έχουμε καλύτερη εποπτεία της χρονικής ιστορίας και να μπορούμε να κάνουμε ευκολότερα σύγκριση, έγινε αναγωγή των διαγραμμάτων Oscilloscope στην ίδια κλίμακα, εκτός κάποιων περιπτώσεων που οι διαφορές ήταν μεγάλες οπότε διπλασιάστηκε.

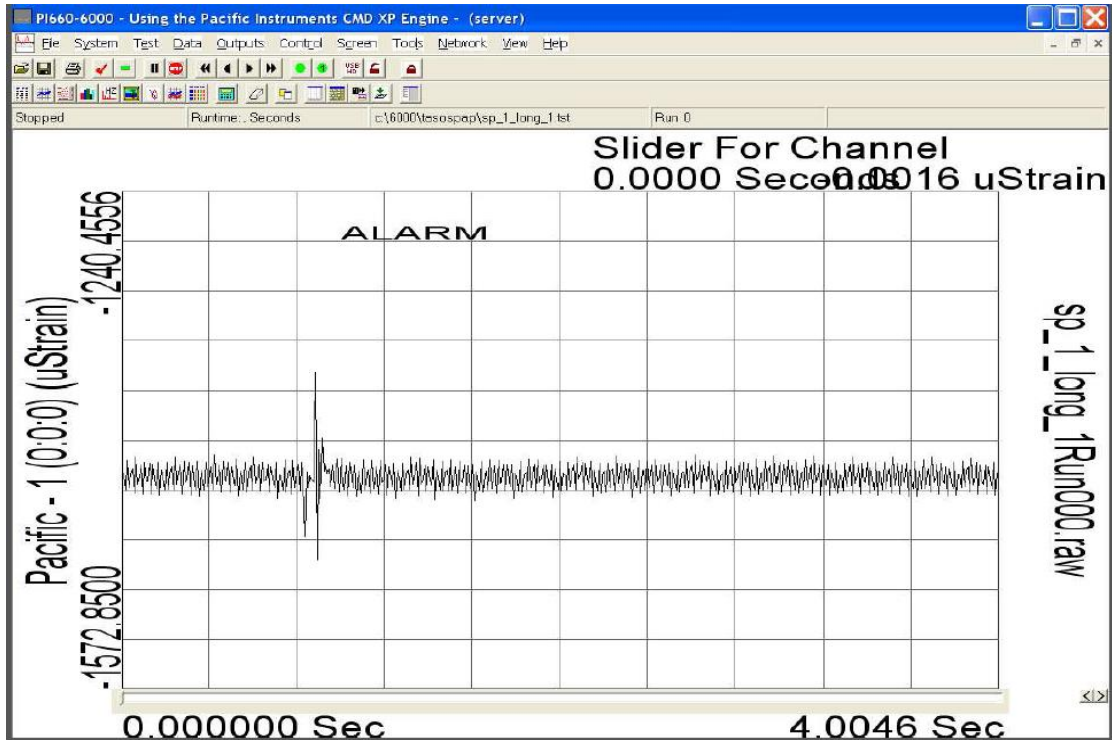
6.2.1 Διαμήκες χτύπημα

Στα σχήματα 6.5 - 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου 1 όσον αφορά το διαμήκες χτύπημα, (τέσσερα χτυπήματα) και τους διαμήκεις μετρητές.

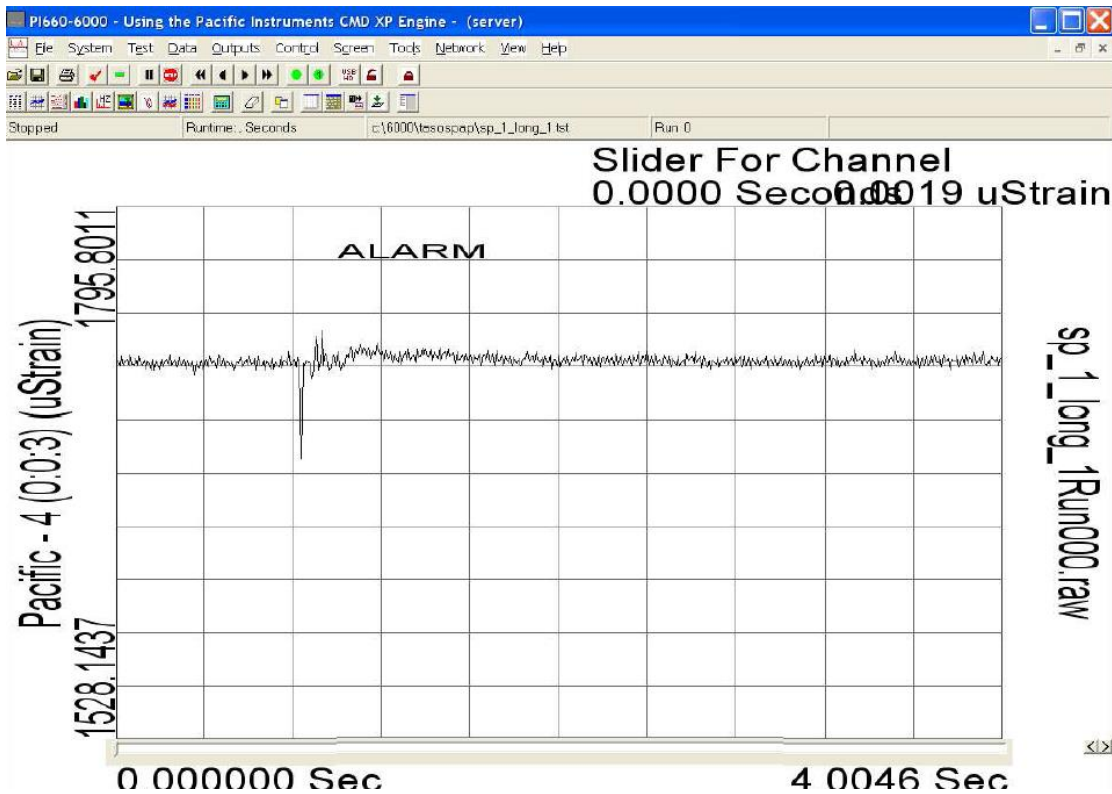
Σε ότι αφορά τα διαγράμματα του Quick Plot, σχήματα 6.5, 6.7, 6.9, 6.11, ο παλμός παρουσιάζεται στο ίδιο χρονικό σημείο τόσο πριν όσο και μετά το σημείο συγκόλλησης, άρα δεν υπάρχει χρονική υστέρηση λόγω της συγκόλλησης, γεγονός αναμενόμενο λόγω της μικρής απόστασής τους και τα παραπλήσια μέτρα ελαστικότητας του χάλυβα με τη συγκόλληση.

Παρατηρούμε όμως και στις 4 επαναλήψεις του πειράματος μία αύξηση του ύψους του παλμού μετά τη συγκόλληση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται παρατηρώντας τα αντίστοιχα διαγράμματα Oscilloscope, σχήματα 6.6, 6.8, 6.10, 6.12. Στα διαγράμματα αυτά γίνεται πιο αντιληπτό ότι μετά τη συγκόλληση ο παλμός γίνεται πιο οξύς, όπως παρατηρείται αυξάνει το ύψος του και στενεύει το εύρος του. Για παράδειγμα στο 6.12α διάγραμμα το ύψος της παραμόρφωσης πριν είναι 180μ ενώ μετά 400μ (6.12β).

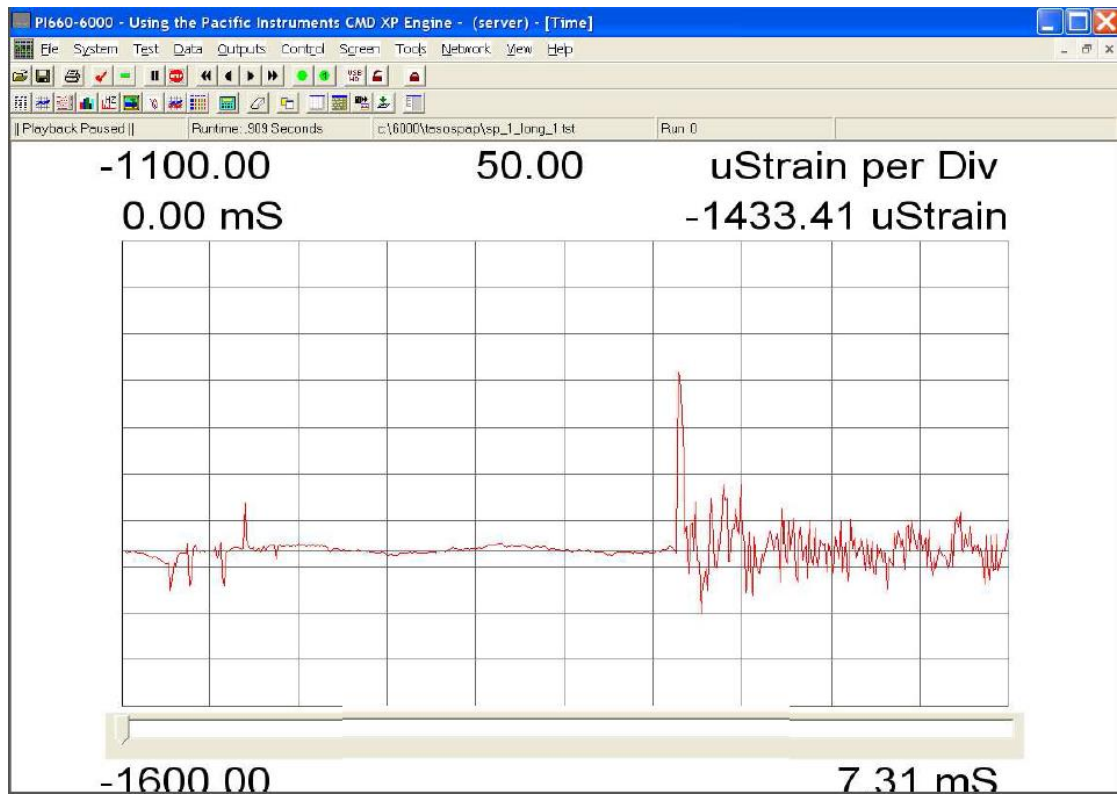
Τέλος στα ίδια διαγράμματα παρατηρούμε έναν αρχικό παλμό που μάλλον οφείλεται σε ηχητική διέγερση που προκαλείται από το κανόνι (χρονικά αντιστοιχεί στη διαδρομή του σφαιριδίου μέσα στη κάνη).



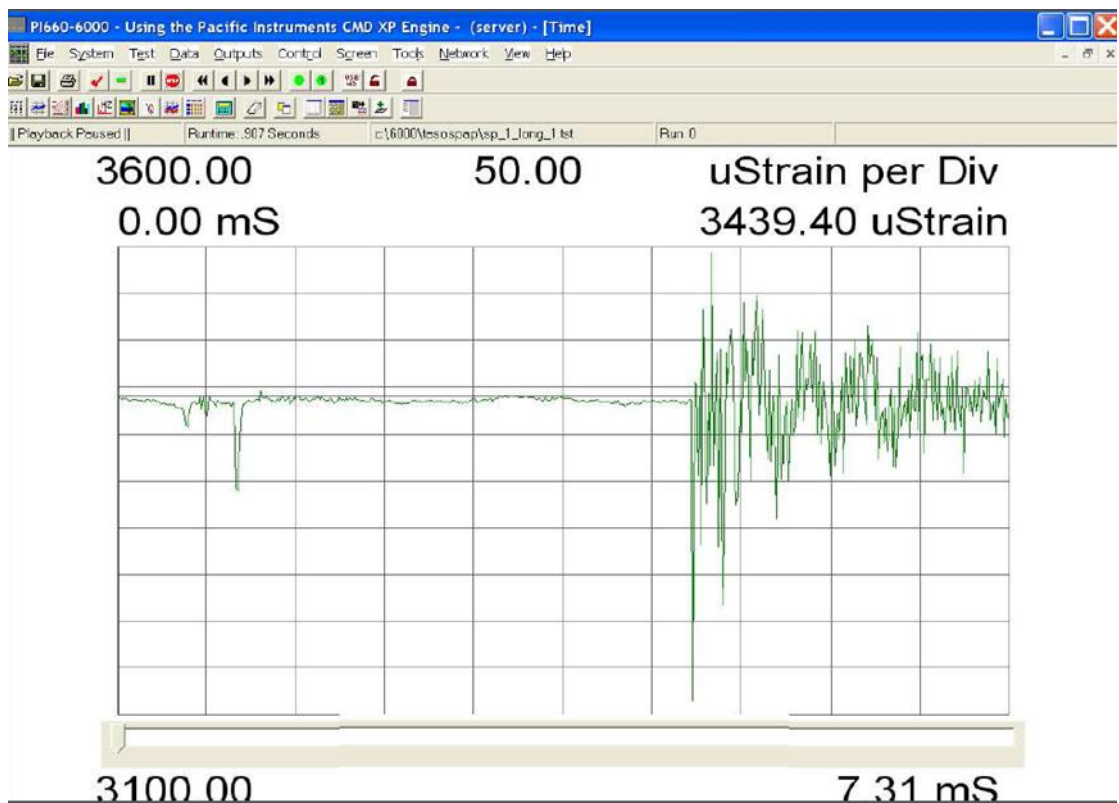
6.5α Δοκίμιο 1 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



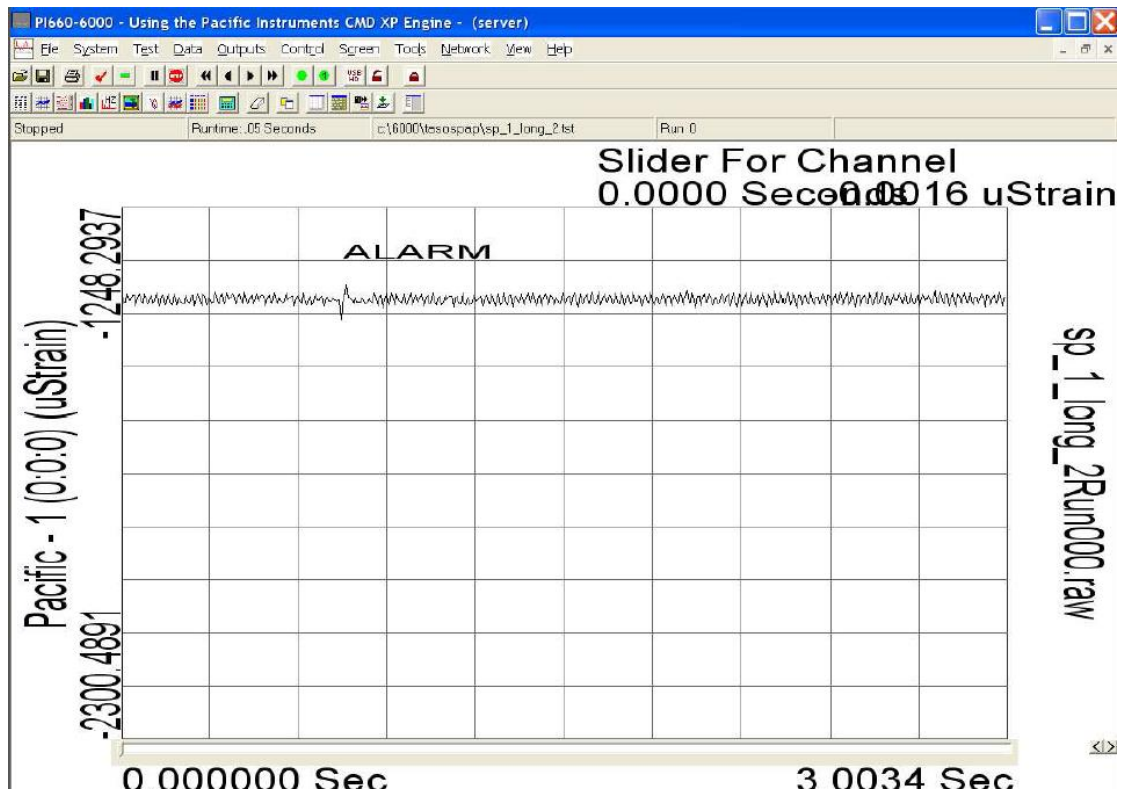
6.5β Δοκίμιο 1 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



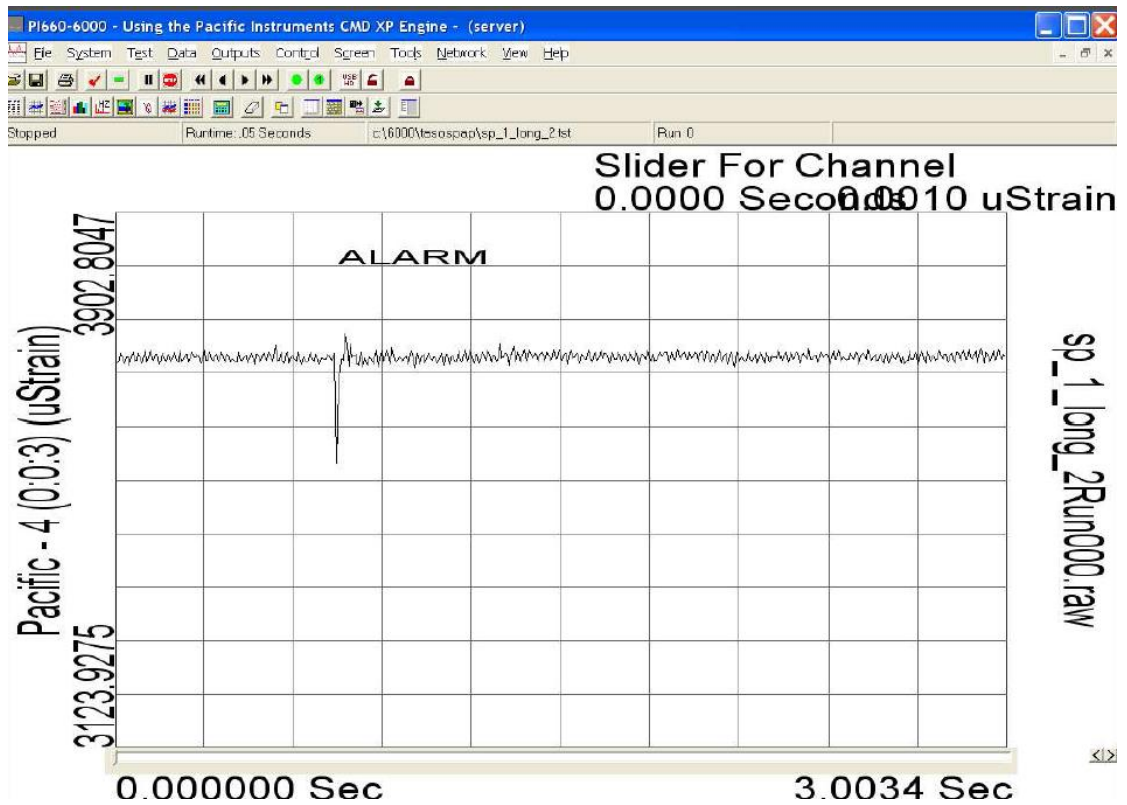
6.6α Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



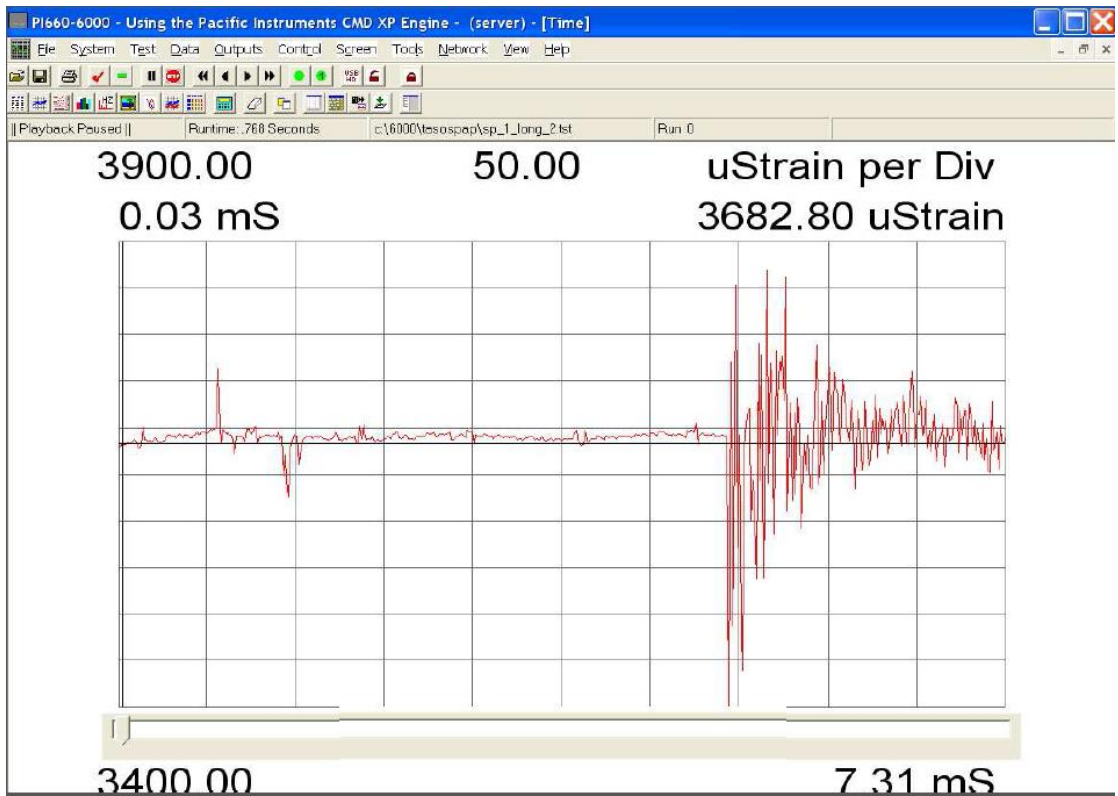
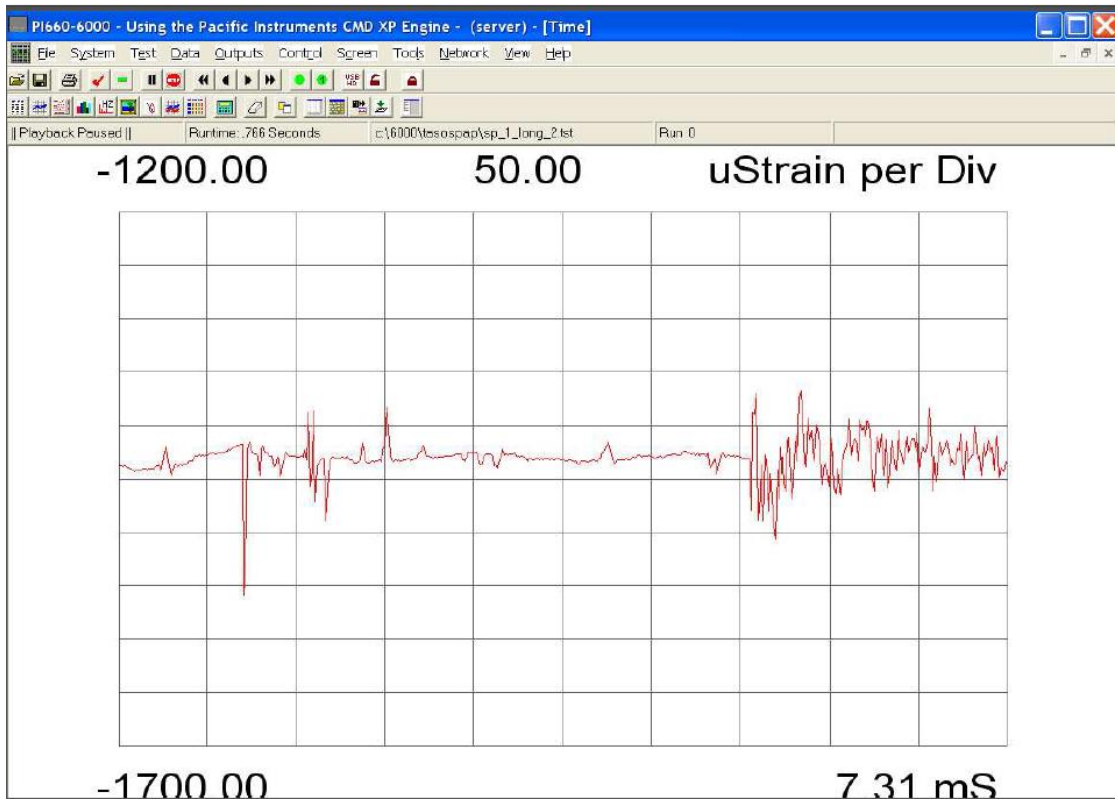
6.6β Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc

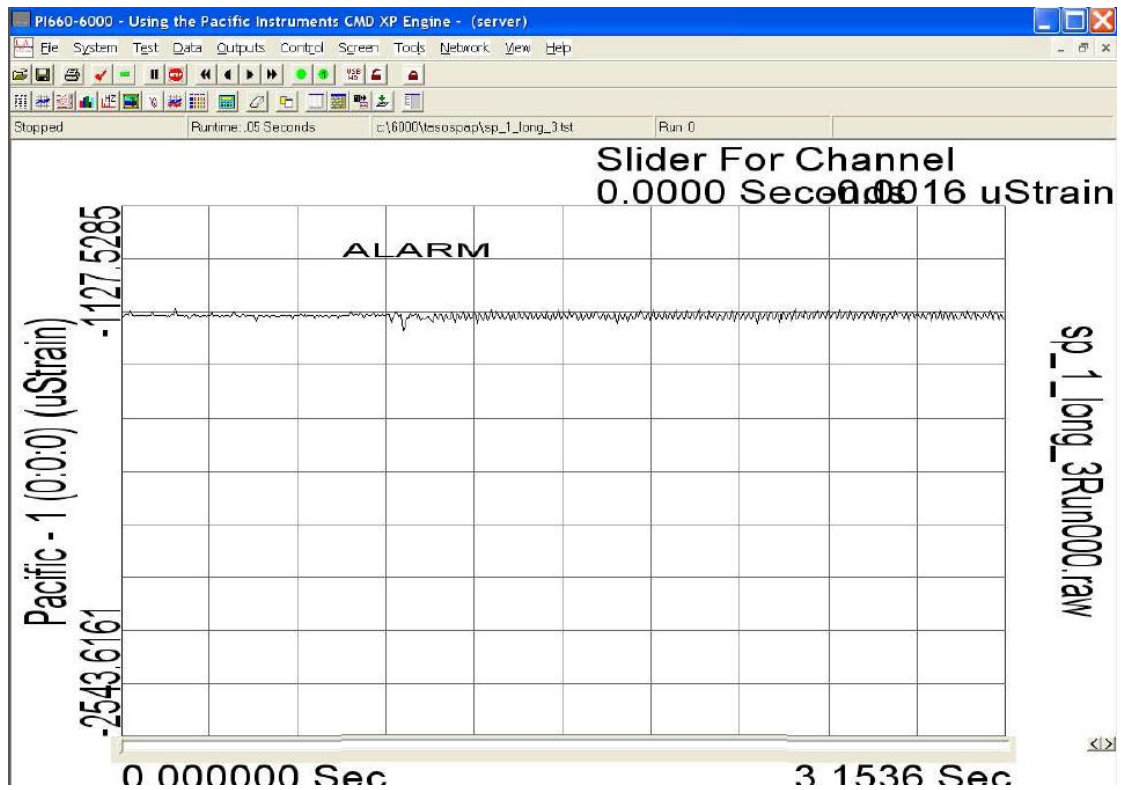


6.7α Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP

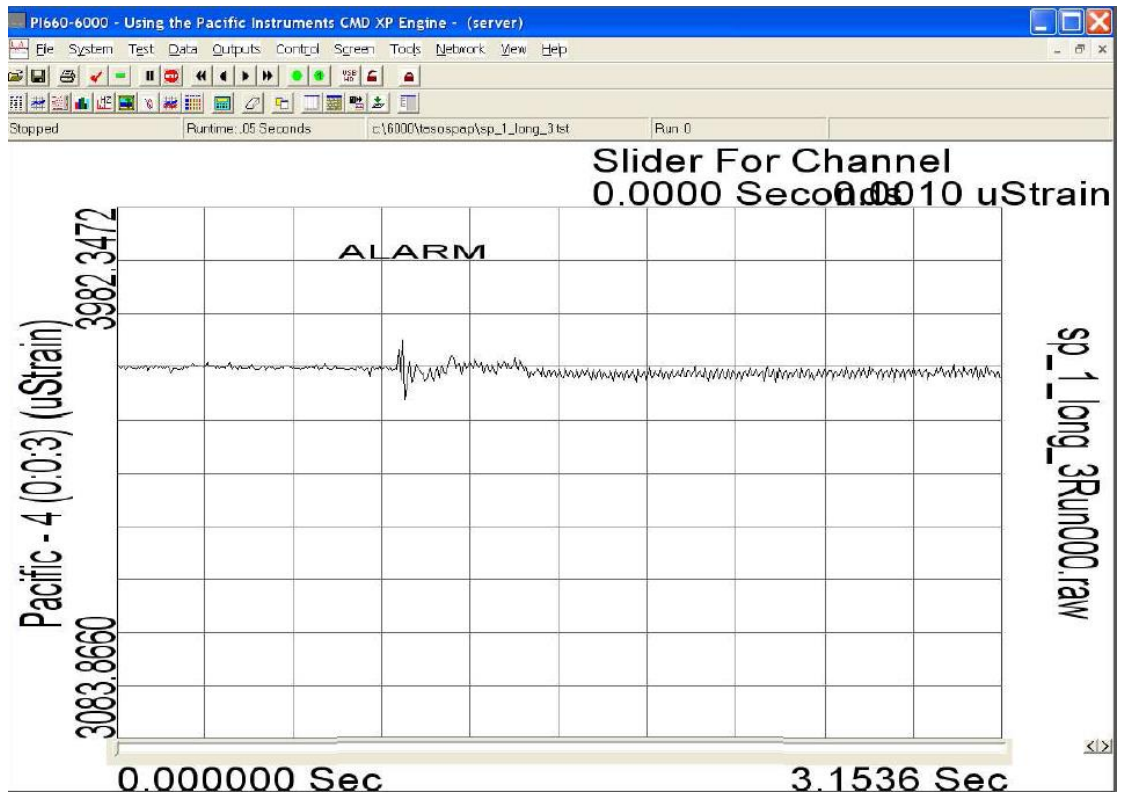


6.7β Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP

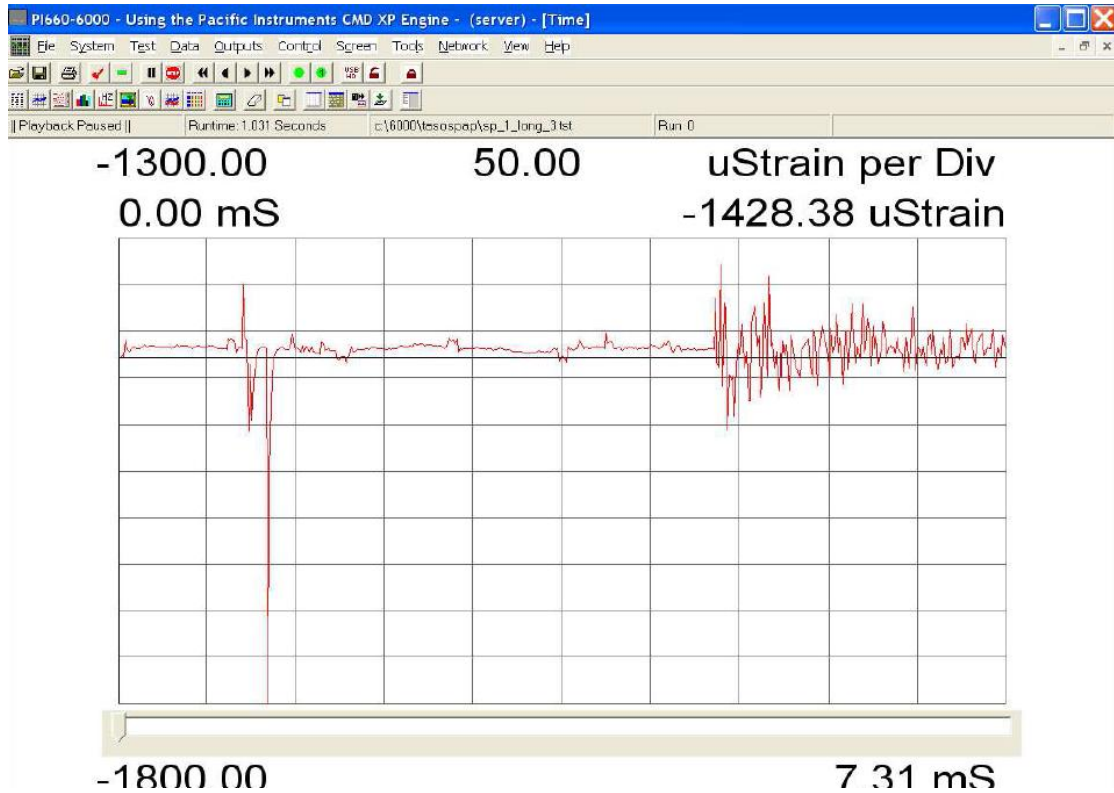




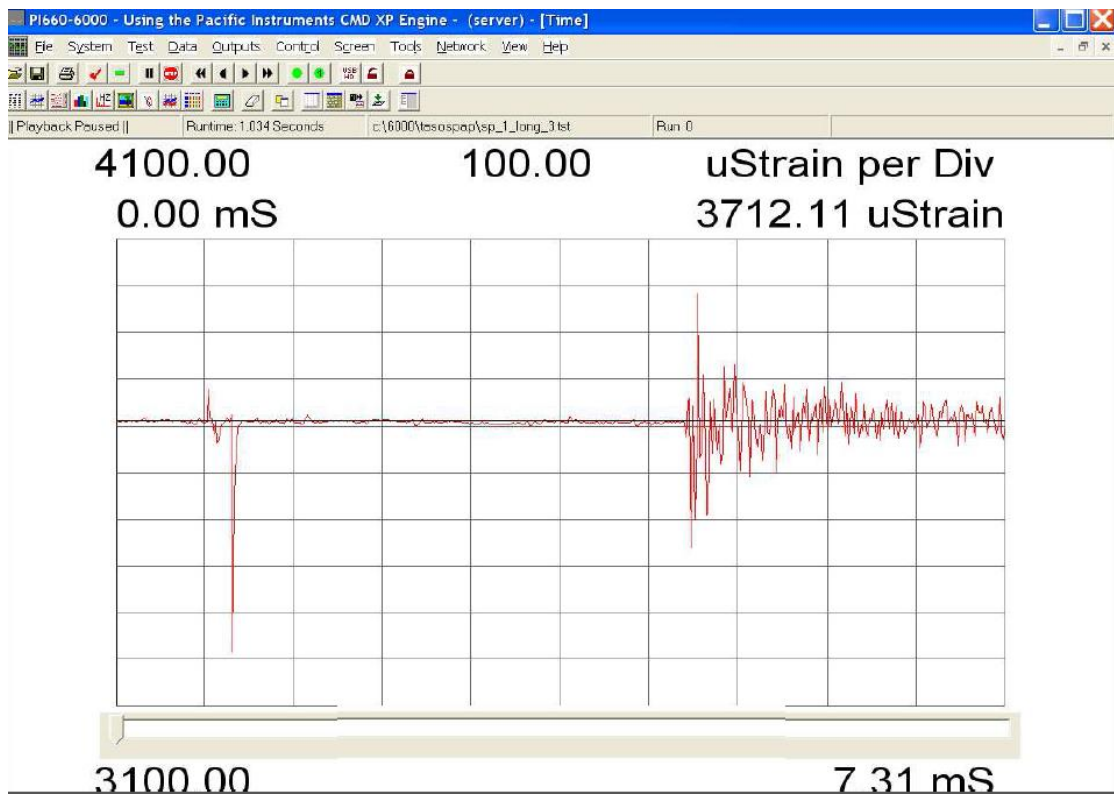
6.9α Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



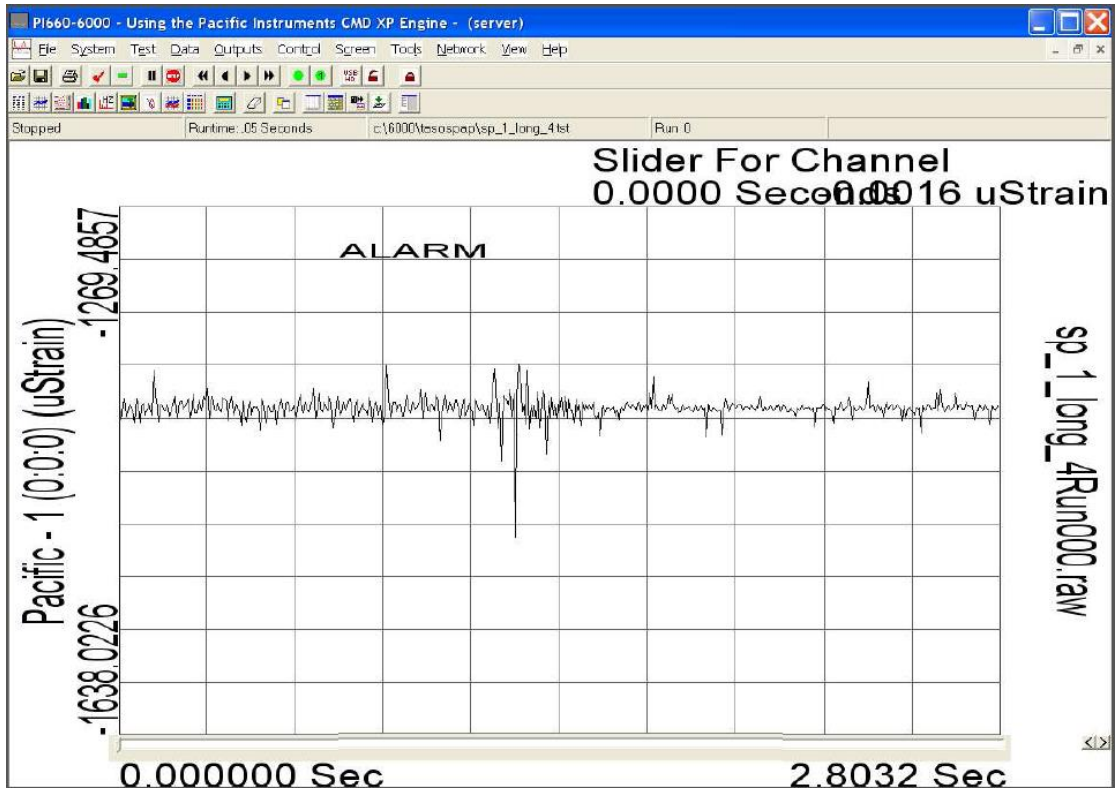
6.9β Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



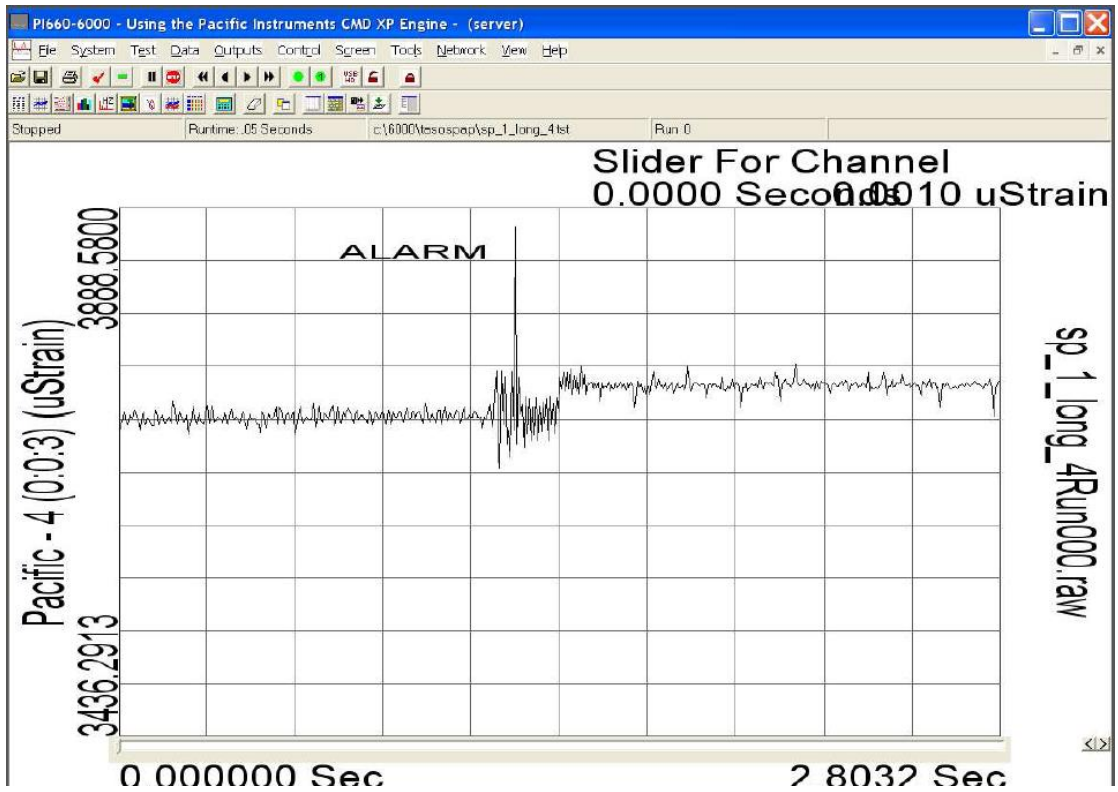
6.10α Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



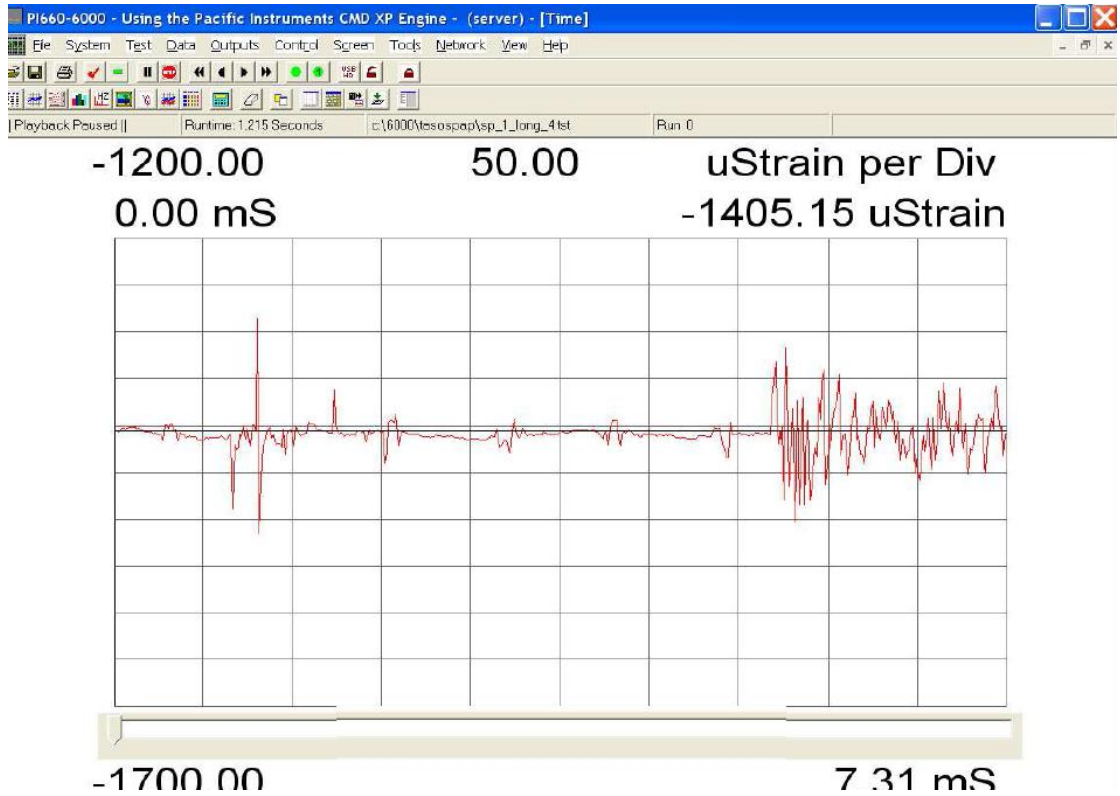
6.10β Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc



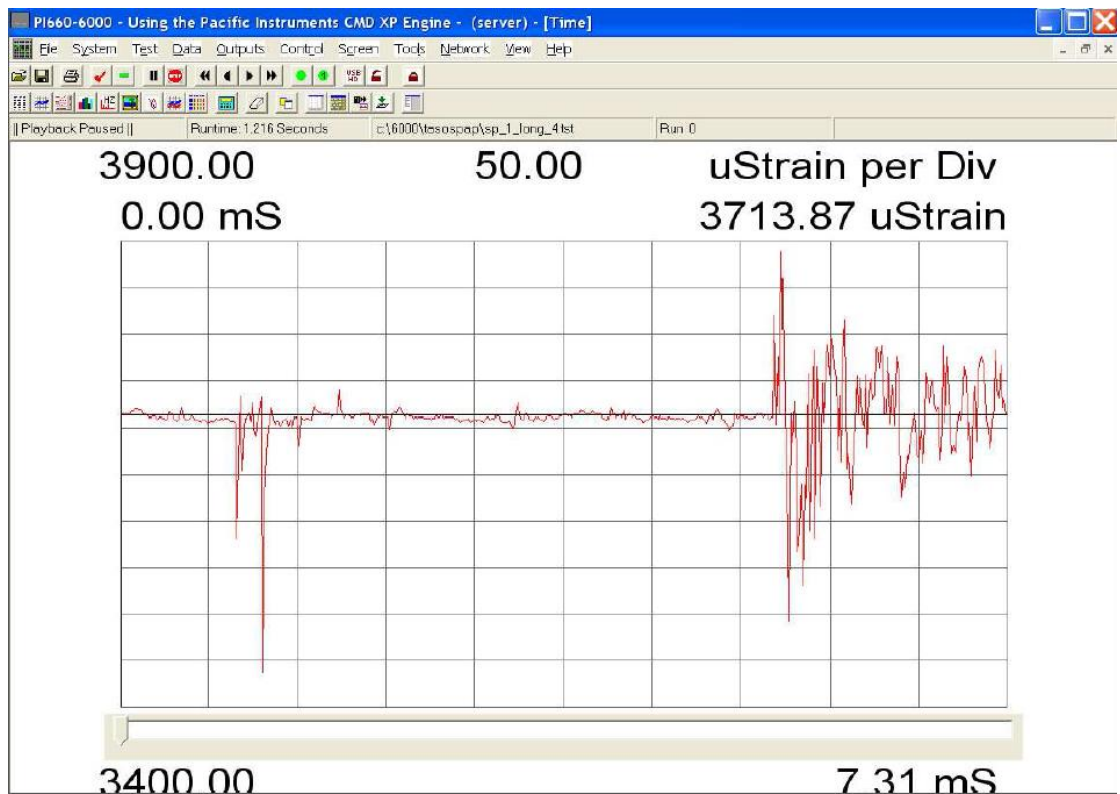
6.11α Δοκίμιο 1 - Διαμήκες χτύπημα 4 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



6.11β Δοκίμιο 1 - Διαμήκες χτύπημα 4 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



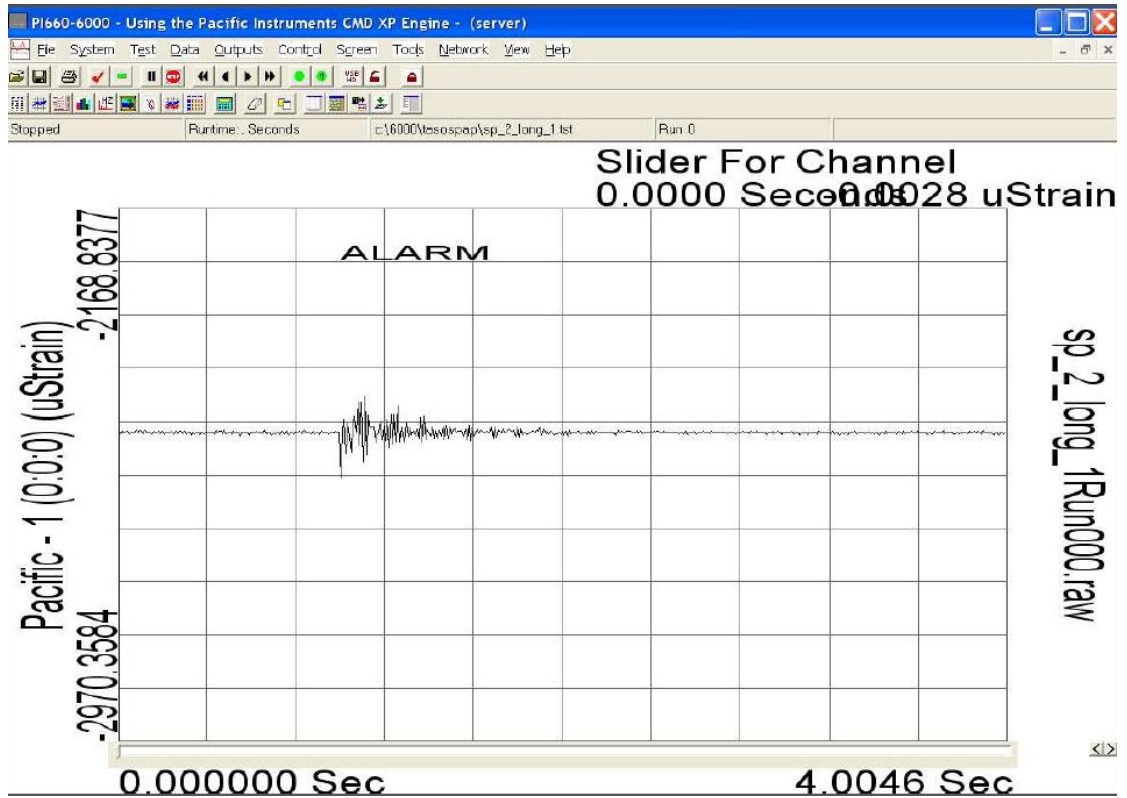
6.12α Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 4 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



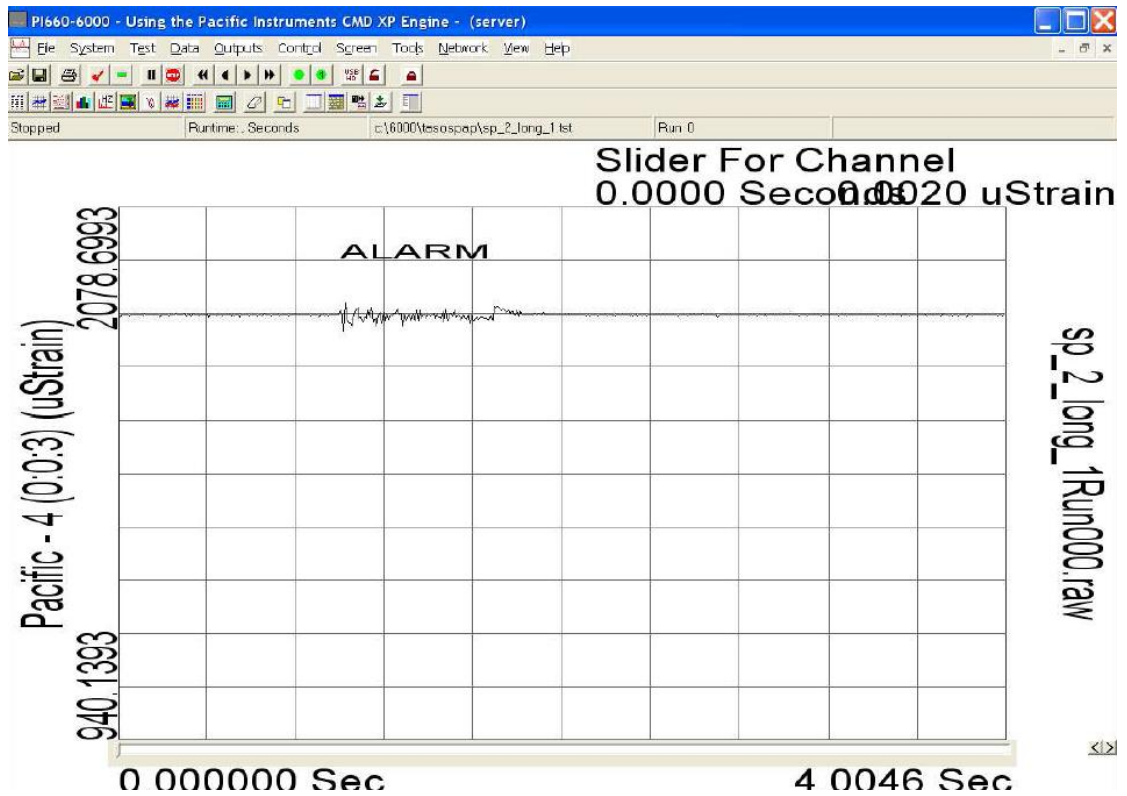
6.12β Δοκίμιο 1 - Διαμήκης χτύπημα 4 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc

Στα σχήματα 6.13 - 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου 2 όσον αφορά το διαμήκες χτύπημα (δύο χτυπήματα) και τους διαμήκεις μετρητές. Μπορούμε να κάνουμε αντίστοιχες παρατηρήσεις με το προηγούμενο.

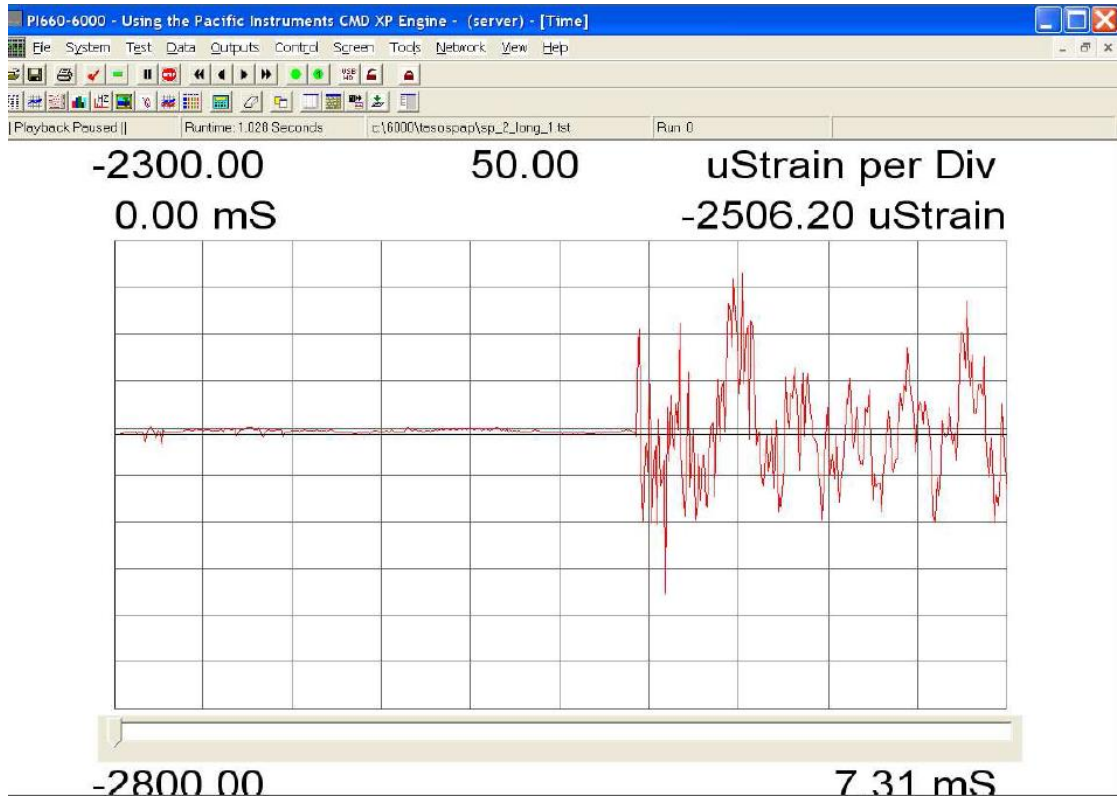
Στα σχήματα 6.17 - 6.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου 3 όσον αφορά το διαμήκες χτύπημα (τρία χτυπήματα) και τους διαμήκεις μετρητές. Αντίστοιχες των προηγούμενων παρατηρήσεων μπορούν να γίνουν και εδώ με τη διαφορά ότι δεν παρουσιάζονται τα φαινόμενα αυτά τόσο έντονα. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκόλληση στο δοκίμιο αυτό έγινε με ορθότερο τρόπο όσον αφορά τη διαδικασία της και άρα το κύμα δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλες διαφοροποιήσεις πριν και μετά τη συγκόλληση. Το γεγονός ότι το δοκίμιο αυτό ψύχθηκε αμέσως μετά με νερό, που δεν είναι επιτρεπτό, αφορά πρωτίστως την αντοχή του.



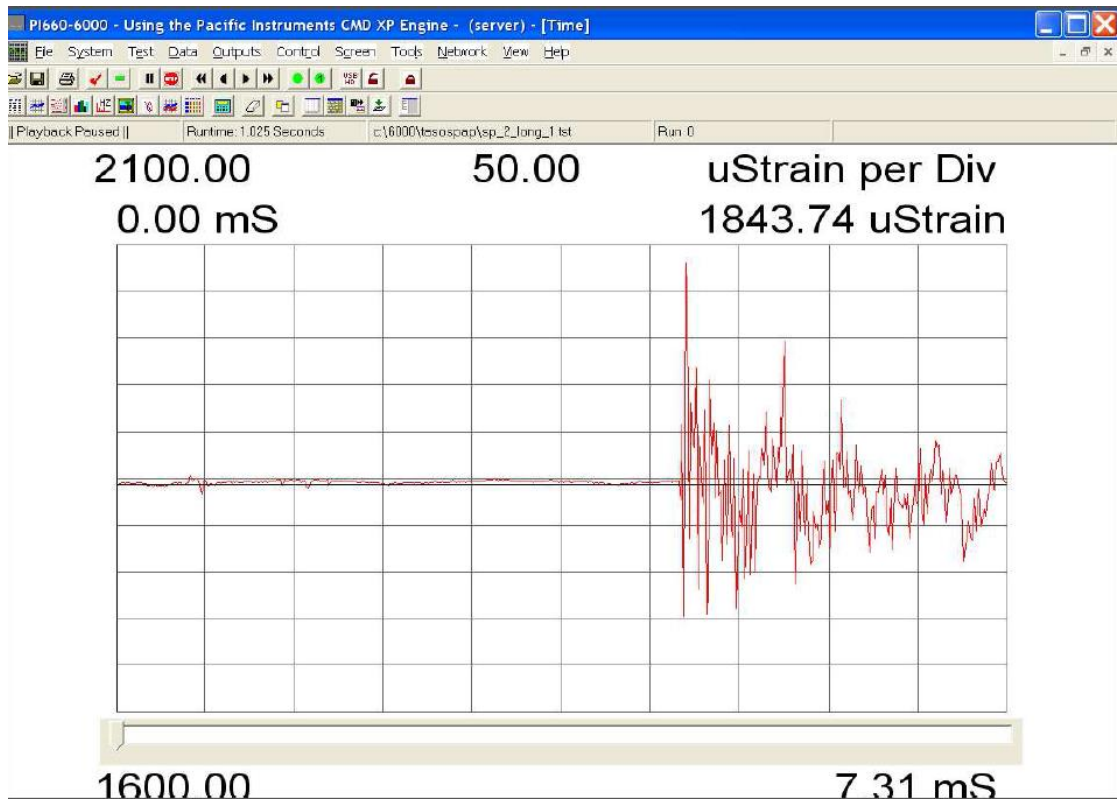
6.13α Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



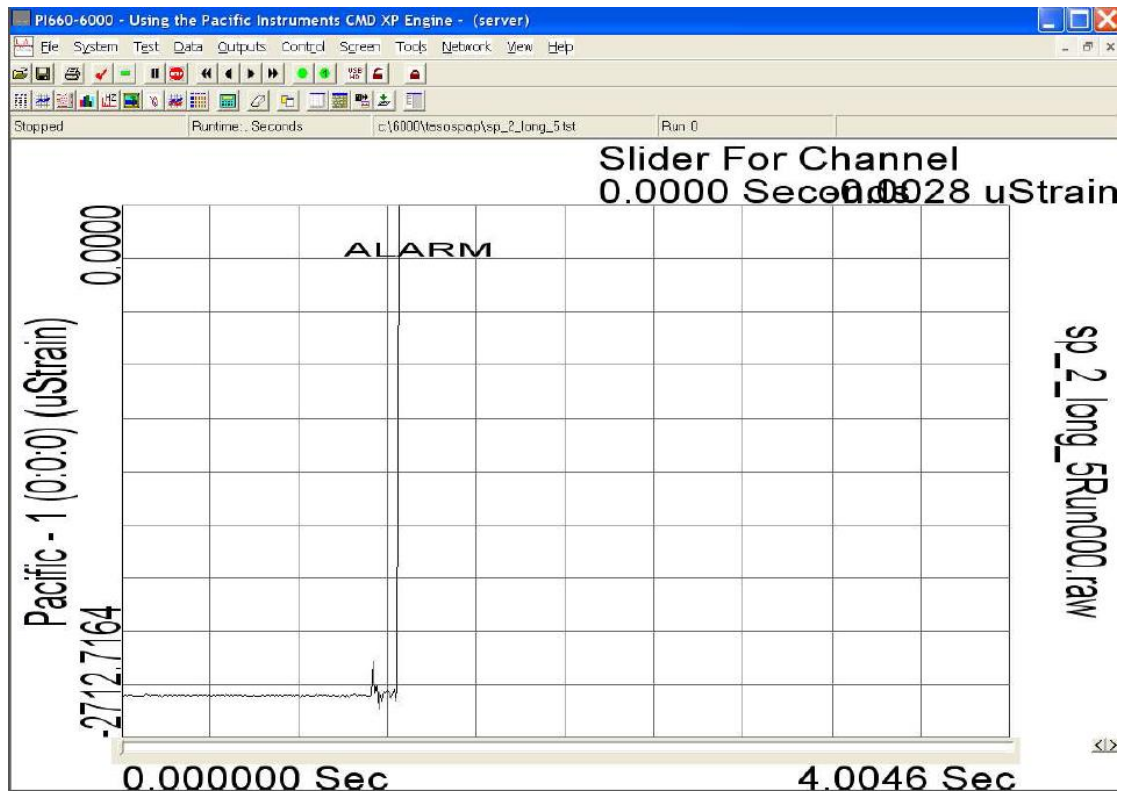
6.13β Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



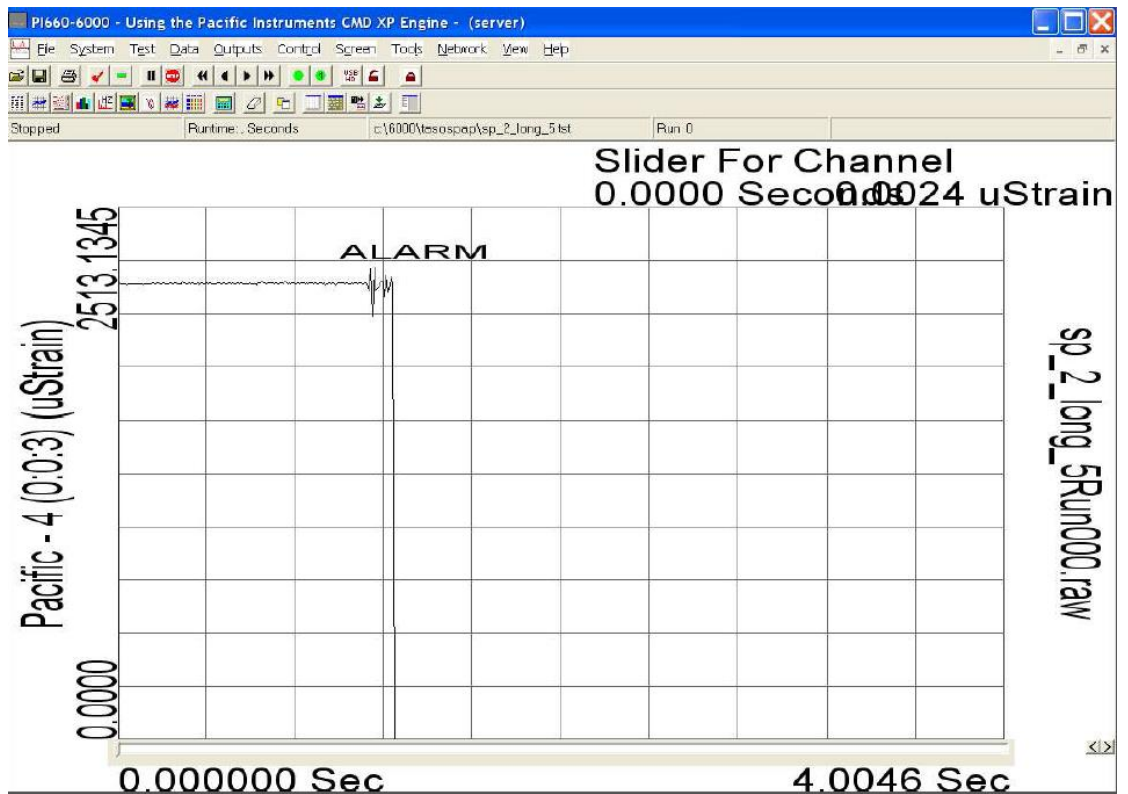
6.14α Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



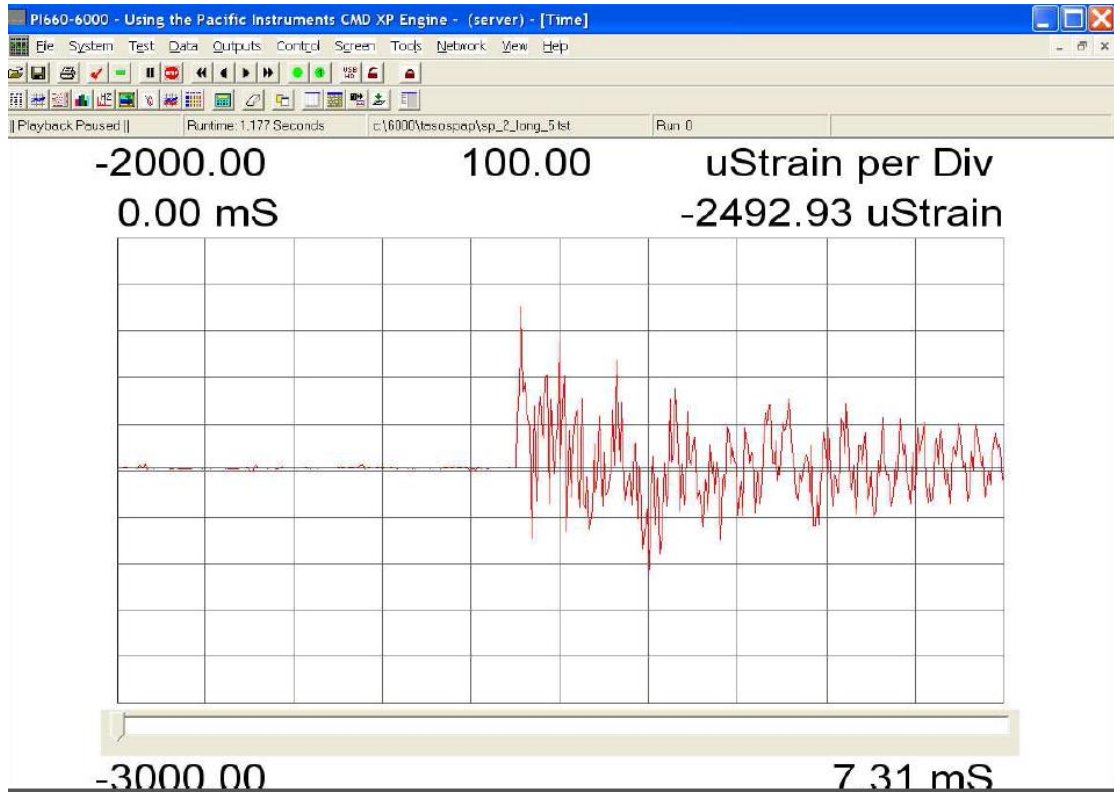
6.14β Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc



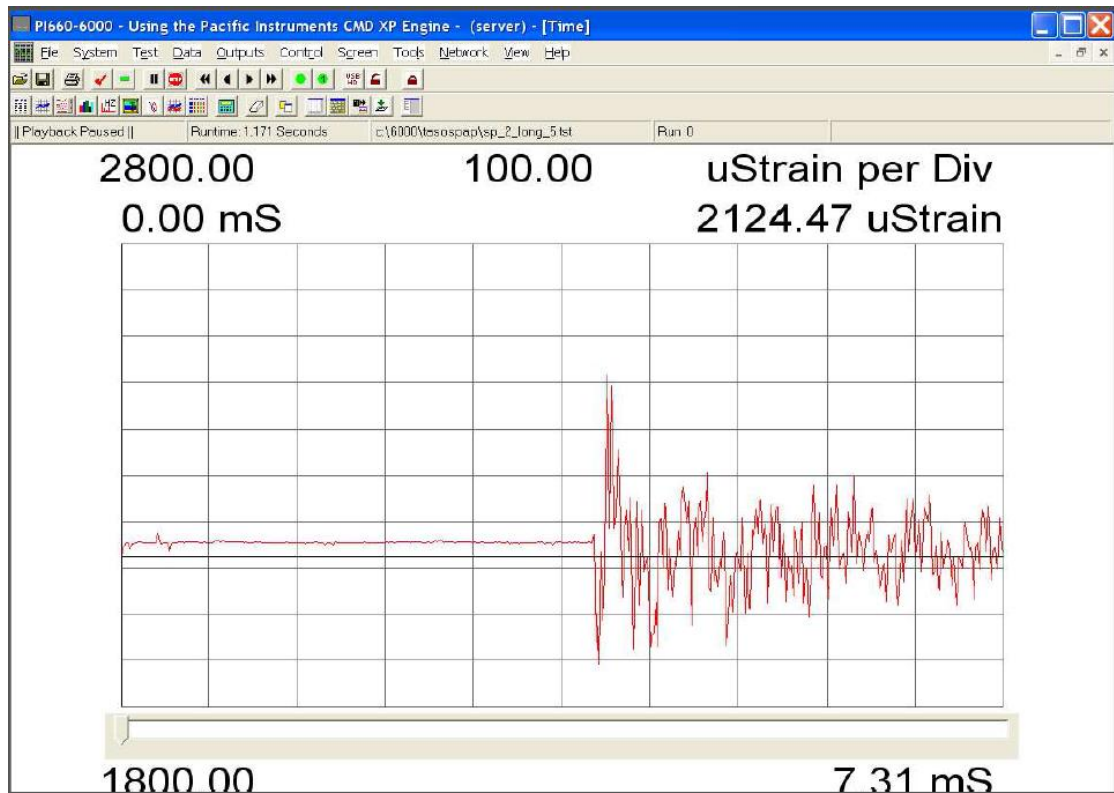
6.15α Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



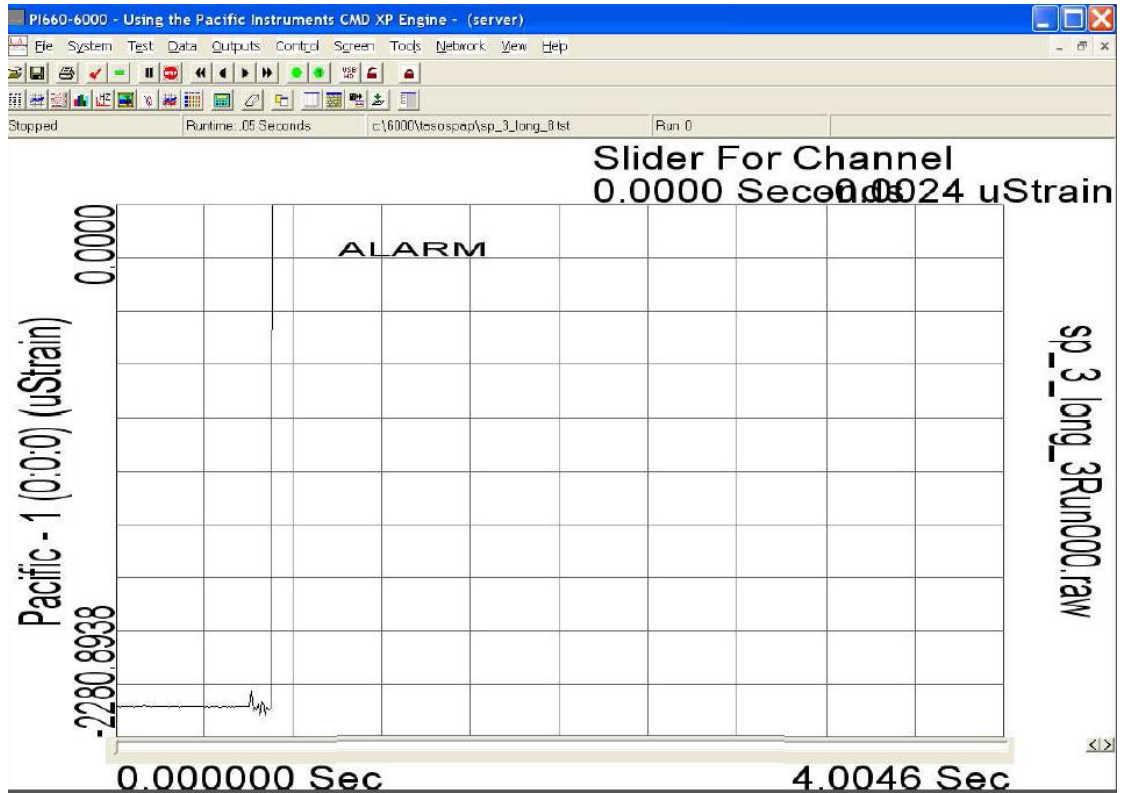
6.15β Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



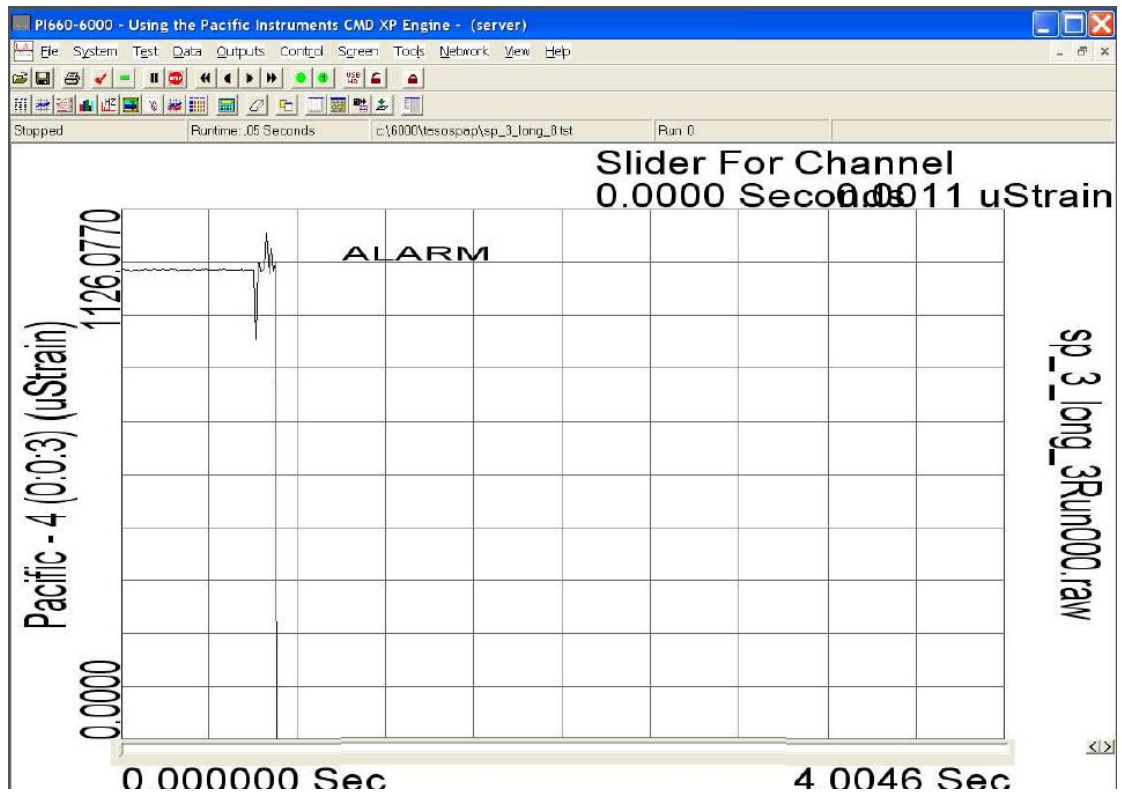
6.16α Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



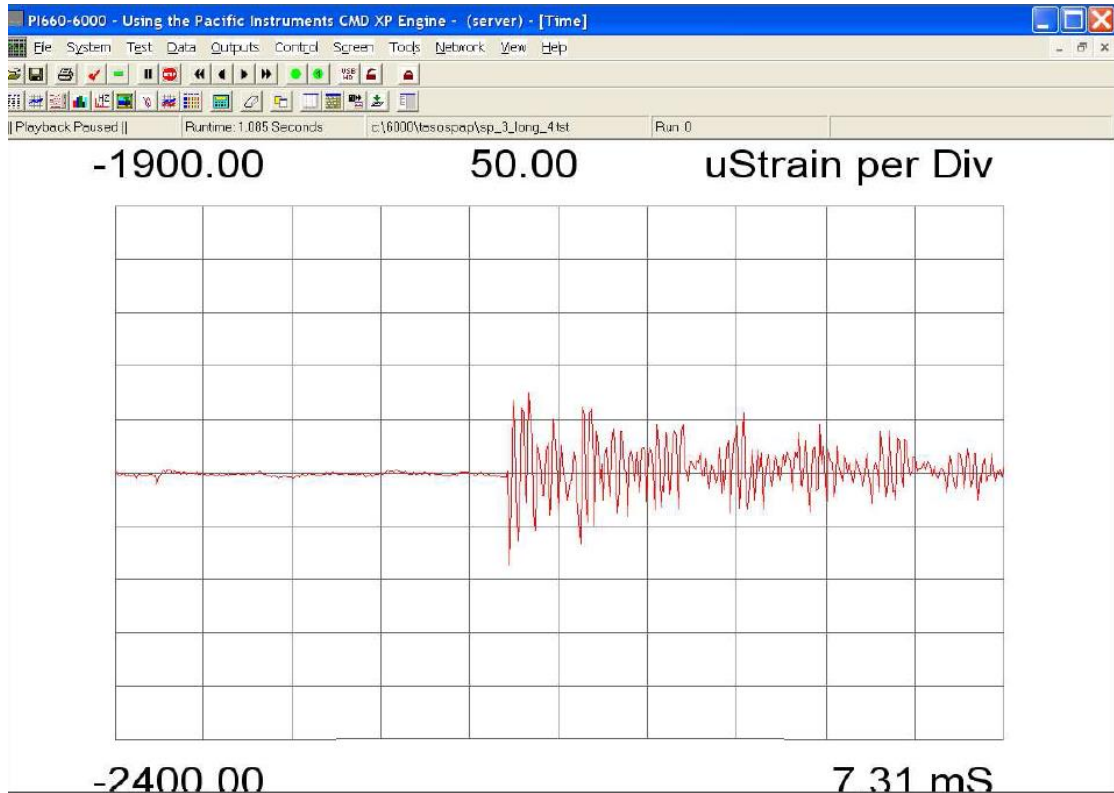
6.16β Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc



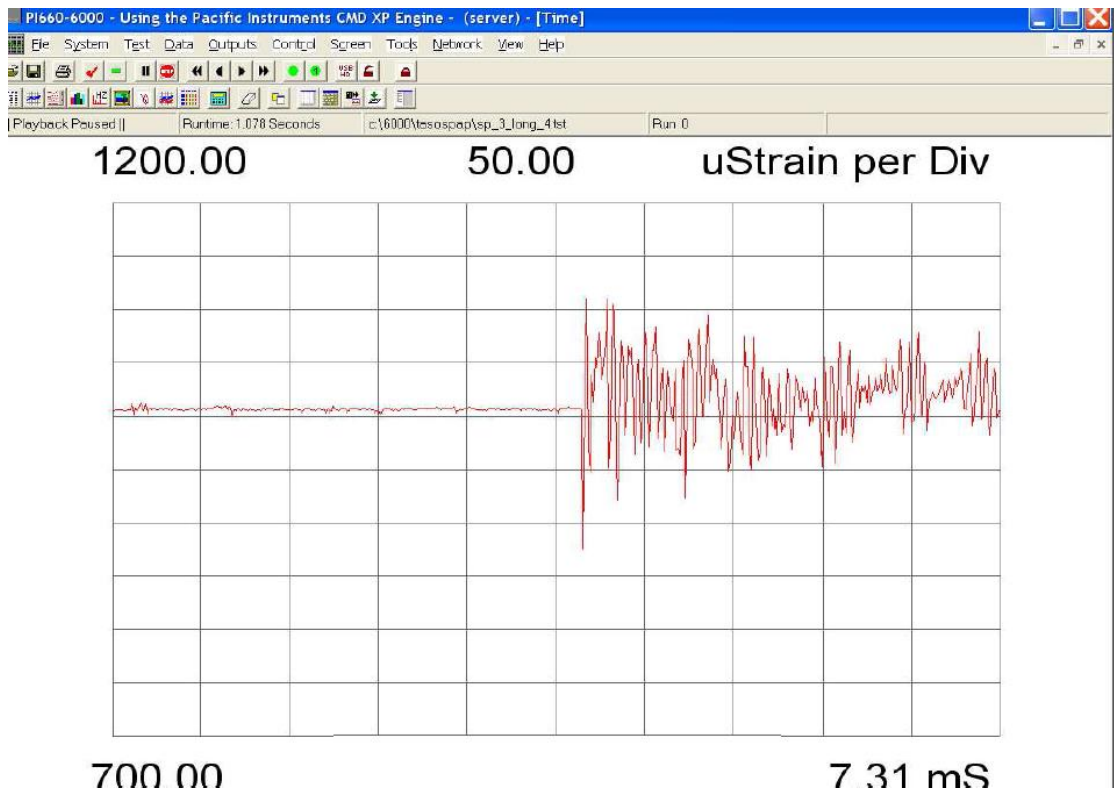
6.17α Δοκίμιο 3 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



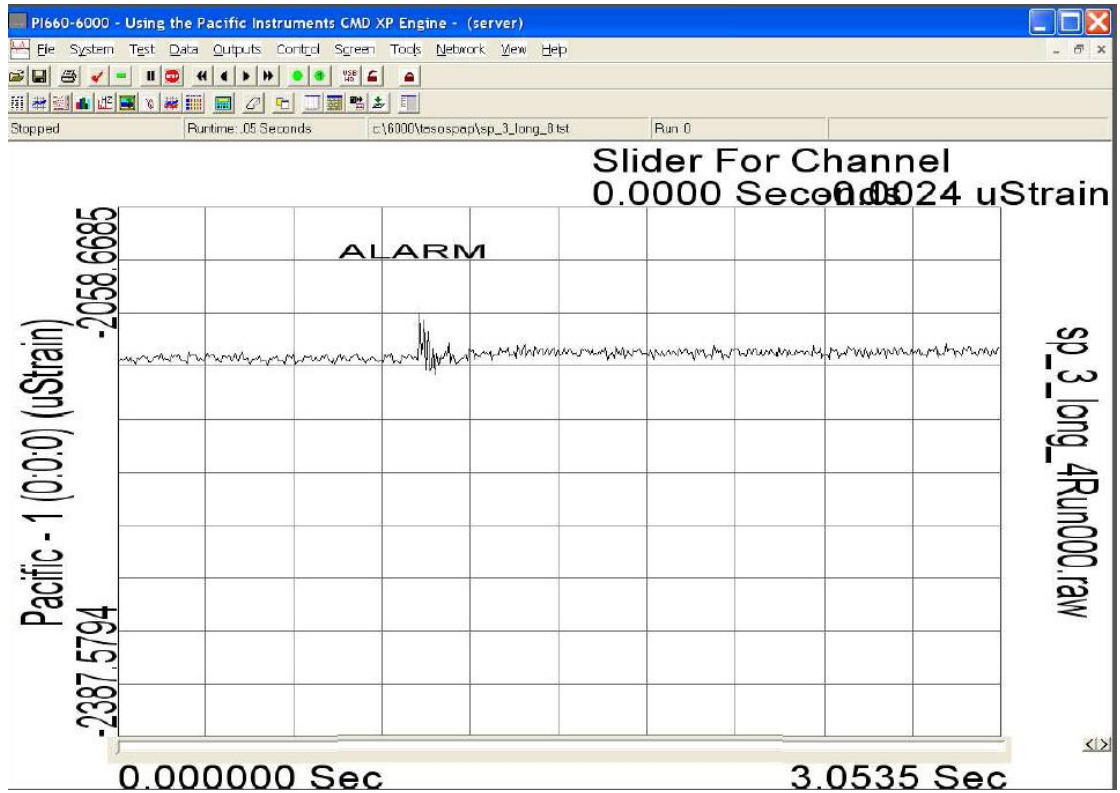
6.17β Δοκίμιο 3 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



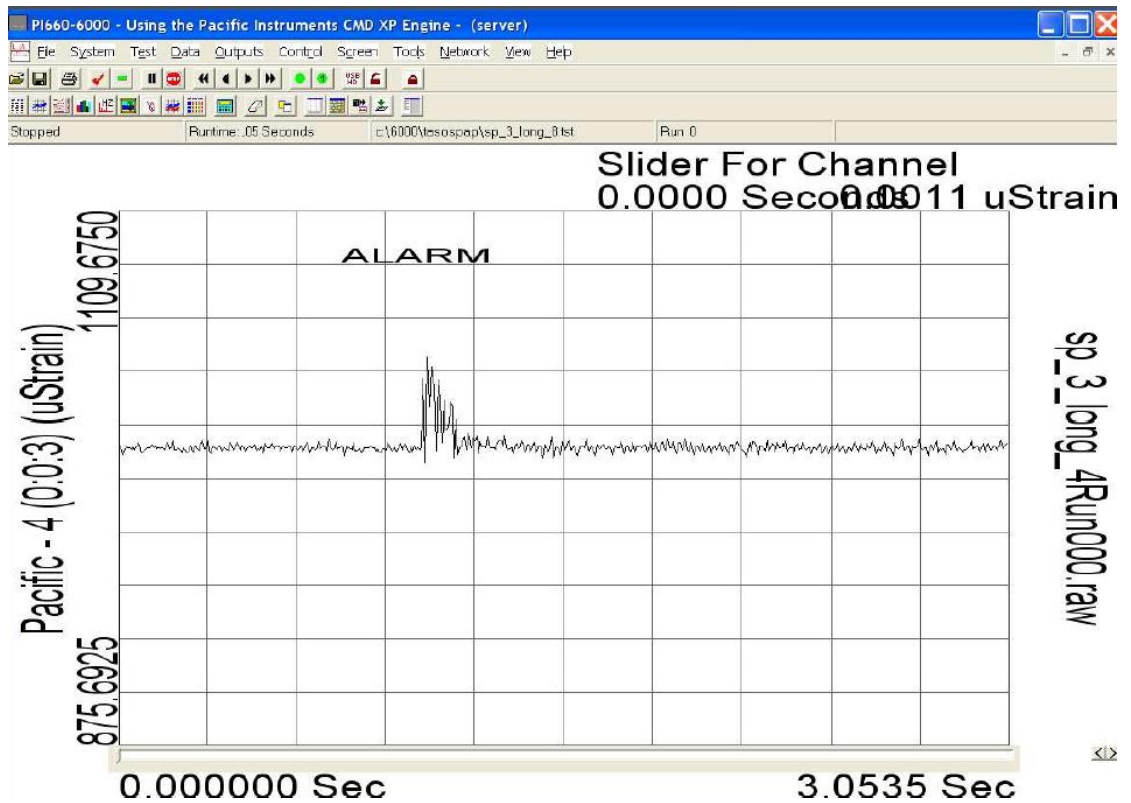
6.18α Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



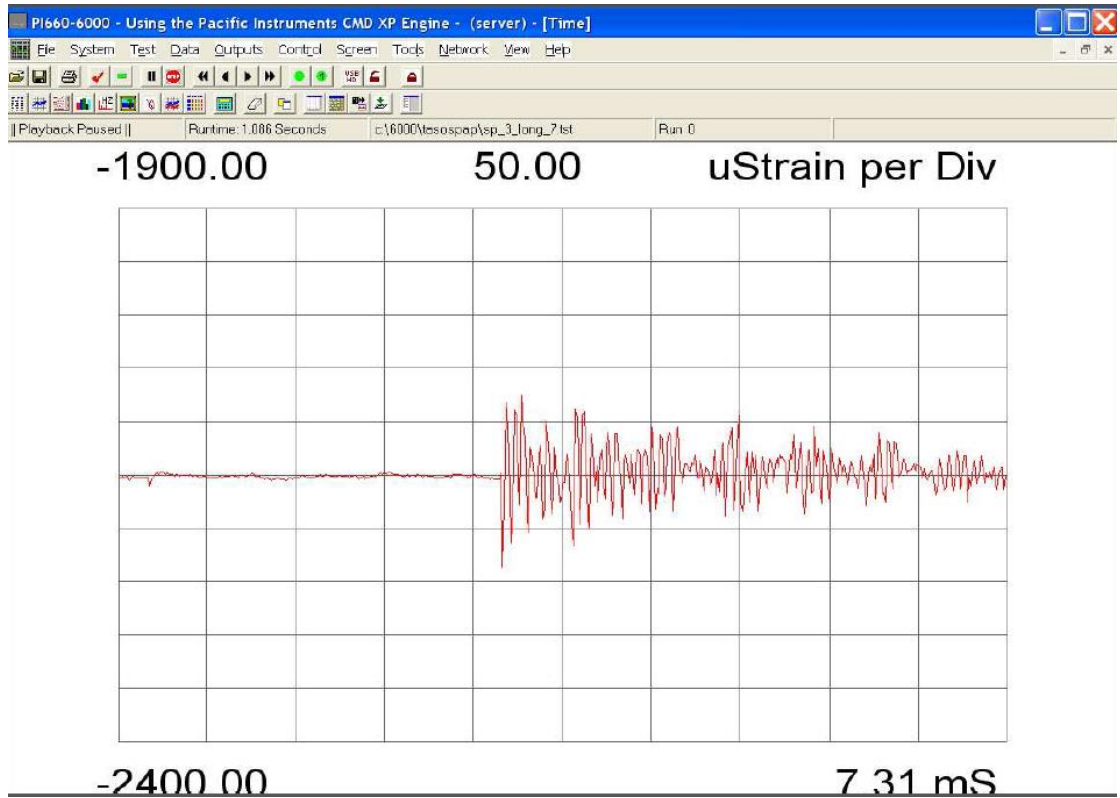
6.18β Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc



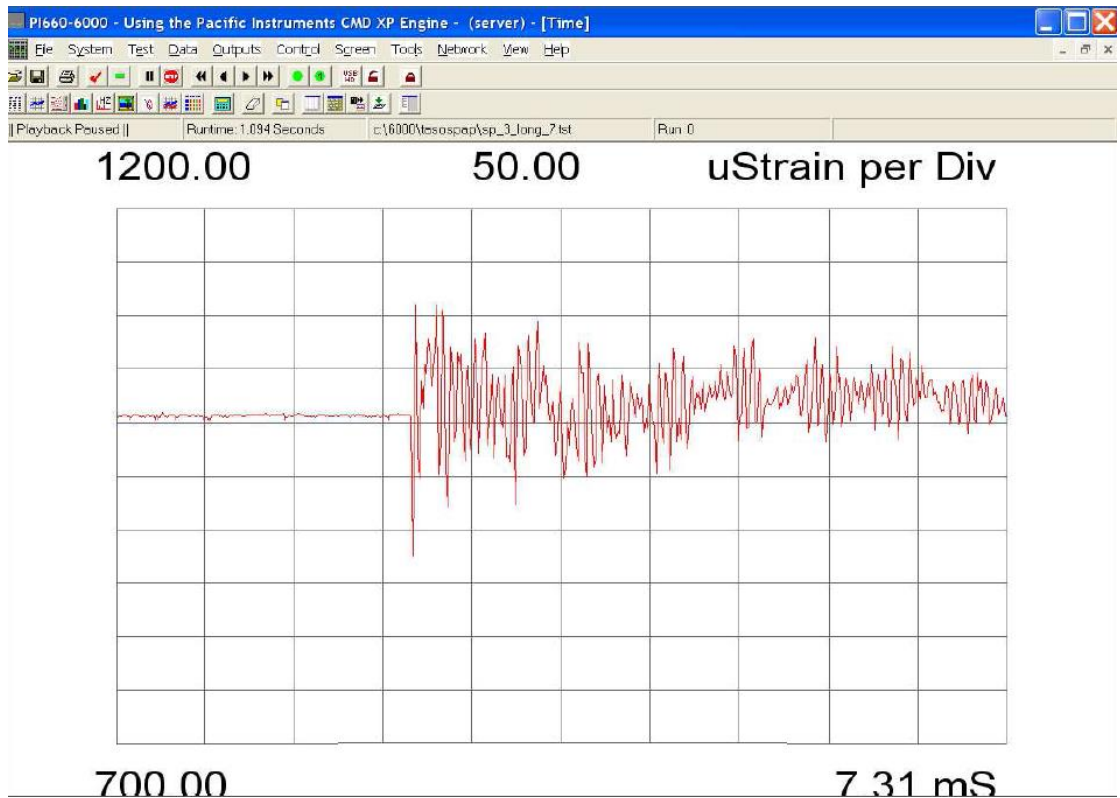
6.19α Δοκίμιο 3 - Διαμήκες χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



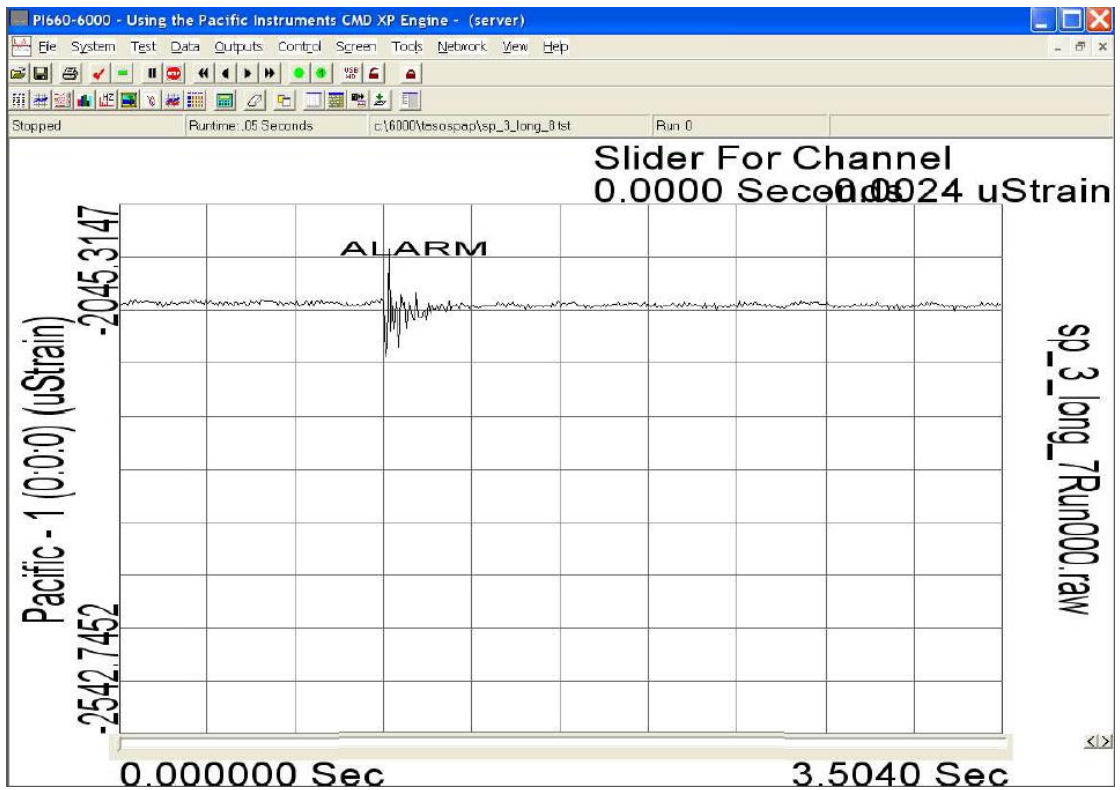
6.19β Δοκίμιο 3 - Διαμήκες χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



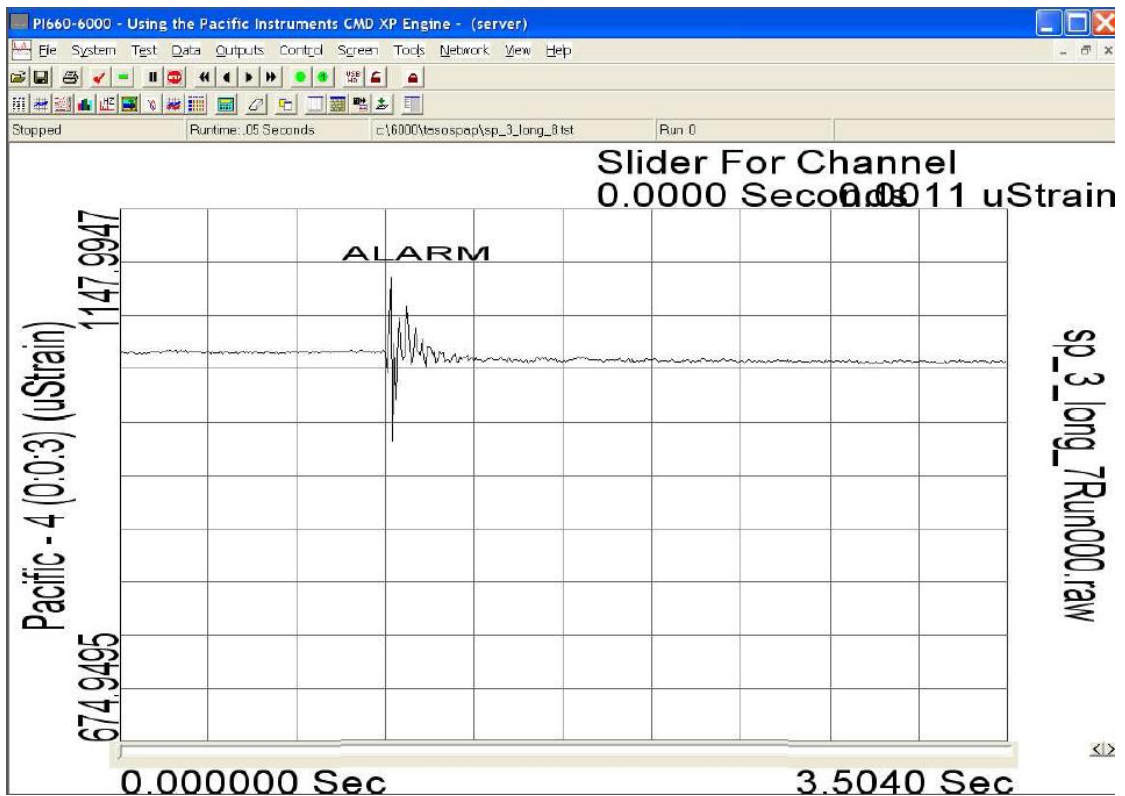
6.20α Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



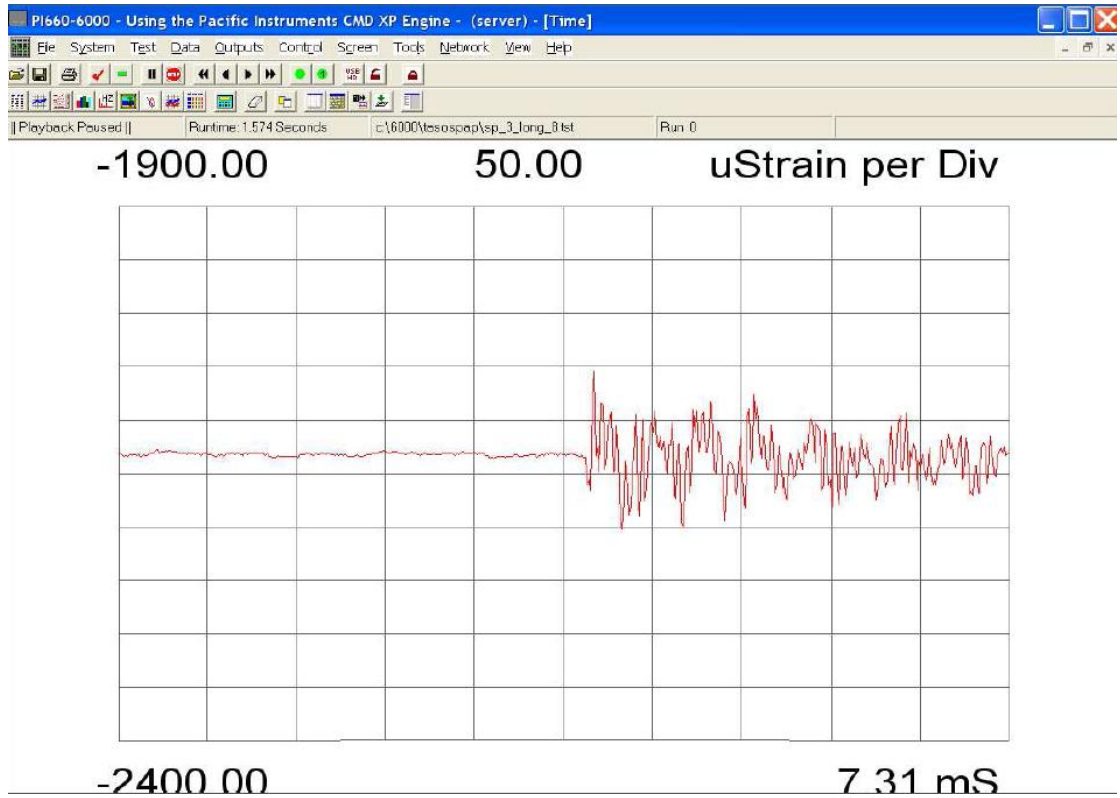
6.20β Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 2 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc



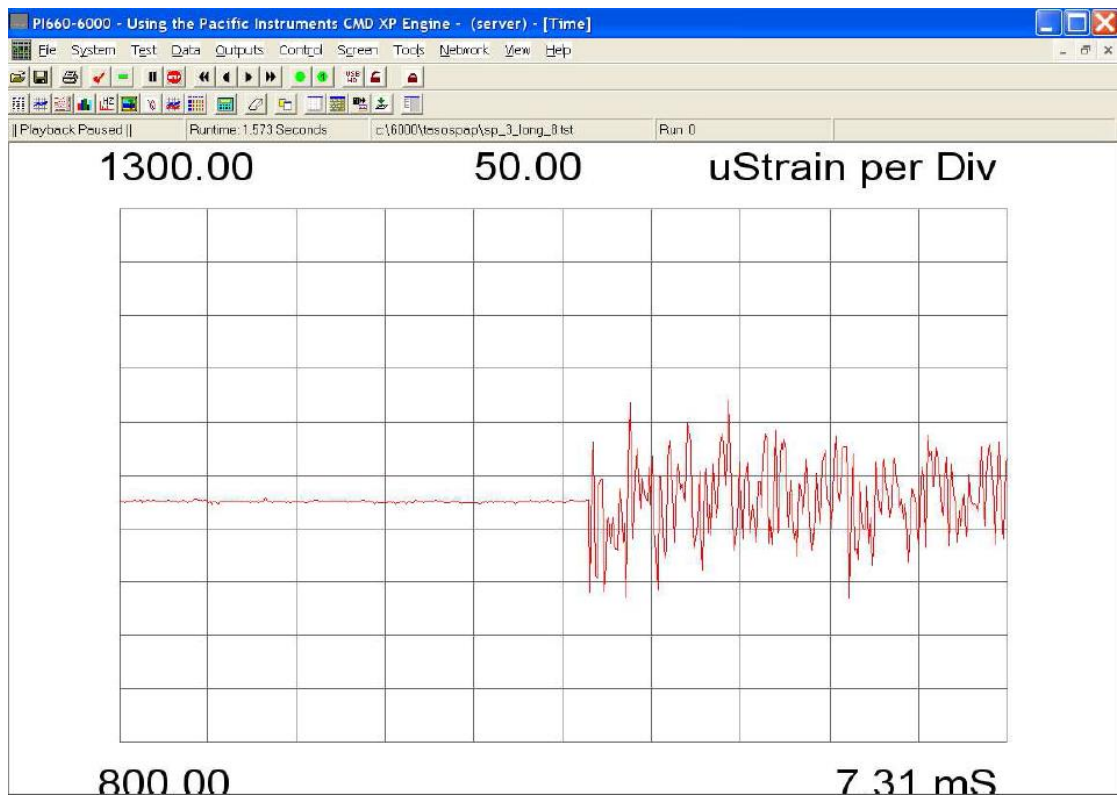
6.21α Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



6.21β Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP



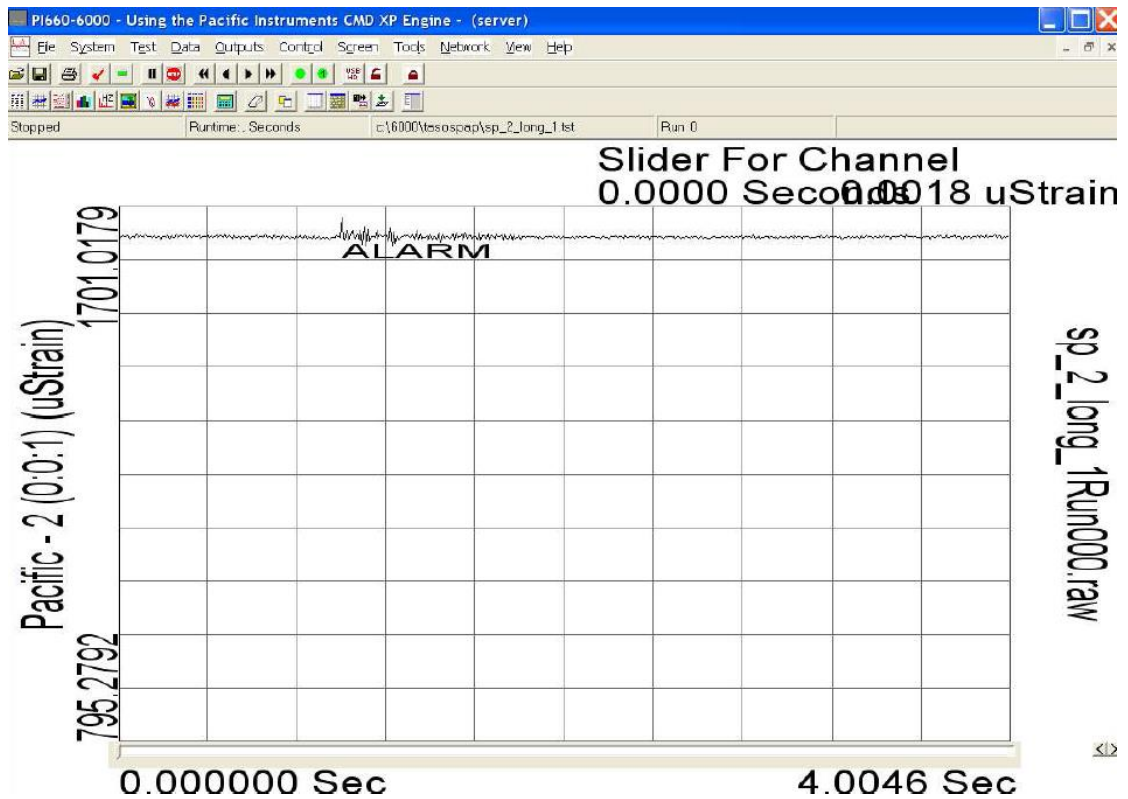
6.22α Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - Osc



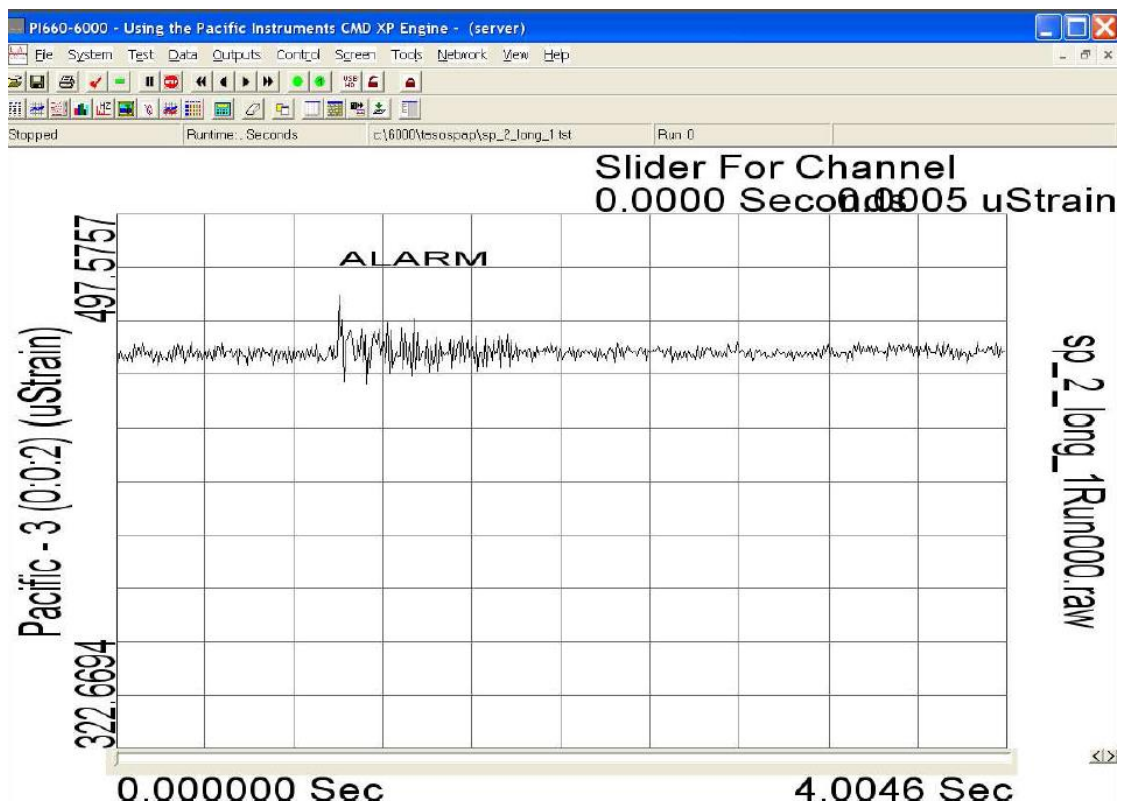
6.22β Δοκίμιο 3 - Διαμήκης χτύπημα 3 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - Osc

Όσον αφορά το διαμήκες χτύπημα και την απόκρισή του στους εγκάρσιους μετρητές δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή του πλάτους του παλμού πριν και μετά τη συγκόλληση σε κανένα από τα 3 δοκίμια.

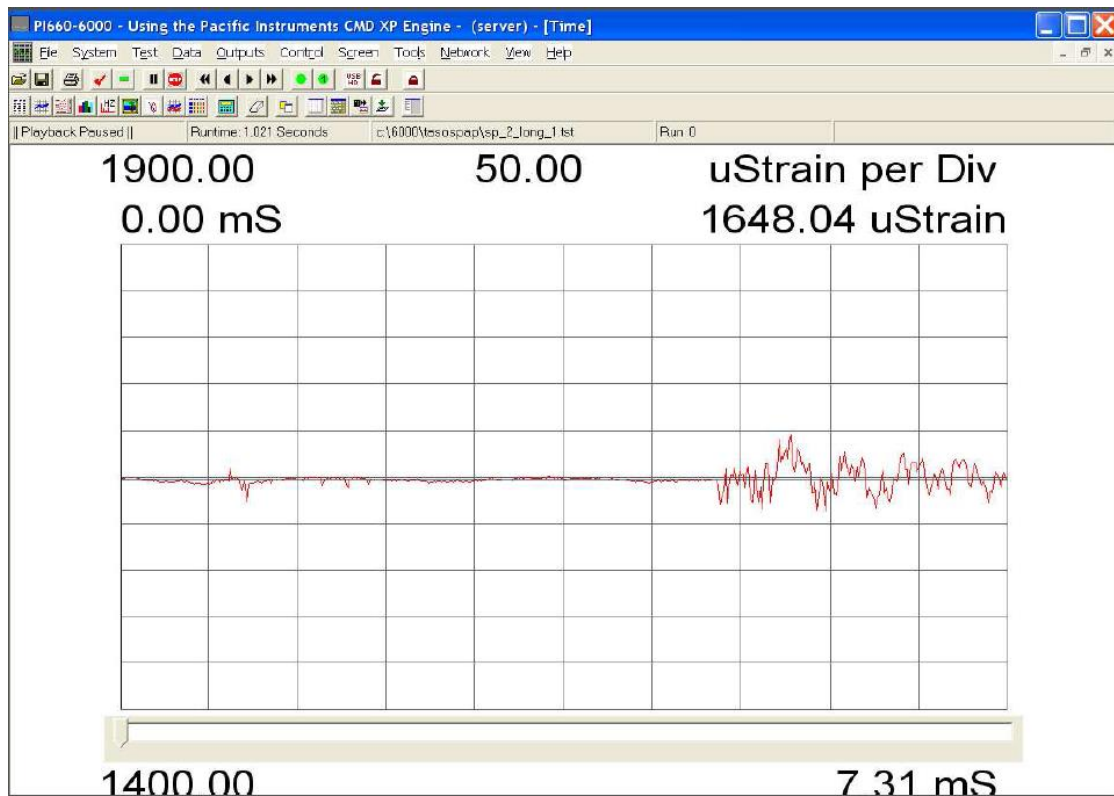
Στα σχήματα 6.23 - 6.24 παρουσιάζονται ενδεικτικά για το δοκίμιο 2 τα αποτελέσματα που αφορούν το διαμήκες χτύπημα και τους εγκάρσιους μετρητές.



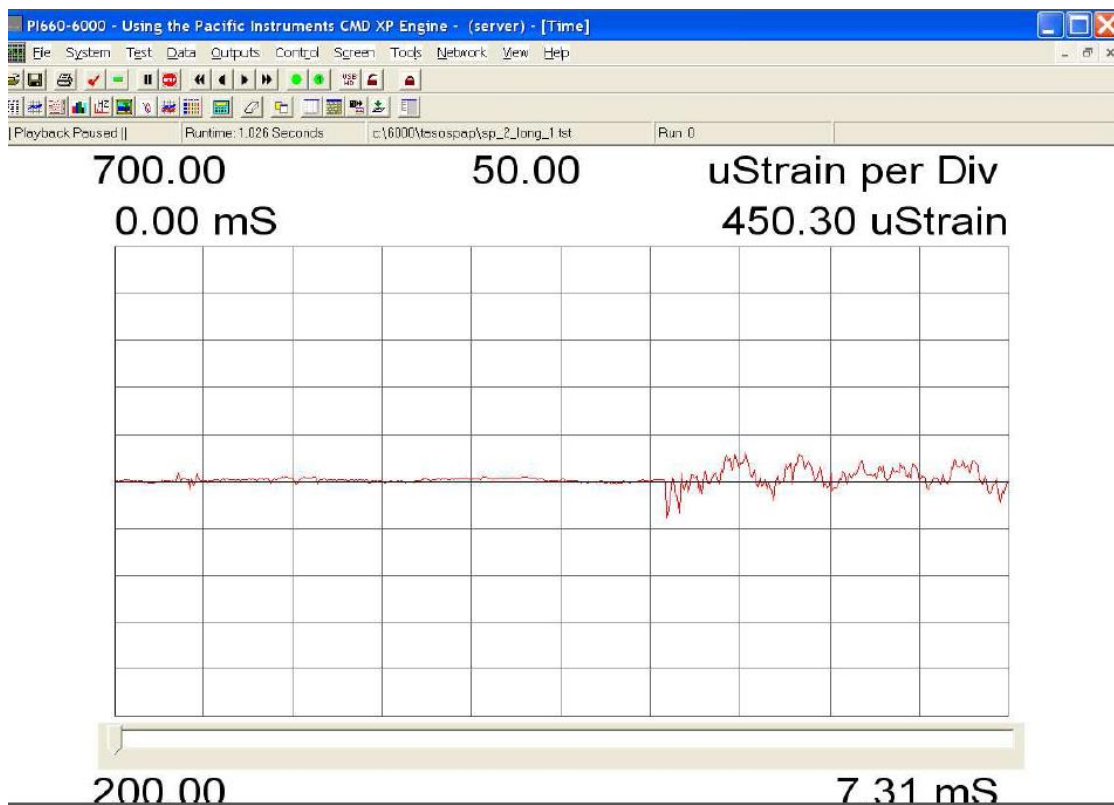
6.23α Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



6.23β Δοκίμιο 2 - Διαμήκες χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά - QP



6.24α Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - Osc



6.24β Δοκίμιο 2 - Διαμήκης χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -Osc

6.2.2 Εγκάρσιο χτύπημα

Στα σχήματα 6.25 - 6.30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου 1 όσον αφορά το εγκάρσιο χτύπημα (3 χτυπήματα) και τους εγκάρσιους μετρητές.

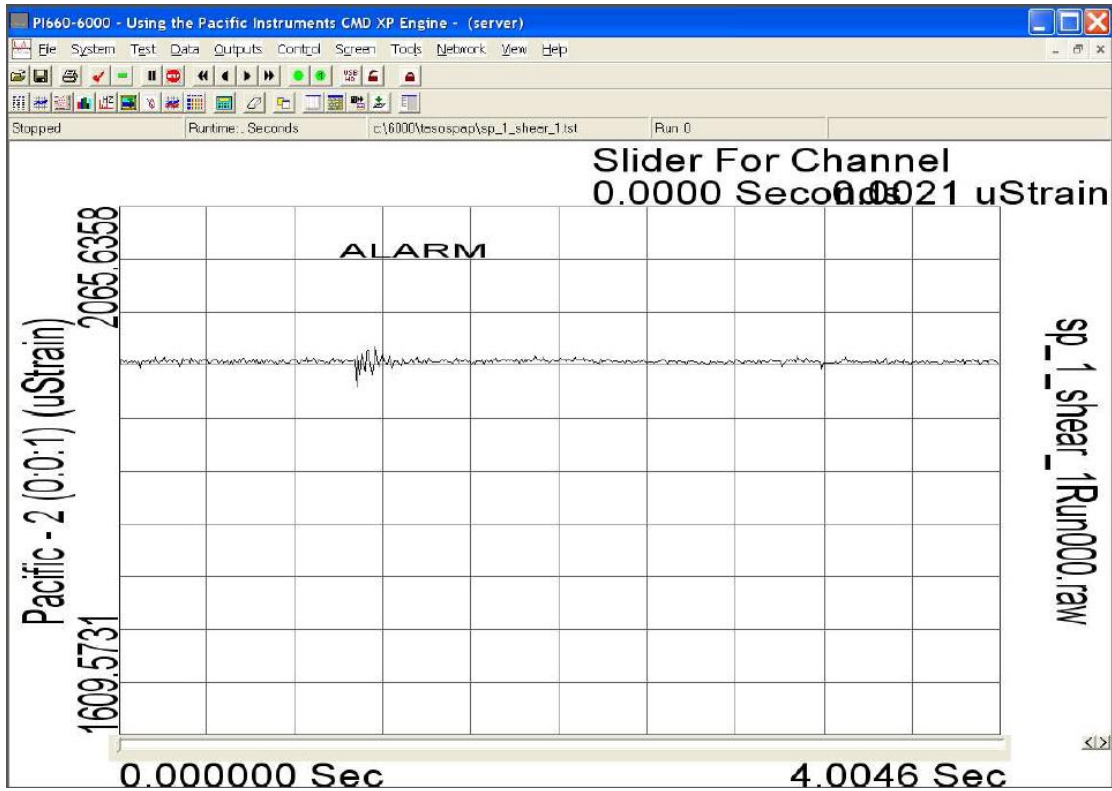
Μπορούμε να κάνουμε την ίδια ακριβώς παρατήρηση όπως στους διαμήκεις μετρητές των διαμήκων χτυπημάτων: μετά τη συγκόλληση ο παλμός γίνεται πιο οξύς, αυξάνει το πλάτος του και στενεύει το εύρος του.

Στα σχήματα 6.31 - 6.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δοκιμίου 2 όσον αφορά το εγκάρσιο χτύπημα (3 χτυπήματα) και τους εγκάρσιους μετρητές.

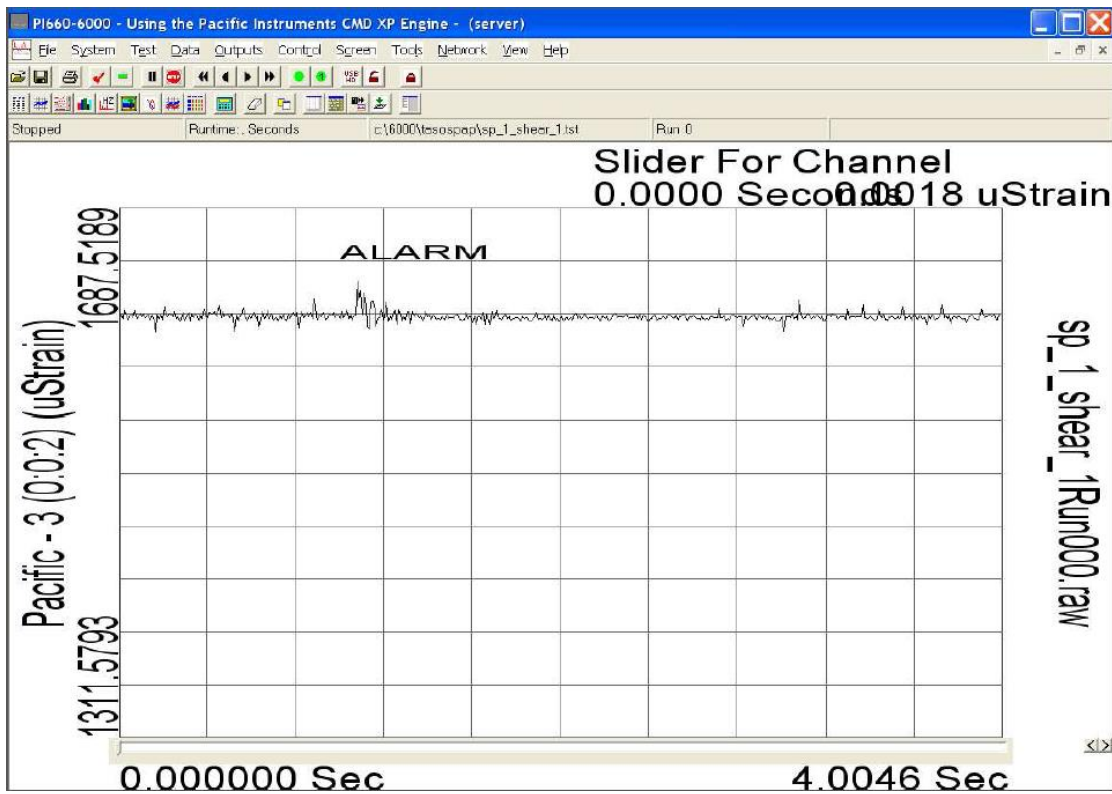
Εδώ δεν παρατηρείται μείωση του πλάτους του παλμού όσον αφορά την παραμόρφωση.

Όσον αφορά το εγκάρσιο χτύπημα και την απόκρισή του στους διαμήκεις μετρητές παρατηρήθηκε αύξηση του πλάτους του παλμού μετά τη συγκόλληση σε όλα τα δοκίμια.

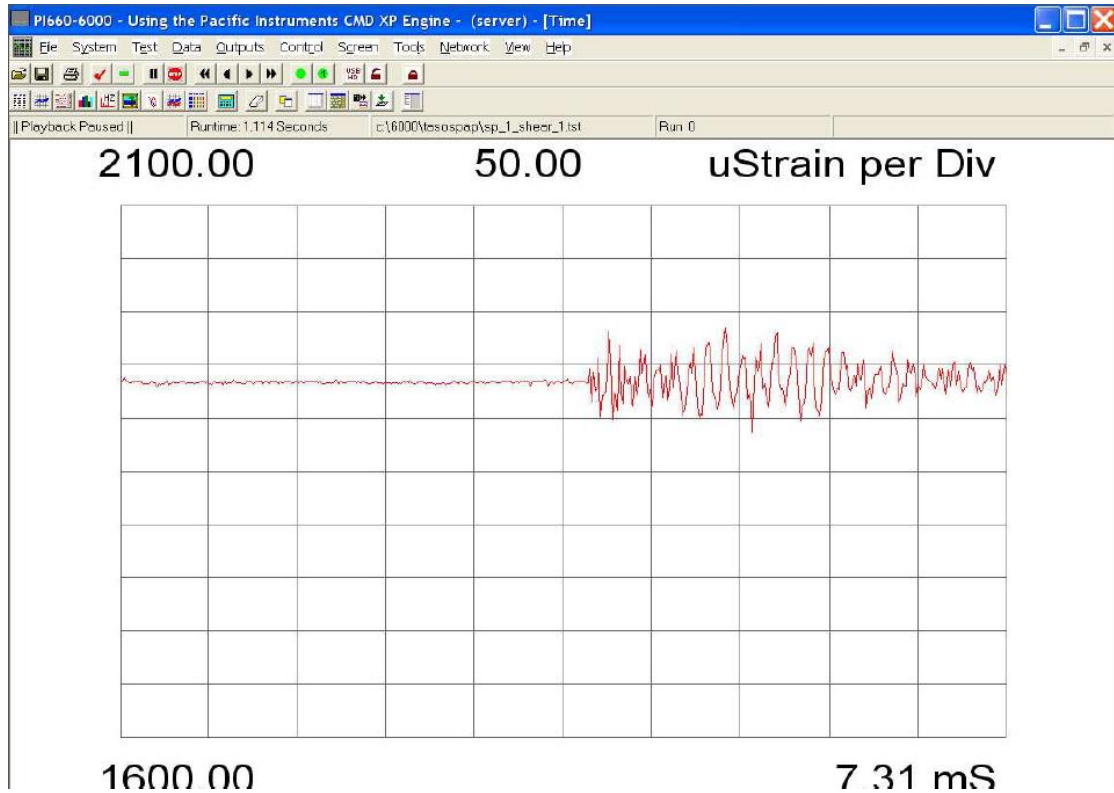
Στα σχήματα 6.37 - 6.38 παρουσιάζονται ενδεικτικά για το δοκίμιο 1 τα αποτελέσματα που αφορούν το εγκάρσιο χτύπημα και τους διαμήκεις μετρητές.



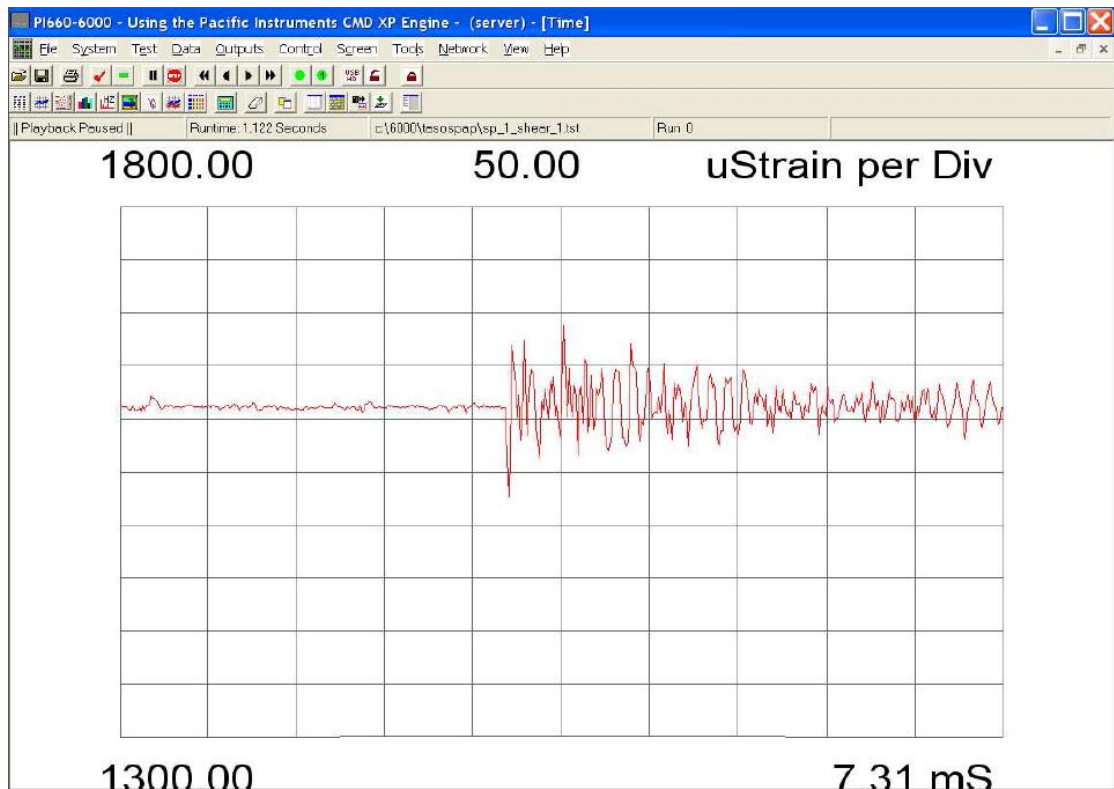
6.25α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



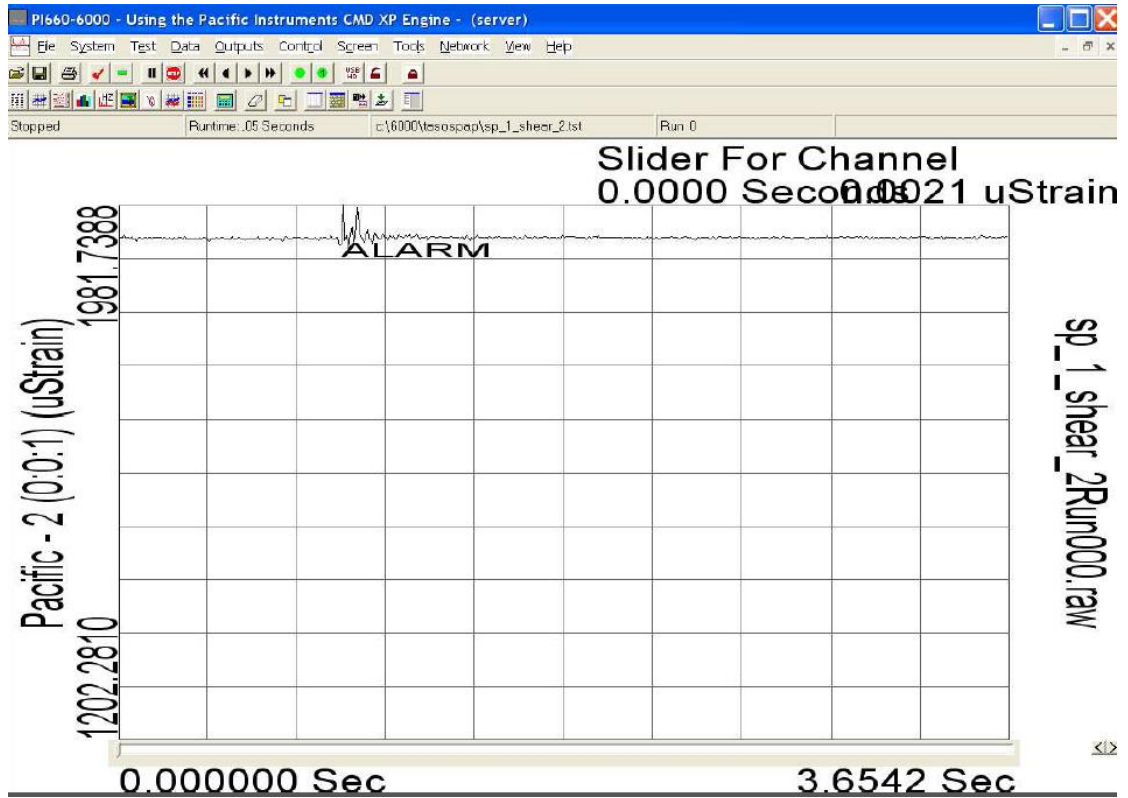
6.25β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -QP



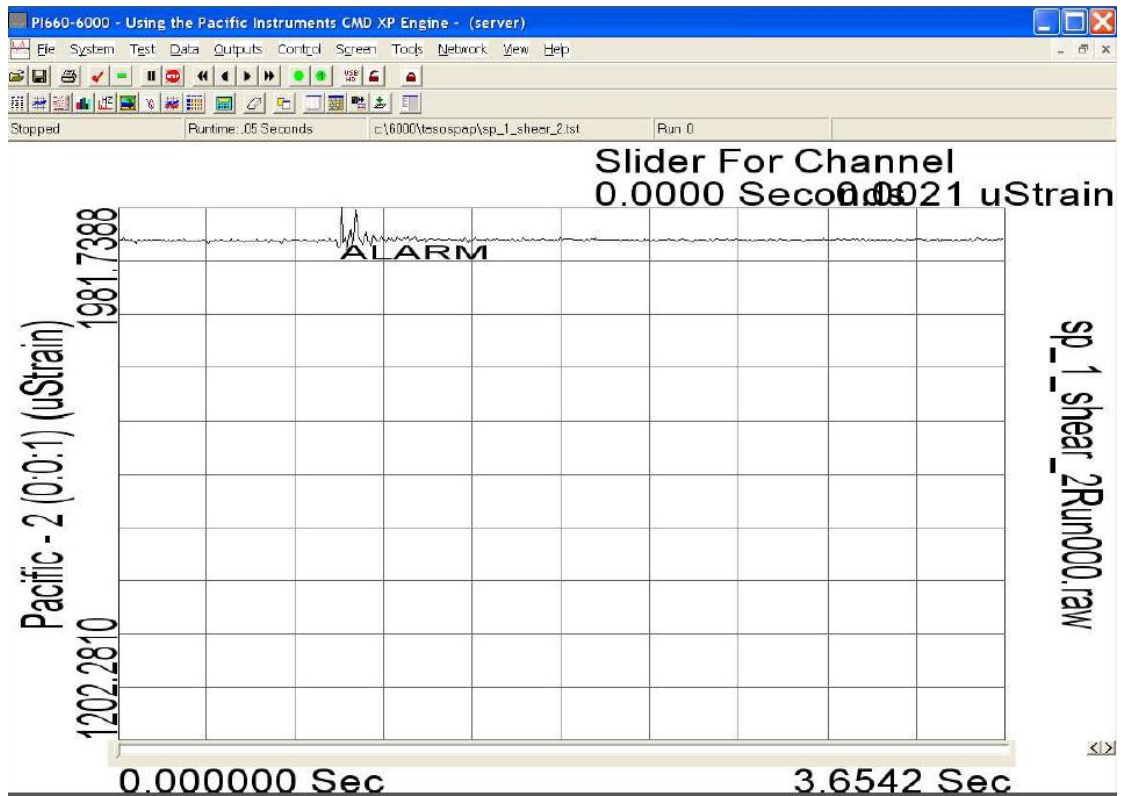
6.26α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν -Osc



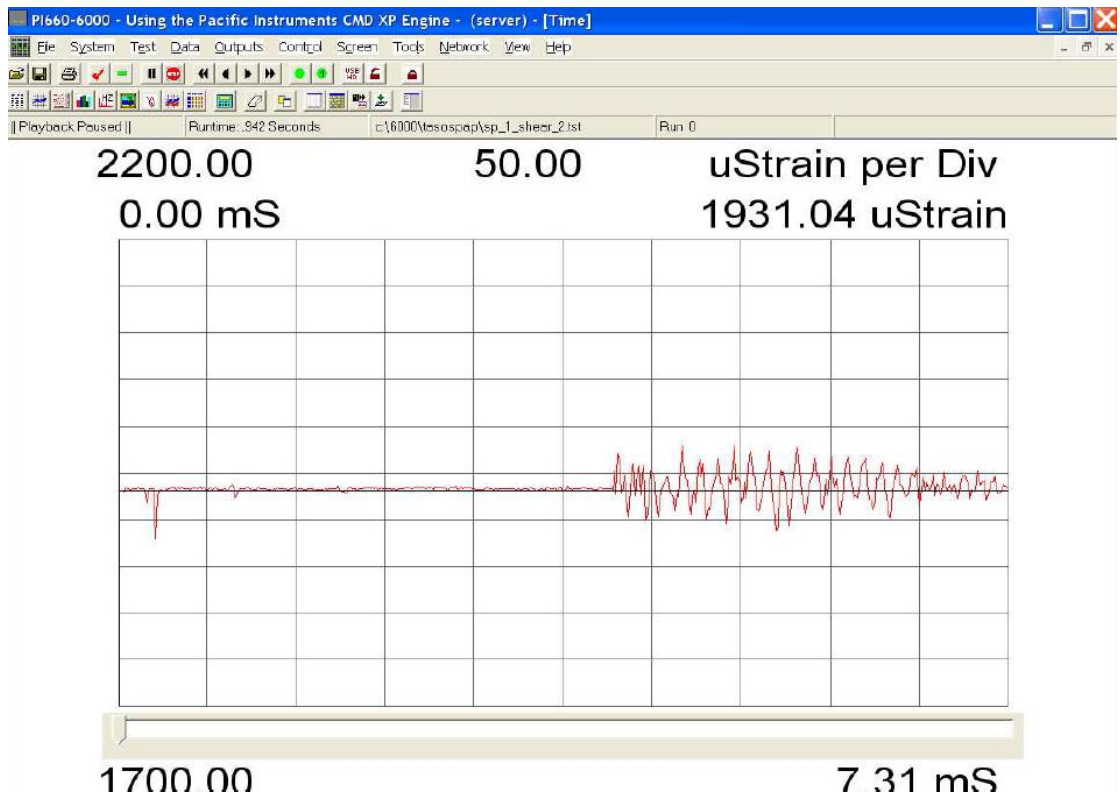
6.26β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής -Μετά -Osc



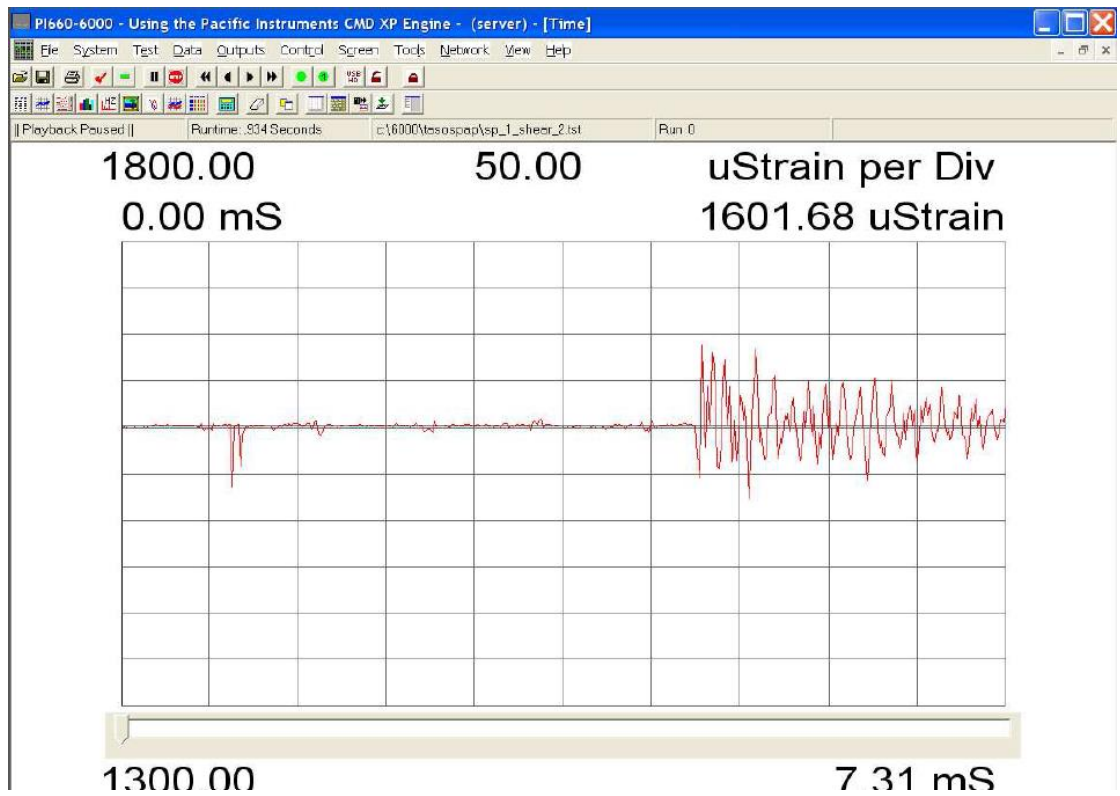
6.27α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



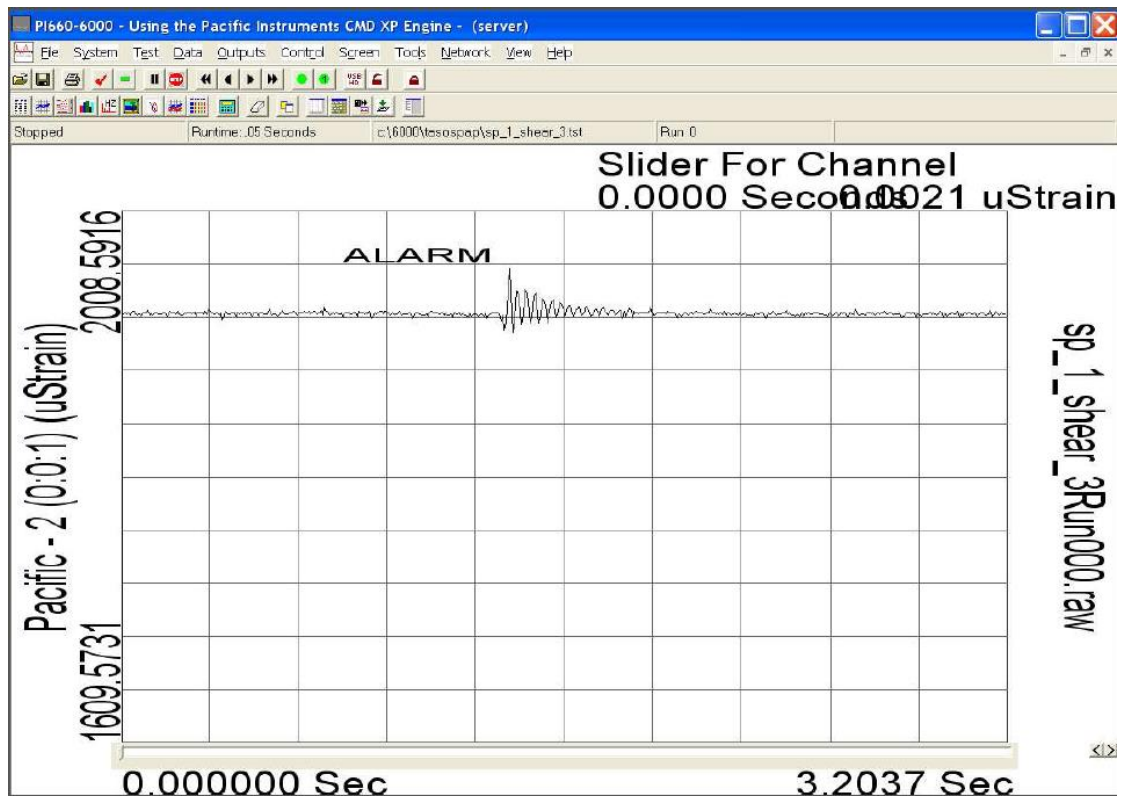
6.27β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά - QP



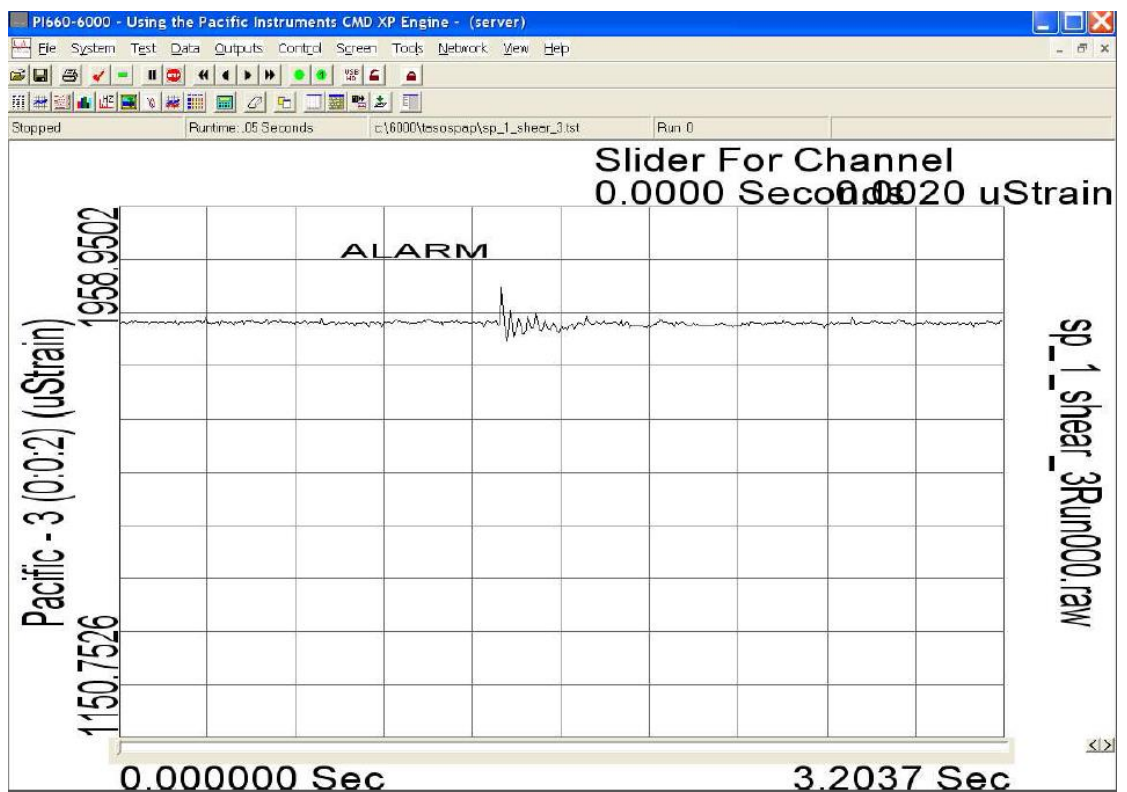
6.28α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν -Osc



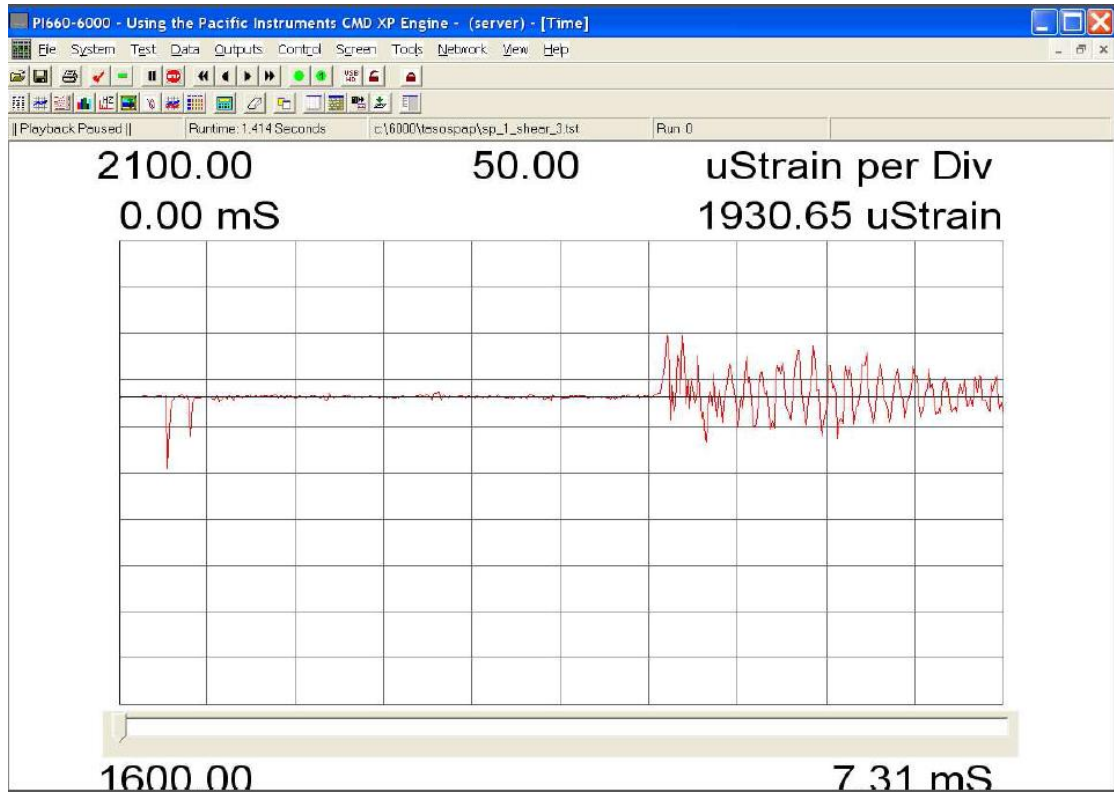
6.28β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής -Μετά -Osc



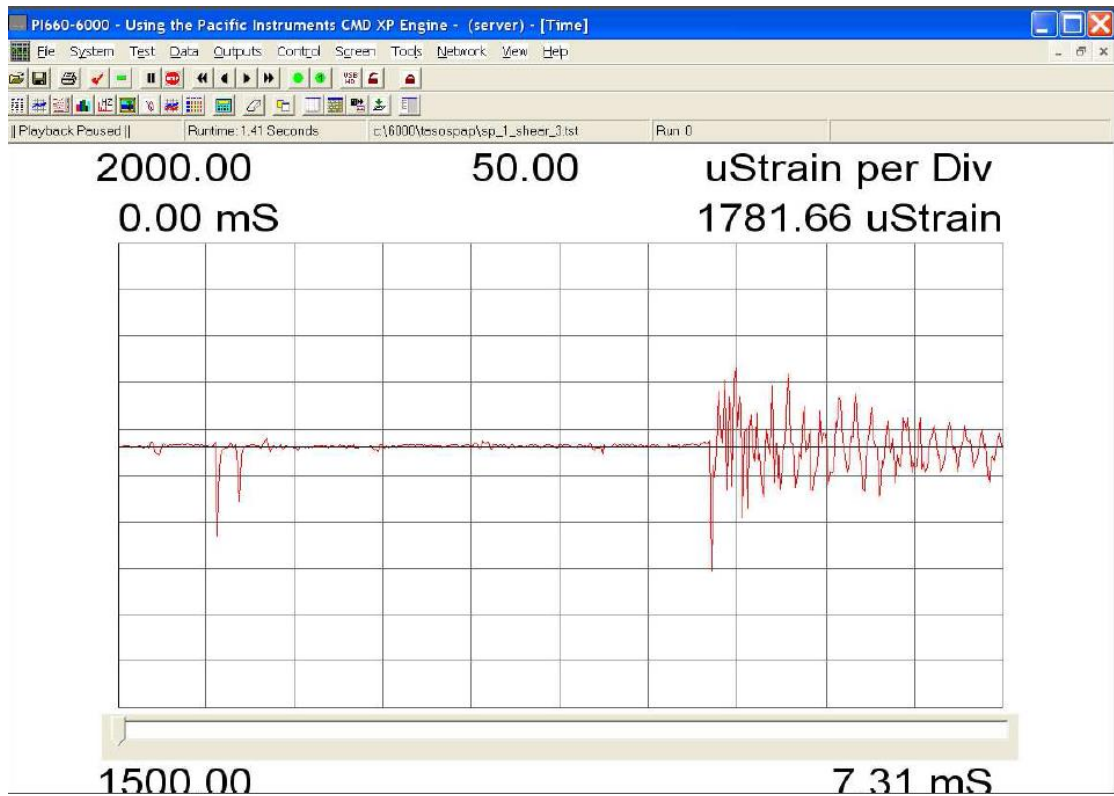
6.29α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



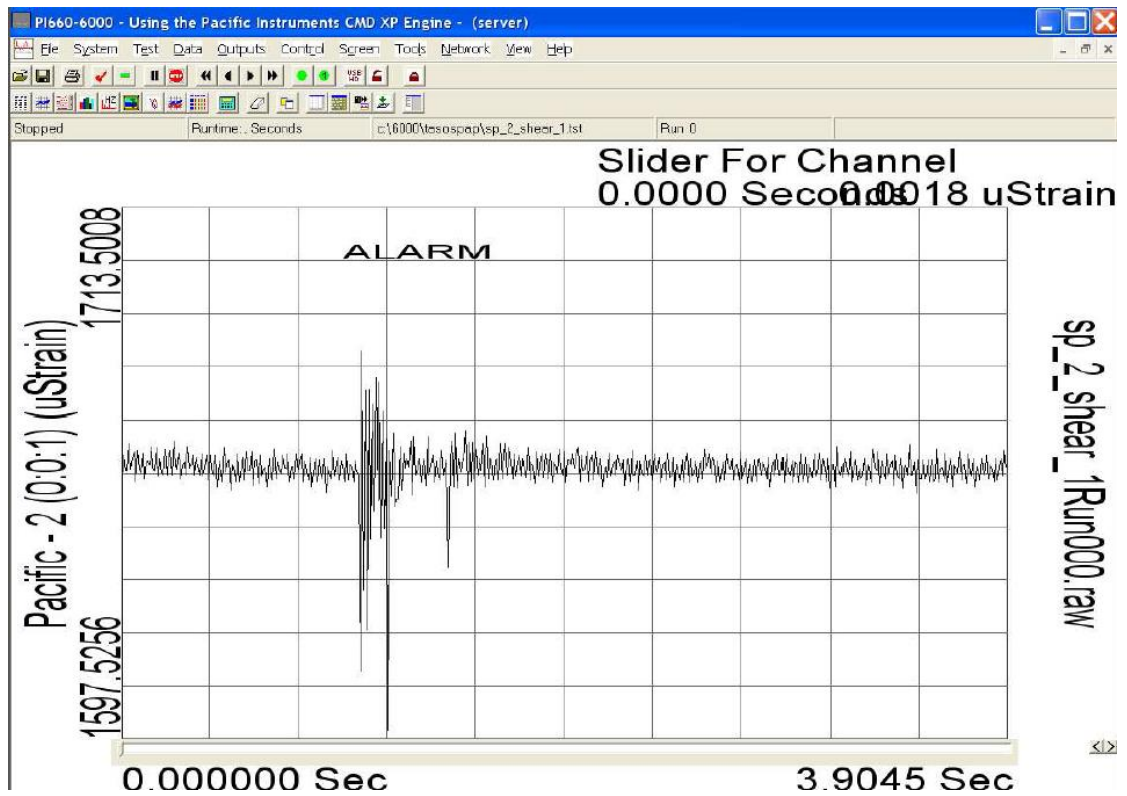
6.29β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -QP



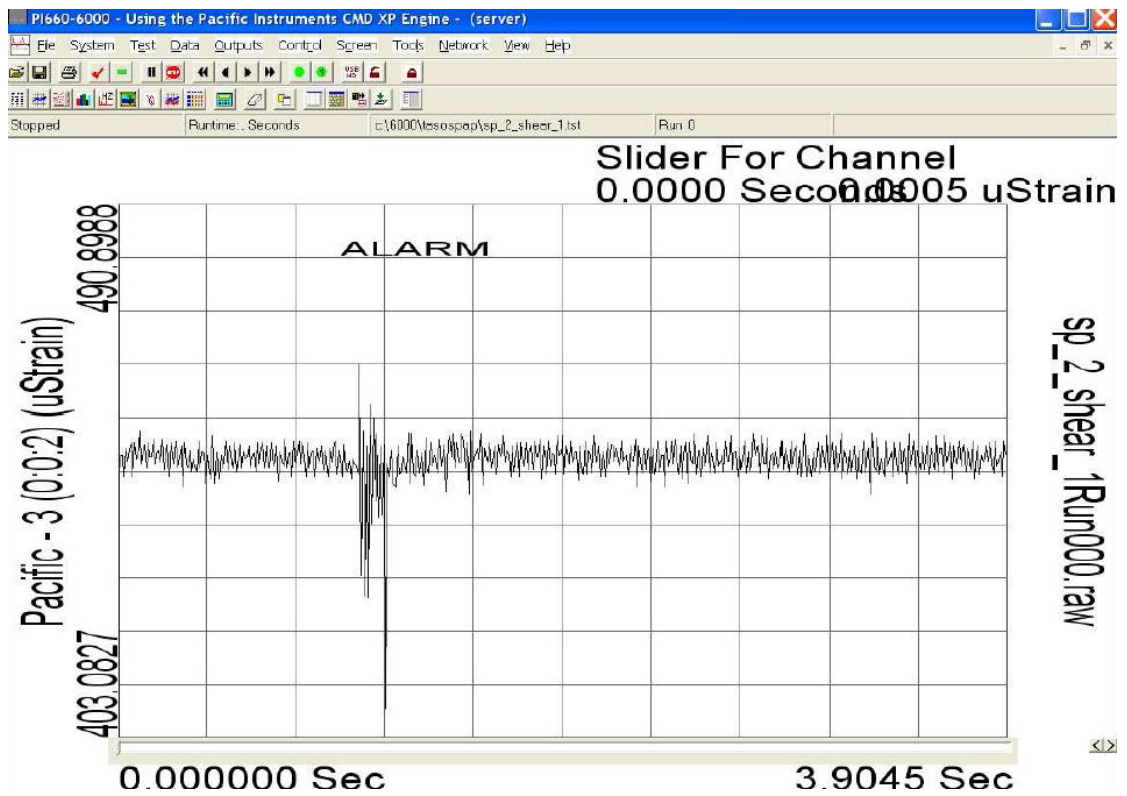
6.30α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν -Osc



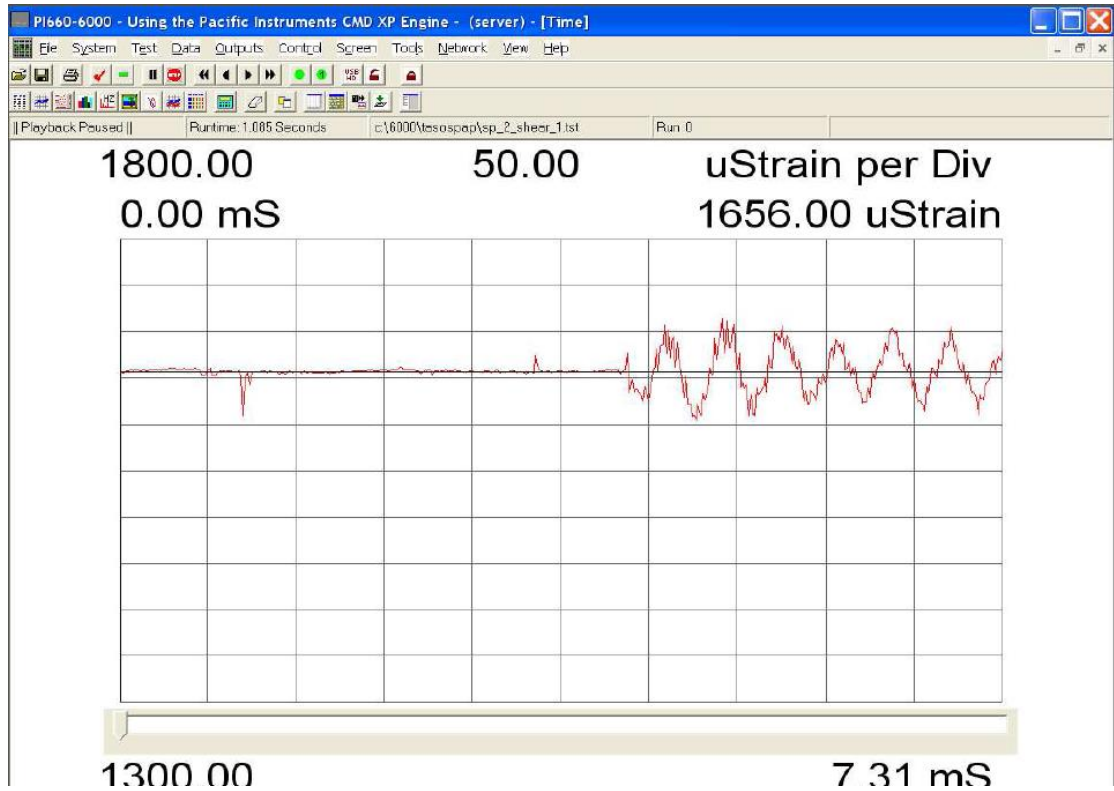
6.30β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής -Μετά -Osc



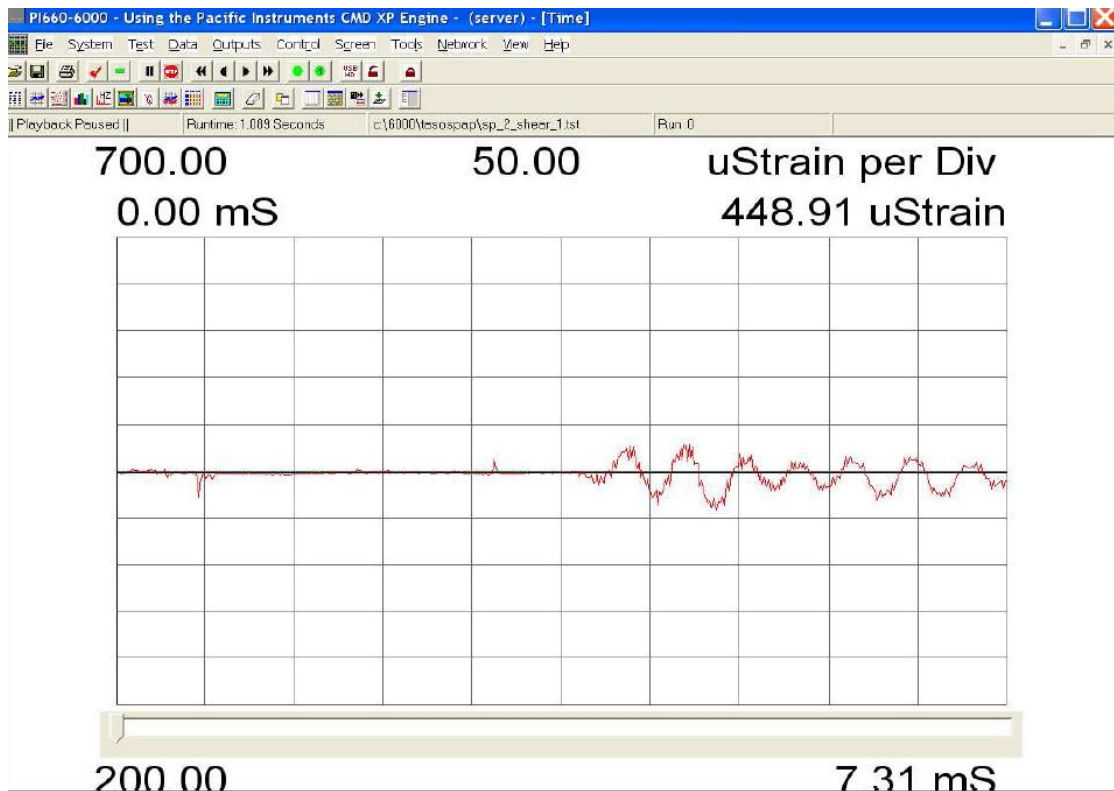
6.31α Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



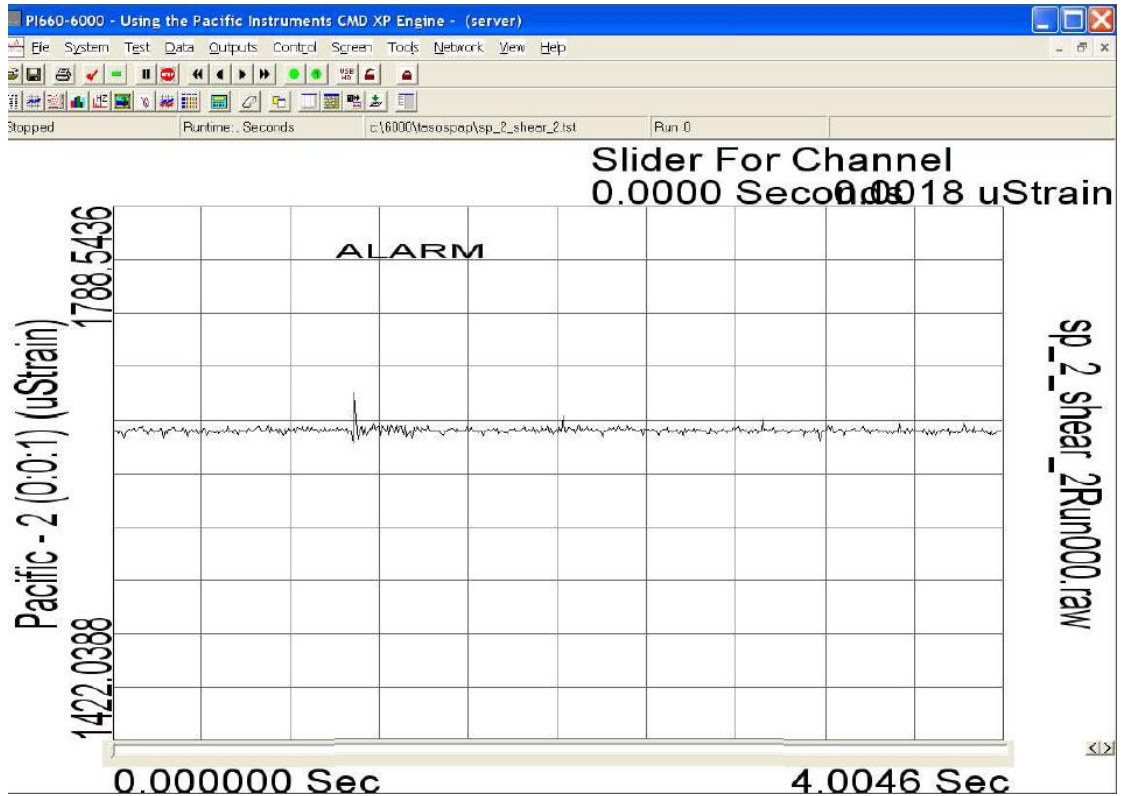
6.31β Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -QP



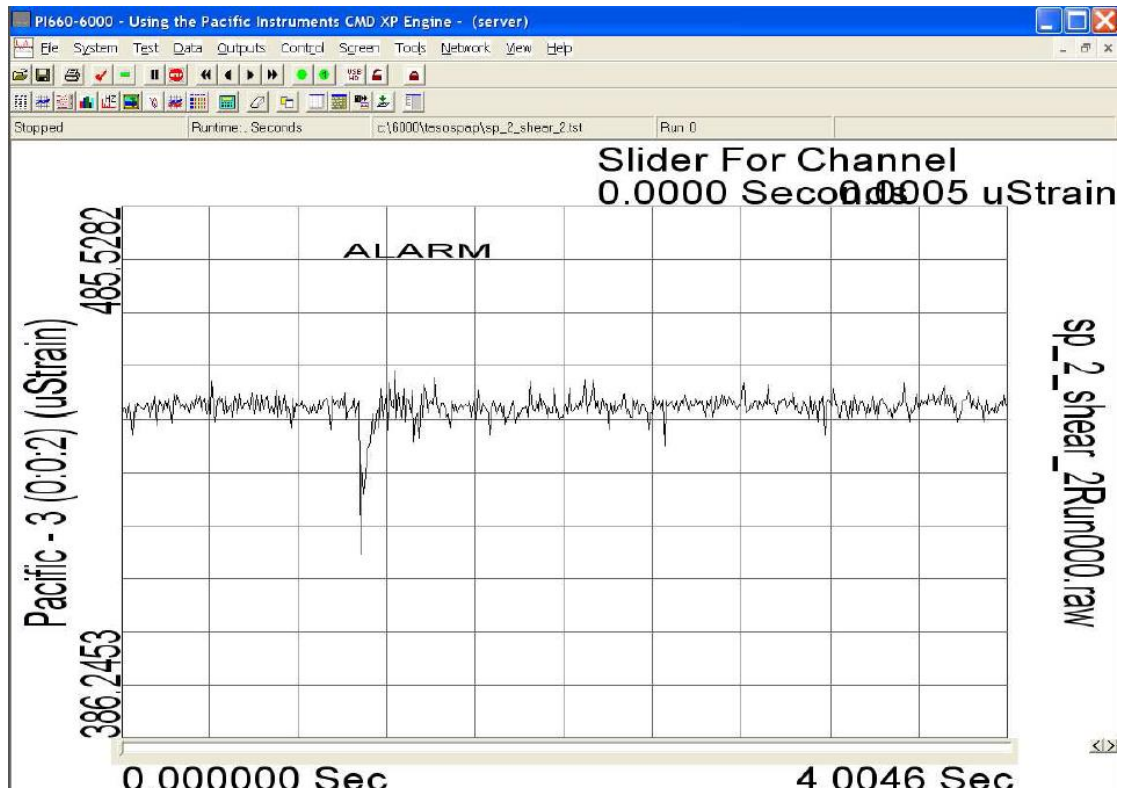
6.32α Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν -Osc



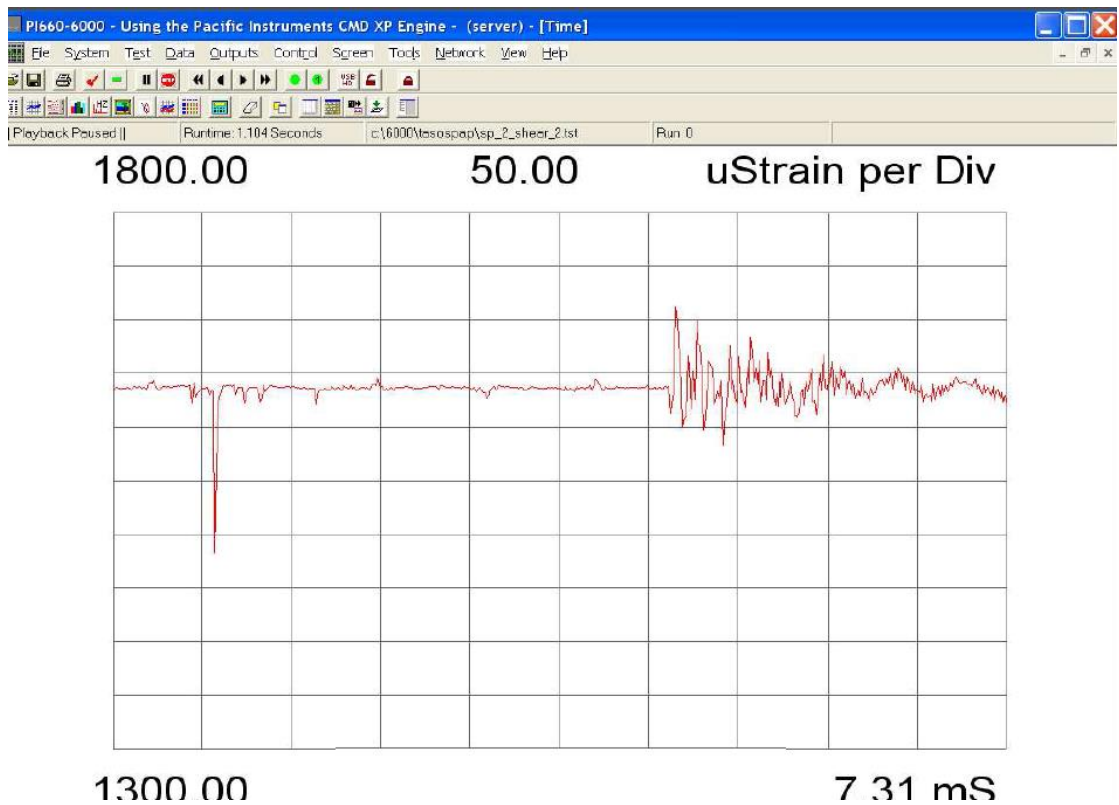
6.32β Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Εγκάρσιος μετρητής -Μετά -Osc



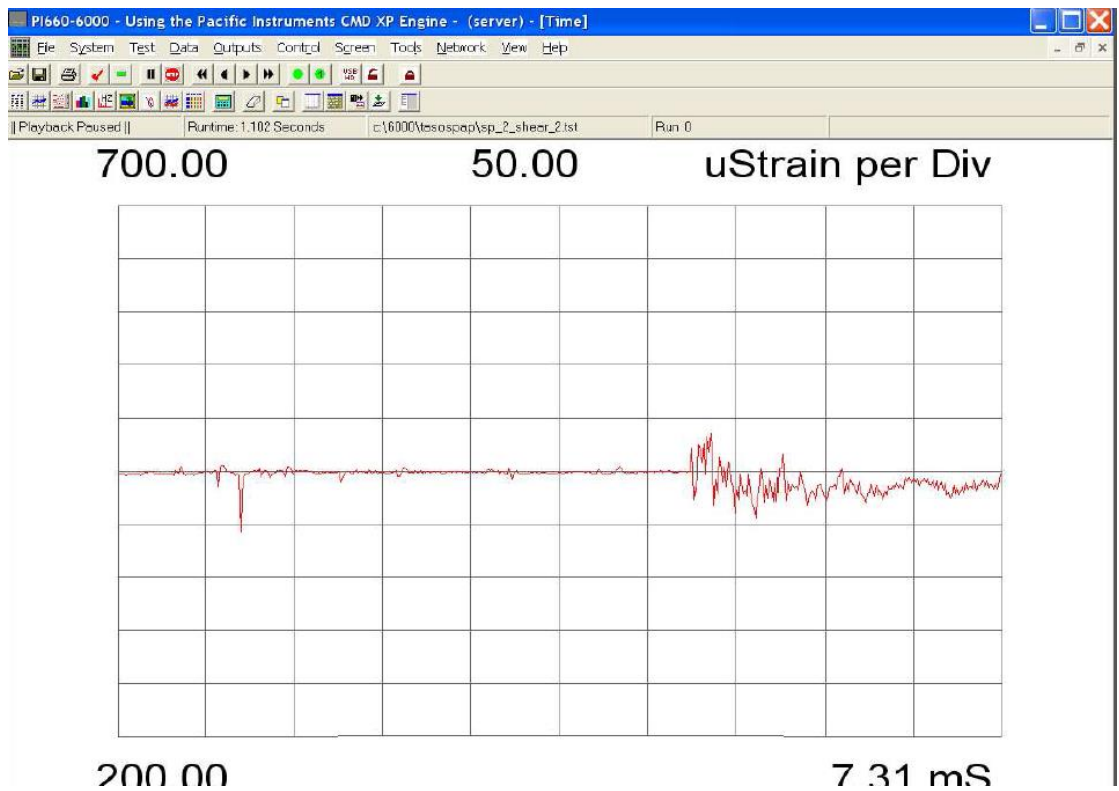
6.33α Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



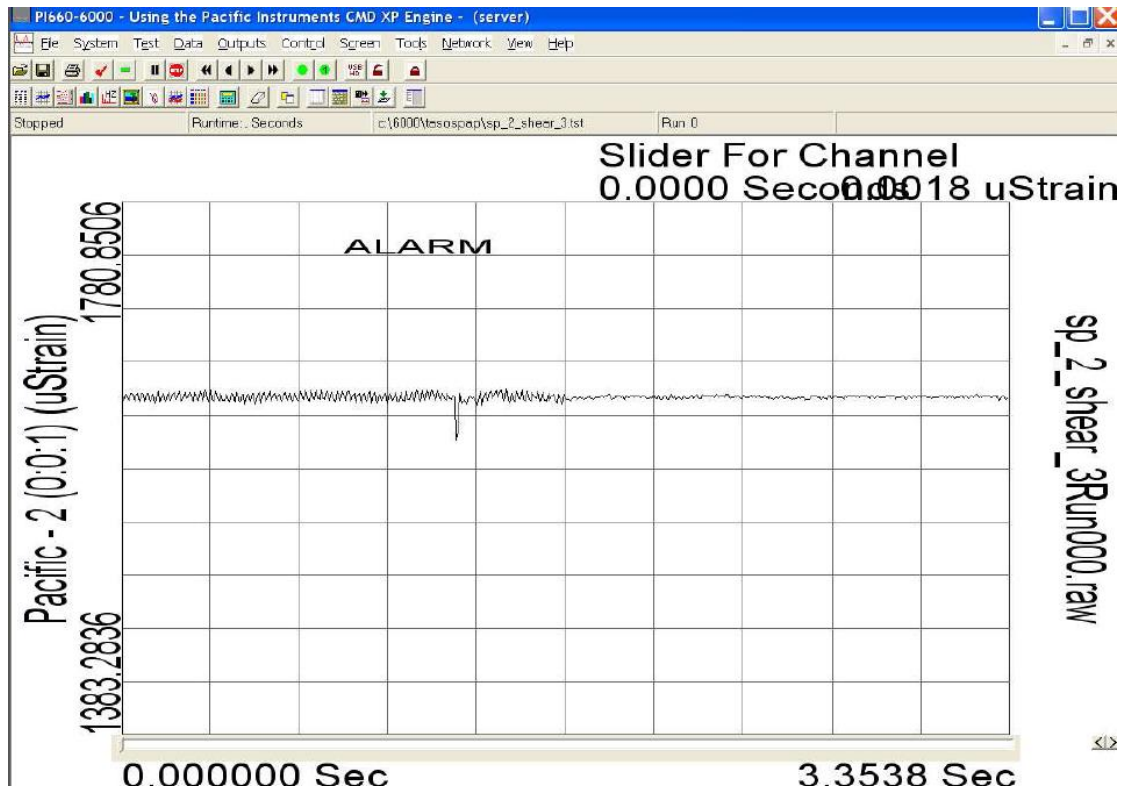
6.33β Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -QP



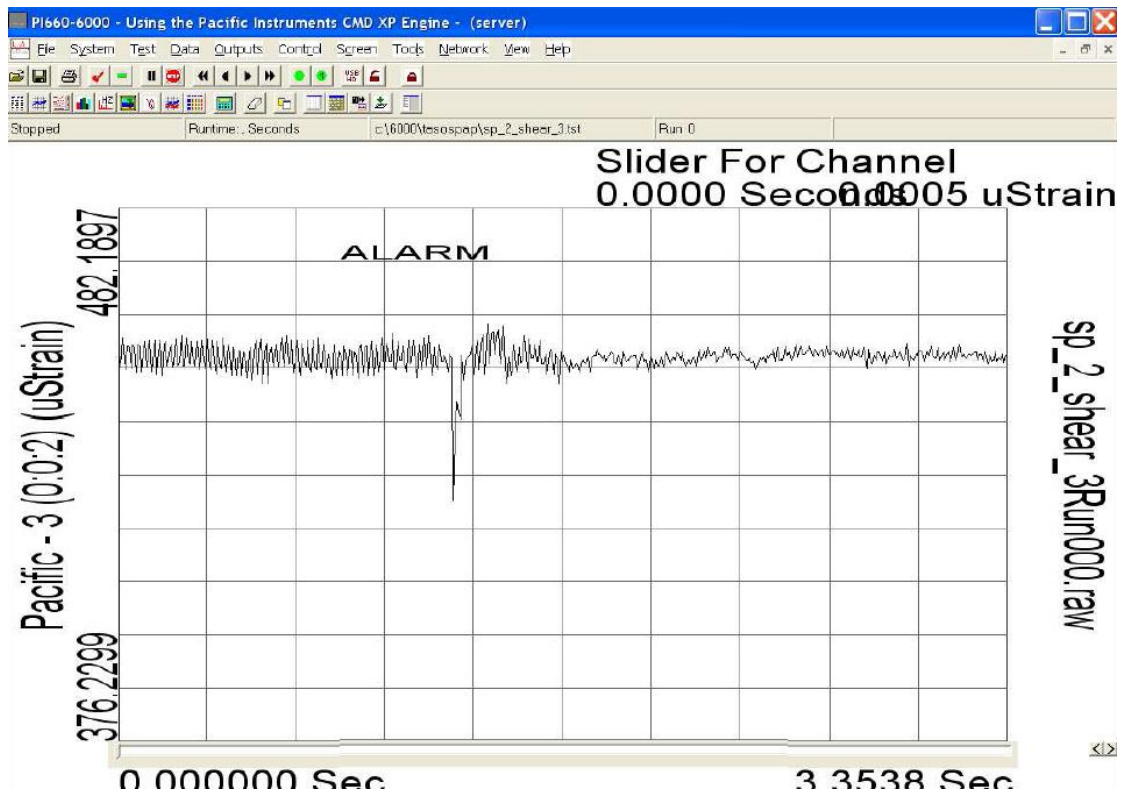
6.34α Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν -Osc



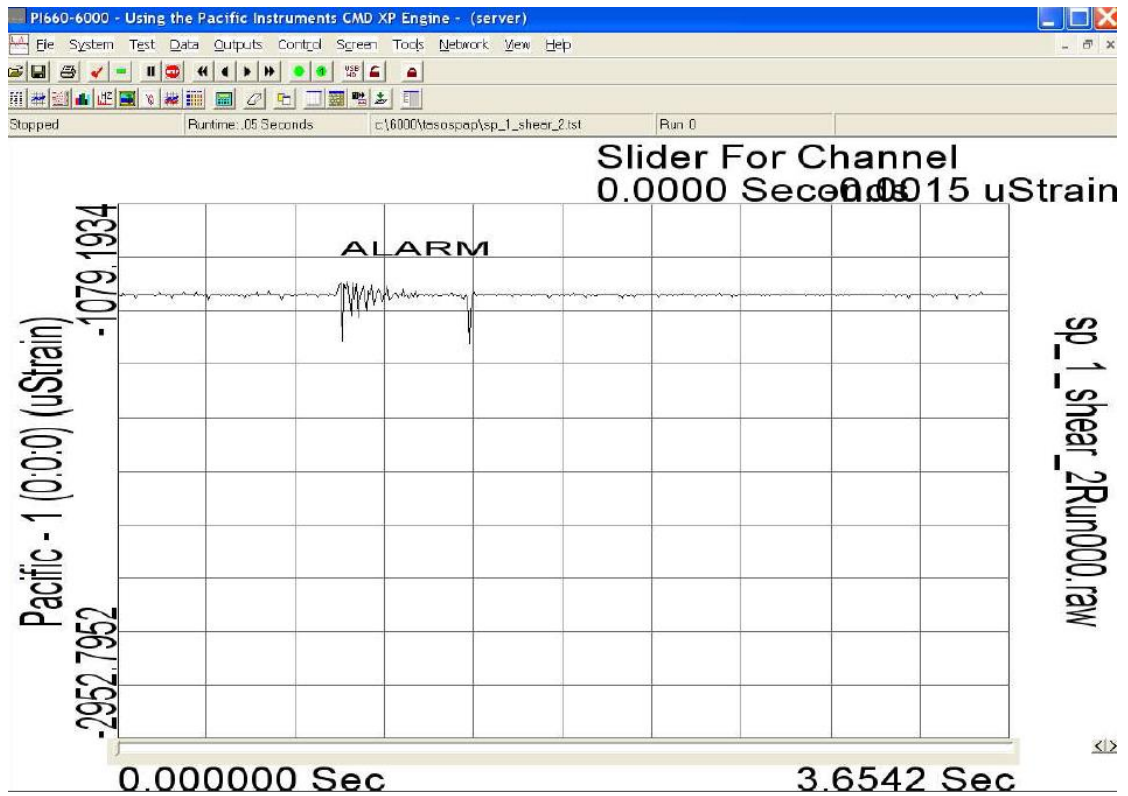
6.34β Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 2 - Εγκάρσιος μετρητής -Μετά -Osc



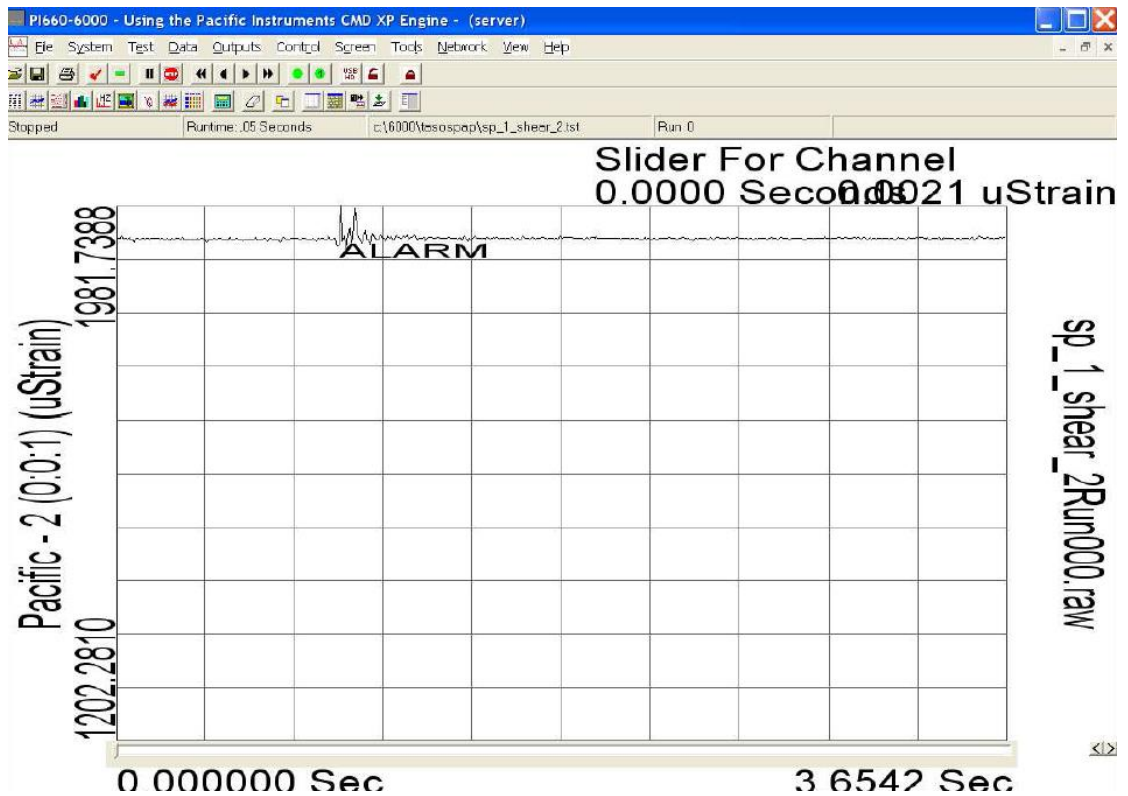
6.35α Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής - Πριν - QP



6.35β Δοκίμιο 2 - Εγκάρσιο χτύπημα 3 - Εγκάρσιος μετρητής - Μετά -QP



6.37α Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Πριν - QP



6.37β Δοκίμιο 1 - Εγκάρσιο χτύπημα 1 - Διαμήκης μετρητής - Μετά - QP

6.3 Εφελκυστική αντοχή

Μετά το πέρας των πειραμάτων τα τρία δοκίμια καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό προκειμένου να προκύψει η εφελκυστική αντοχή τους. Ο εφελκυσμός έγινε στην μηχανή εφελκυσμού - θλίψης INSTRON UTM μέγιστου φορτίου 300KN, όπως φαίνονται στις φωτογραφίες 6.39 και 6.40. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Δοκίμια	Φορτίο (KN)	Τάση (MPa)
1	7.32	64.75
2	12.58	111.29
3	33.65	297.68

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο η εξαιρετικά μικρή εφελκυστική αντοχή του πρώτου δοκιμίου που όπως έχει αναφερθεί είχε την πιο ελλιπή συγκόλληση. Το δεύτερο δοκίμιο με επίσης πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή αλλά πάντως μεγαλύτερη από του πρώτου είχε ελαφρώς καλύτερη συγκόλληση. Τέλος το τρίτο δοκίμιο παρουσιάζει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από τα δύο προηγούμενα λόγω της ορθότερης διαδικασίας κατά τη συγκόλληση, αλλά σαφώς μικρότερη από την αναμενόμενη εφελκυστική αντοχή του κατασκευαστικού χάλυβα, εξαιτίας της απότομης ψύξης με νερό αμέσως μετά τη συγκόλληση.

Τέλος η θραύση έγινε και στα τρία δοκίμια στην περιοχή της συγκόλλησης, που προφανώς οφείλεται στην κακή ποιότητα των συγκολλήσεων.



6.39 Εφελκυσμός δοκιμίου



6.40 Η μηχανή εφελκυσμού - θλίψης INSTRON UTM

6.4 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε μία πρώτη προσέγγιση να ελεγχθεί πειραματικά η ποιότητα συγκόλλησης ράβδων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μέσω της διάδοσης τασικού παλμού. Χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια διαβαθμισμένης ποιότητας μετωπικής ηλεκτροσυγκόλλησης. Ο τασικός παλμός δημιουργήθηκε με κρούση σφαίρας από αεριοβόλο διαμήκως και εγκαρσίως των δοκιμίων και η καταγραφή των παραμορφώσεων έγινε με τη βοήθεια ηλεκτρικών μετρητών παραμόρφωσης συνδεδεμένων με σύστημα ταχείας λήψης δεδομένων.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι:

Στην περίπτωση του διαμήκους χτυπήματος:

- Η απόκριση των μετρητών παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί διαμήκως ήταν για όλα τα δοκίμια και σε όλες τις επαναλήψεις παρόμοιες. Παρατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ενίσχυση του παλμού μετά τη διέλευσή του από τη συγκόλληση. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε αύξηση του πλάτους του παλμού με ταυτόχρονη μικρή ελάττωση της περιόδου του.
- Στην περίπτωση του δοκιμίου 3 που η συγκόλληση κάλυπτε πλήρως τη διατομή, τα ανωτέρω φαινόμενα δεν ήταν τόσο έντονα.
- Όσον αφορά τους μετρητές παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί εγκαρσίως δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή του πλάτους του παλμού πριν και μετά τη συγκόλληση σε κανένα από τα 3 δοκίμια.

Στην περίπτωση του εγκαρσίου χτυπήματος:

- Η απόκριση των μετρητών παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί διαμήκως ήταν παρόμοια, δηλαδή παρατηρήθηκε το φαινόμενο ενίσχυσης του παλμού μετά τη συγκόλληση.

- Στην περίπτωση των μετρητών παραμόρφωσης που είχαν τοποθετηθεί εγκαρσίως, στο δοκίμιο 1 επαναλήφθηκε το ίδιο φαινόμενο ενίσχυσης, ενώ στο δοκίμιο 2 όχι. Το πλήθος όμως των αποτελεσμάτων στην περίπτωση αυτή δεν ήταν αρκετό για εξαγωγή συμπερασμάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

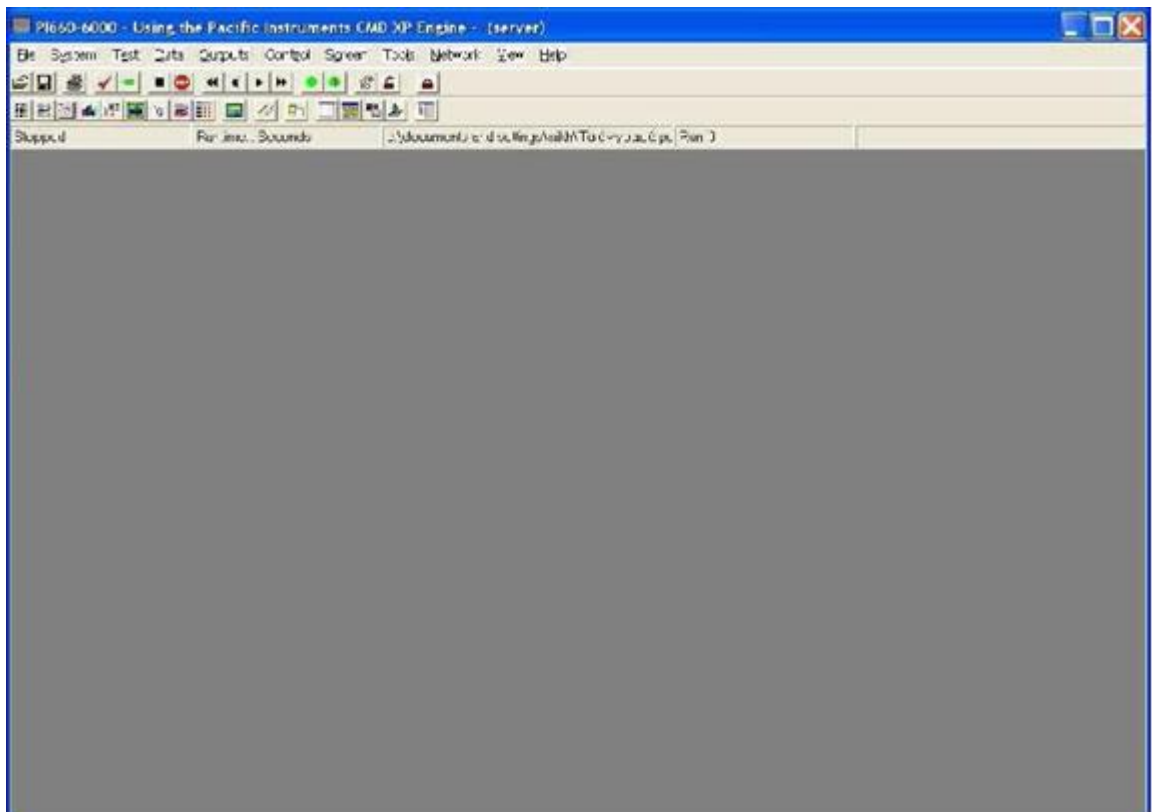
- 1) Αθάν. Γ. Μάμαλη, Κατεργασίες των Υλικών, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 1991
- 2) Καϊρης Σταύρος, Η εφαρμογή της ραδιογραφίας για τον μη καταστροφικό έλεγχο συγκολλητών συνδέσεων στην βιομηχανία: εξέταση των μεταβλητών της μεθόδου και πειραματική επαλήθευση, Διπλωματική εργασία, Επιβλέπων Μανωλάκος Δημήτριος, ΕΜΠ, 2009
- 3) Σ. Σούτης, Συγκολλήσεις, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος υλικό και μόρφωση, Εισήγηση, ΤΕΕ, 2006
- 4) Νέος κανονισμός τεχνολογίας χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ΚΤΧ 2008, ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008
- 5) Κ. Μηγιάκης, Ι. Νικολάου, Γ.Δ. Παπαδημητρίου, Σ. Μουγιάκος, Διερεύνηση αξιοπιστίας συγκολλήσεων με παράθεση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, m_2173, βιβλιοθήκη του ΤΕΕ
- 6) Ι. Νικολάου, Γ.Δ. Παπαδημητρίου, Σχεδιασμός συγκολλήσεων με επικάλυψη σε χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, m_2173, βιβλιοθήκη του ΤΕΕ
- 7) Μελέτη Ευαγγελία, Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών, Εργασία ΕΜΠ
- 8) Πολυξένη Βουρνά, Αφροδίτη Κτενά, Ευάγγελος Χριστοφόρου, Προσδιορισμός παραμενουσών τάσεων σε συγκολλημένα δείγματα AISI 4130 χάλυβα μέσω των μεθόδων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας, Poster, 8ο Εθνικό συνέδριο ΜΚΕ, Αθήνα, 2015
- 9) Π.Σ. Θεοχάρη, Πειραματική μηχανική των υλικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 1970

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PI660-6000 ΤΟΥ DATA ACQUISITION SYSTEM

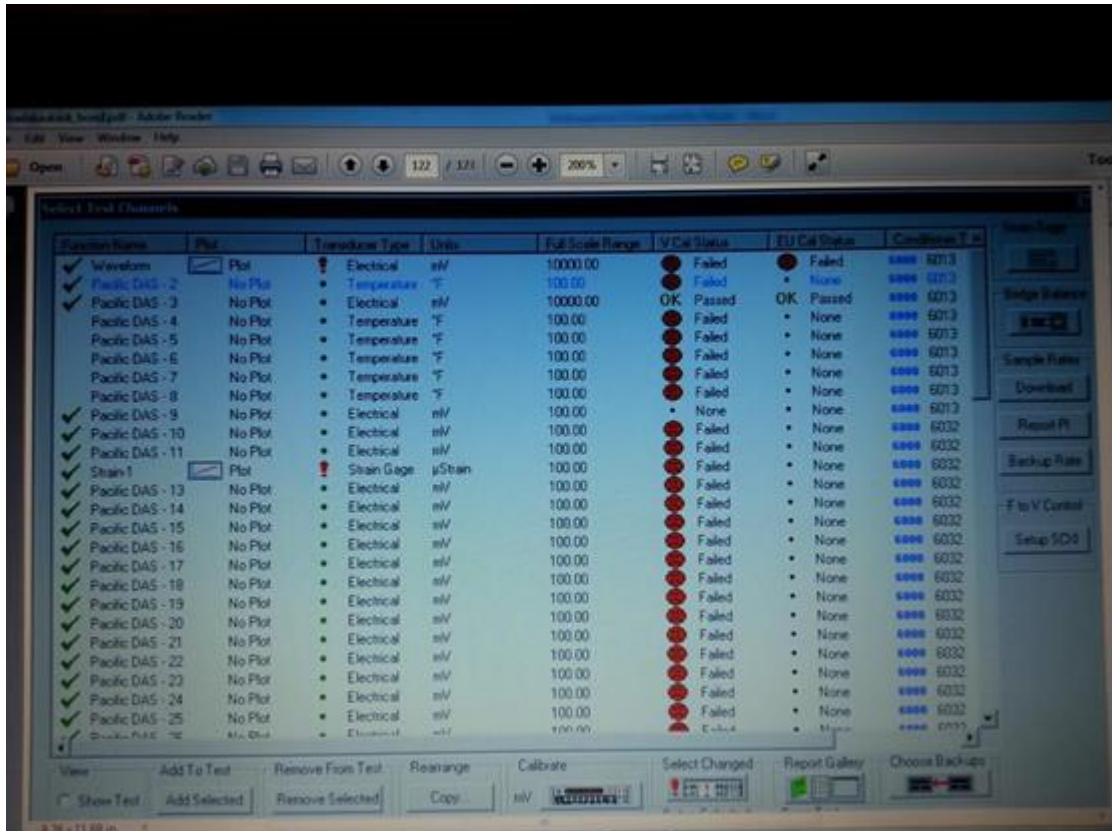
Βήμα 1

Στο παρακάτω παράθυρο επιλέγουμε Test → Select Channel



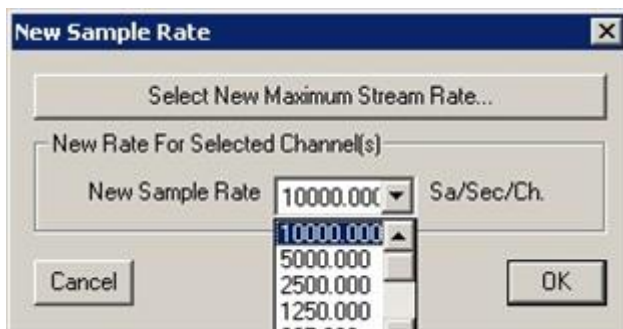
Βήμα 2

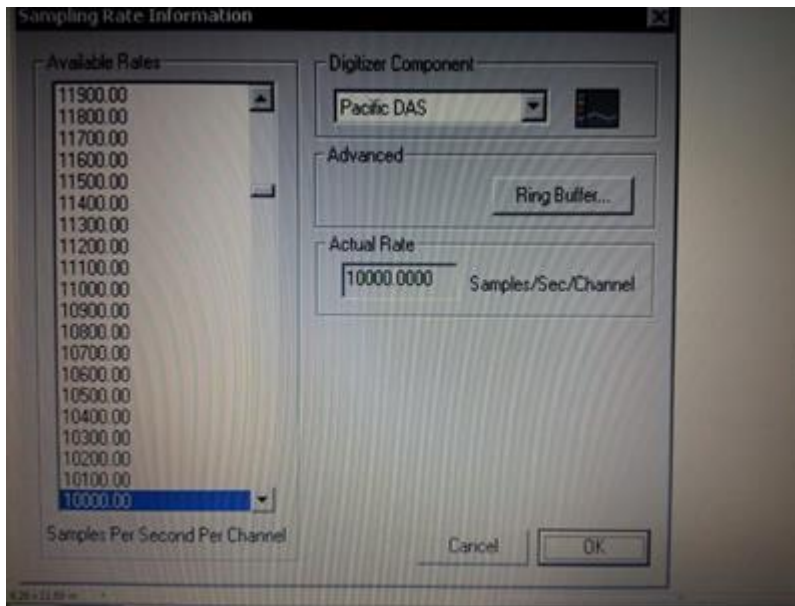
Επιλέγουμε τα κανάλια που θα χρησιμοποιήσουμε από το παρακάτω παράθυρο



Βήμα 3

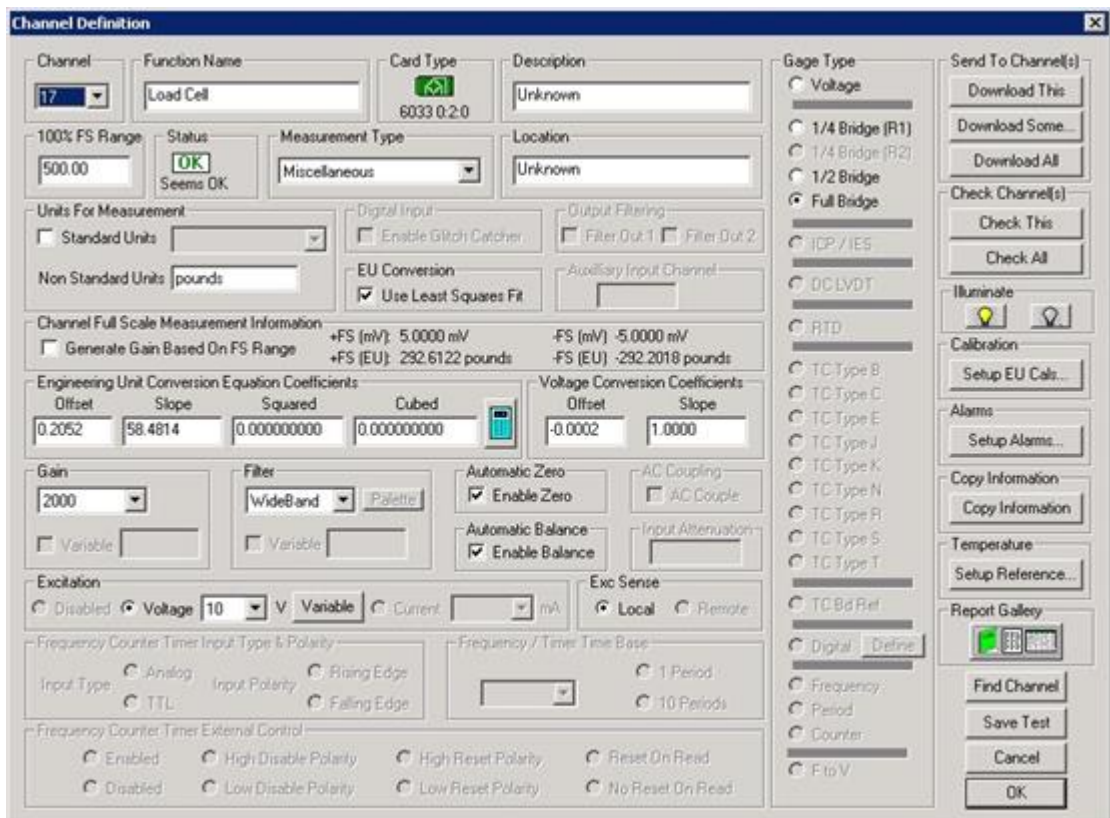
Επιλέγουμε το ρυθμό καταγραφής των δεδομένων





Βήμα 4

Στο παρακάτω παράθυρο ορίζουμε τι θα μετρά το κανάλι π.χ. strain gauge, 120 ohm gauge factor κλπ.



Βήμα 5

Στην αρχική επιφάνεια του προγράμματος επιλέγουμε «εγγραφή» (πράσινος κύκλος)

Βήμα 6

Αποθηκεύουμε την εγγραφή και επιλέγουμε Data → Select play back file και διαλέγουμε ποιο κανάλι θέλουμε. Μετά πατάμε Screen και επιλέγουμε σε τι μορφή θα μας παρουσιάσει τα δεδομένα π.χ Oscilloscope, quick plot, κλπ

