

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

- ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ ΣΕ ΩΣΘΕΝΙΚΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ  
X8 CrNiMoNb 16 16

Υπό Τσολή Ιωάννη

Επιβλέπουσα Μπαξεβάνη Ελένη

Επιτροπή Σοφιανόπουλος Δημήτρης  
Μωρέττη Μαρίνα



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**

Αριθ. Εισ.: 10154/1  
Ημερ. Εισ.: 23-11-2011  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ  
2011  
ΤΣΟ

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

- 1.1 Γενικές παρατηρήσεις για το φαινόμενο του ερπυσμού. 2
- 1.2 Θερμοκρασιακή περιοχή ερπυσμού. 3
- 1.3 Δοκιμή και νόμοι του ερπυσμού. 4
- 1.4 Τυπική συμπεριφορά υλικού στον ερπυσμό. 7
- 1.5 Μικροδομή. 9

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

- 2 Γενικά. 11
- 2.1 Μοντέλα μικροδομής. 11
- 2.2 Παραμετρικά μοντέλα. 12
- 2.3 Μοντέλα δικτύου. 13
- 2.4 Σύνθετα μοντέλα . 15

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 5

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

- 3 Γενικά για το μοντέλο. 17
- 3.1 Η έννοια της εσωτερικής αντίστασης. 17
- 3.2 Εκτίμηση συμπεριφοράς ερπυσμού. 18
- 3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου. 19
  - 3.3.1 Διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων. 20
  - 3.3.2 Βελτίωση αποτελεσμάτων με τη βοήθεια ελαχίστων τετραγώνων βαρύτητας. 23

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

- 4.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων. 24
- 4.2 Υπολογισμός μέσης τιμής παραμέτρων 69
- 4.3 Παρατηρήσεις πάνω στο μοντέλο 76

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

78

### Βιβλιογραφία

79

## ΠΕΛΙΔΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία ασχολούμαστε με την μοντελοποίηση και την ανάλυση της συμπεριφοράς του ερπυσμού στα μέταλλα, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό κατασκευών που λειτουργούν κυρίως κάτω από υψηλές θερμοκρασίες.

Αφού έχει γίνει μία αναφορά στις έννοιες του ερπυσμού και στις διάφορες προσεγγίσεις μοντελοποίησης που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, στη συνέχεια παρουσιάζεται η δουλειά μας η οποία είναι η μοντελοποίηση του ερπυσμού με το παραμετρικό μοντέλο 5 παραμέτρων που ανέπτυξε στη διδακτορική του διατριβή ο Ν. Βάσιλας.

Το μοντέλο ανήκει στην κατηγορία των παραμετρικών μοντέλων και υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια την συμπεριφορά ερπυσμού στα μέταλλα. Ακόμη επιτρέπει την γενίκευση των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς ερπυσμού και εκτός των πειραματικών δεδομένων.

Η τεχνική του μοντέλου αποτελείται από τρία βασικά βήματα. Κατ' αρχάς υπάρχει το πειραματικό στάδιο, όπου για κάθε μονοαξονικά φορτιζόμενη σταθερή τάση και για συγκεκριμένη θερμοκρασία μας δίνει την καμπύλη ερπυσμού από την οποία στη συνέχεια υπολογίζεται η μαθηματική σχέση που εκφράζει την καμπύλη αυτή. Ο προσδιορισμός της μαθηματικής σχέσης έγκειται στον προσδιορισμό των πέντε παραμέτρων του μοντέλου για κάθε ομάδα πειραματικών δεδομένων, διαφορετικής τάσης. Αμέσως μετά βρίσκεται μία συνάρτηση που εκφράζει την μέση τιμή σύμφωνα με τα αποτελέσματα που βγάλαμε. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να οδηγήσει στην γενίκευση των αποτελεσμάτων, εκτός των πειραματικών ορίων.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα ήταν ο χάλυβας X8 CrNiMoNb 16 16. Τριάντα οκτώ δοκίμια, με ενεργό μήκος 50 mm και διάμετρο 10 mm εξετάστηκαν σε μια σειρά από τάσεις και σε θερμοκρασία 700°C. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων επεξεργάστηκαν στην εργασία αυτή για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο επέρχεται σταδιακή παραμόρφωση ενός υλικού υπό την επίδραση σταθερής τάσης. Είναι αποτέλεσμα μακρόχρονης έκθεσης σε τάσεις μικρότερες της τάσης διαρροής του υλικού. Ο ερπυσμός είναι πιο εμφανής σε περιπτώσεις όπου το υλικό εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, κοντά στο σημείο τήξης τους και αυξάνεται σημαντικά με αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης του ερπυσμού εξαρτάται από το είδος του υλικού, το φορτίο που του επιβάλλεται, η διάρκεια επιβολής του φορτίου καθώς και η θερμοκρασία. Ανάλογα με το μέγεθος του φορτίου και την διάρκεια επιβολής του το υλικό μπορεί να φτάσει σε μεγάλες παραμορφώσεις που το καθιστούν δυσλειτουργικό. Ο ερπυσμός λαμβάνεται υπόψη από μηχανικούς και μεταλλουργούς για την αξιολόγηση εξαρτημάτων που υπόκεινται σε υψηλές τάσεις ή υψηλές θερμοκρασίες. Μέτριας έντασης ερπυσμός είναι συχνά επιθυμητός σε κατασκευές από σκυρόδεμα καθώς μειώνει κάποιες εφελκυστηκές τάσεις που θα οδηγούσαν σε ρηγμάτωση.

Η αστοχία λόγω ερπυσμού συσσωρεύετε ως αποτέλεσμα μακρόχρονης επιβολής τάσης και ως εκ τούτου δεν είναι ψαθηρή.

Το εύρος θερμοκρασιών όπου το φαινόμενο του ερπυσμού είναι έντονο κυμαίνεται μεταξύ 30-40% του σημείου τήξης για μέταλλα και 40-50% του σημείου τήξης για κεραμικά υλικά. Για κάποια υλικά ο ερπυσμός μπορεί να είναι έντονος και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το σημείο τήξης τους.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αστοχίας λόγω ερπυσμού είναι η κατάρρευση του παγκόσμιου κέντρου εμπορίου (δίδυμοι πύργοι) λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε.

Ο ρυθμός ερπυσμού σε πυρηνικούς αντιδραστήρες μπορεί να αποτελέσει σημαντικό περιορισμό στον σχεδιασμό τους καθώς ενισχύεται από την ροή των ενεργών σωματιδίων.

Ένα ευρύτερα γνωστό φαινόμενο που οφείλεται στον ερπυσμό είναι η κίνηση των παγετώνων. Όταν η θερμοκρασία των παγετώνων δεν απέχει πολύ από το σημείο τήξης ( $0^{\circ}\text{C}$ ), τότε υπό την επίδραση του δικού τους βάρους αρχίζουν να έρπουν, δηλαδή να παραμορφώνονται πλαστικά στην βάση τους, να θρυμματίζονται και να μετακινούνται προς τις πλαγιές των βουνών. Ο πάγος ως οξείδιο του υδρογόνου κατατάσσεται στην κατηγορία των κεραμικών υλικών.

Ο ερπυσμός μπορεί να θεωρηθεί ως καθολικό φαινόμενο στην συμπεριφορά των υλικών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

#### 1.1 Γενικές παρατηρήσεις για το φαινόμενο του ερπυσμού.

Στόχος της εργασίας είναι η μοντελοποίηση και ανάλυση του φαινομένου του ερπυσμού έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό κατασκευών που λειτουργούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Ειδικότερα θα γίνει μελέτη του ερπυσμού από πλευρά μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού σε δεδομένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας και συσχέτιση της μεταβολής της παραμόρφωσης του ερπυσμού με το χρόνο.

Η γενική μορφή του φαινομένου του ερπυσμού μπορεί να παρασταθεί ως μια συνάρτηση της μορφής:

$$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$$

όπου:  $\varepsilon$  = παραμόρφωση

$\sigma$  = τάση

$t$  = χρόνος

$T$  = θερμοκρασία

Ο ερπυσμός δηλαδή δεν εξαρτάται μόνο από την τάση αλλά και από την θερμοκρασία. Ο ερπυσμός είναι ένα φαινόμενο θερμικά επενεργούμενο, επομένως ελέγχεται από την ταχύτητα διάχυσης των ατόμων και εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αν αυξηθεί η θερμοκρασία ή η ασκούμενη τάση το φαινόμενο επιταχύνεται και η θραύση επέρχεται πιο γρήγορα. [1]

Η συμπεριφορά αυτή του υλικού σε ερπυσμό πρέπει να αντιδιασταλεί με τον γνωστό νόμο του εφελκυσμού, ο οποίος εκφράζει συμπεριφορά ελαστοπλαστική δηλαδή συμπεριφορά όπου η παραμόρφωση, ελαστική η πλαστική, ακολουθεί την επιβολή ή την αύξηση του φορτίου. Επίσης η εξάρτηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς από την θερμοκρασία υπάρχει μεν αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. [5]

Στην πράξη η ερπυστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών χαρακτηρίζονται συχνά ως συμπεριφορά υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα.

Ανάλογα με το φορτίο που επιβάλεται και την θερμοκρασία, η ταχύτητα παραμόρφωσης κατά τον ερπυσμό  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$  μπορεί να κυμαίνεται από 1 ως  $10s^{-1}$ . Συνηθέστερα όμως κυμαίνεται από  $10^{-1}$  μέχρι  $10^{-6} s^{-1}$  και οι προκαλούμενες παραμορφώσεις δεν γίνονται άμεσα αισθητές παρά μόνο με την πάροδο σημαντικού χρονικού διαστήματος.

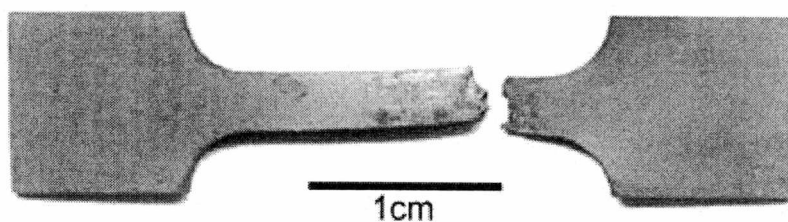
## 1.2 Θερμοκρασιακή περιοχή ερπυσμού.

Όλα τα υλικά έρπουν όταν εργάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι όσον αφορά στις τεχνολογικές εφαρμογές ο ερπυσμός ενδιαφέρει κυριότερα την λειτουργία εγκαταστάσεων υψηλών θερμοκρασιών. Περιπτώσεις εκδήλωσης ερπυσμού παρατηρούνται συχνά σε μονάδες μετατροπής και παραγωγής ενέργειας, σε χημικές εγκαταστάσεις και σε μεταλλουργικές βιομηχανίες. Ερπυσμός εκδηλώνεται και σε γεωλογικά φαινόμενα με την παραμόρφωση πετρωμάτων.

Έχει διαπιστωθεί ότι η θερμοκρασία πάνω απ' την οποία αρχίζει να εκδηλώνεται έντονα το φαινόμενο του ερπυσμού έχει να κάνει άμεσα με το σημείο τήξης του υλικού.

Υλικά με υψηλό σημείο τήξης παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στον ερπυσμό ακόμα και σε μεγάλες θερμοκρασίες, ενώ υλικά με χαμηλό σημείο τήξης όπως ο μόλυβδος μπορούν να έρπουν ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικά οι σωληνώσεις μόλυβδου στις αποχετεύσεις μπορούν να παραμορφωθούν στον χρόνο με την επίδραση του ιδίου βάρους τους, ενώ στους λαμπτήρες πυρακτώσεως το νήμα από βολφράμιο αντέχει στον ερπυσμό ακόμα και σε κατάσταση πυράκτωσης. [2]

Τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο, όσο και σε εμπειρικό έχει παρατηρηθεί ότι το φαινόμενο του ερπυσμού εμφανίζεται κοντά σε θερμοκρασίες 0,3 – 0,5 του σημείου τήξης του υλικού [3]. Προφανώς και ο ερπυσμός μπορεί να παρατηρηθεί και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αλλά το φαινόμενο δεν θα είναι τόσο έντονο και θα διαρκέσει πολύ περισσότερο χρόνο μέχρι την θραύση.



Σχ. 1.1 Θραύση λόγω ερπυσμού

### 1.3 Δοκιμή και νόμοι του ερπυσμού.

Η συμπεριφορά των υλικών σε συνθήκες ερπυσμού γίνεται καλύτερα αντιληπτή με εργαστηριακές δοκιμές.

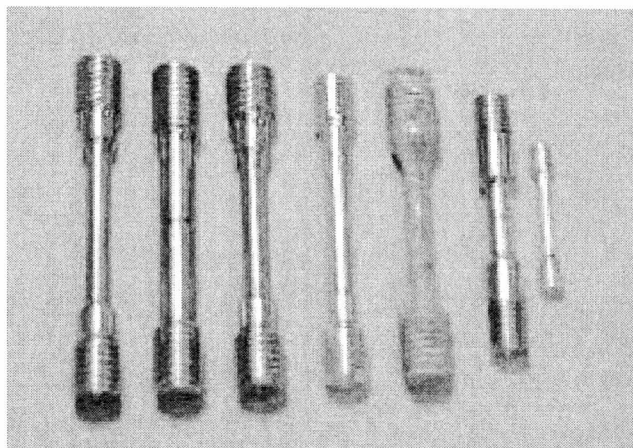
Τα πειράματα του ερπυσμού μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες.

Τα πειράματα που διαρκούν από 2000h έως 10000h και γίνονται σε χαμηλά φορτία ώστε να αποφευχθεί η έναρξη του τριτογενούς σταδίου που μπορεί να οδηγήσει σε θραύση. Στα πειράματα αυτά επιδιώκεται να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ταχύτητα ερπυσμού για συγκεκριμένη θερμοκρασία και τάση. Η ολική παραμόρφωση δεν υπερβαίνει συνήθως το 2%, και για αυτόν τον λόγο απαιτούνται μετρικές διατάξεις μεγάλης ακρίβειας.

Συνηθέστερα όμως είναι τα πειράματα καταπόνησης μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου, όπου η δοκιμή οδηγείται με μεγαλύτερες των πραγματικών ταχύτητες παραμόρφωσης μέχρι την θραύση με την βοήθεια μεγαλύτερων φορτίων. Η δοκιμή διαρκεί από 100 έως 1000 ώρες και οι συνολικές παραμορφώσεις είναι έως 50%. Η μέθοδος αυτή γενικεύεται και σε μικρότερα φορτία και θερμοκρασίες. Η γενίκευση αυτή όμως δεν είναι απόλυτα αξιόπιστη αφού υπάρχει η πιθανότητα ο κύριος μηχανισμός του ερπυσμού να έχει αλλάξει. Όμως η χρησιμοποίηση αυτής της τεχνικής είναι αναπόφευκτη αφού η ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία δεν επιτρέπει να αναμένουμε έως και μερικά χρόνια για την παρατήρηση και αξιολόγηση ενός υλικού.[4]

Σε ένα τυπικό πείραμα ερπυσμού, ένα κυλινδρικό δοκίμιο, υποβάλλεται σε εφελκυσμό (ή θλίψη) υπό σταθερό φορτίο. Το δοκίμιο περιβάλλεται από έναν θερμοστατικά ελεγχόμενο φούρνο, η θερμοκρασία του οποίου ελέγχεται από έναν θερμοστάτη. Η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου μετριέται από ένα πολύ ευαίσθητο μηκυσιόμετρο.

Στη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται η επιμήκυνση συναρτήσει του χρόνου, ενδεχομένως μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου. Η δοκιμή μπορεί να διαρκέσει μέρες, μήνες ή ακόμα και χρόνια όπως προαναφέρθηκε.



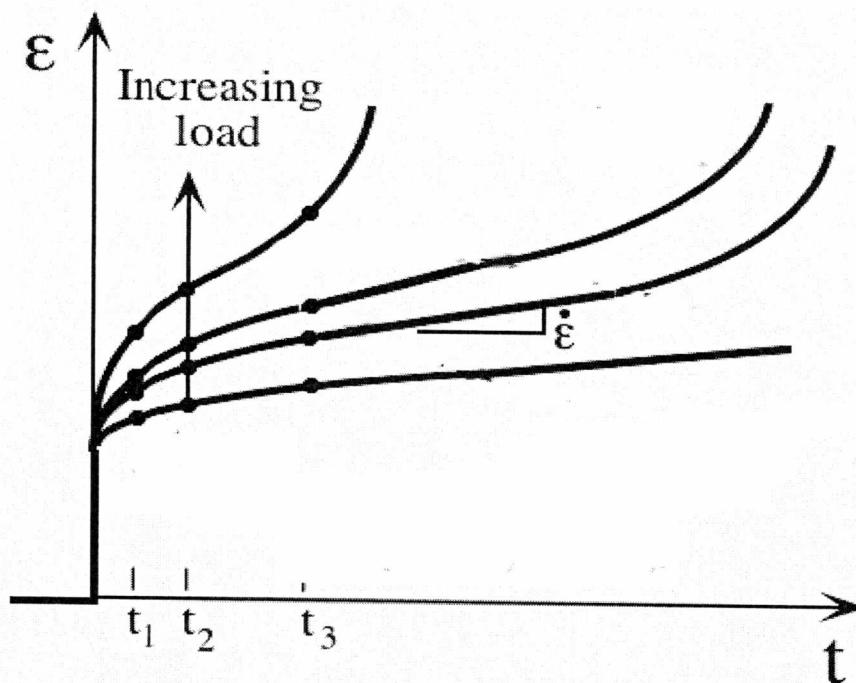
Σχ. 1.2 Κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιούνται σε πείραμα ερπυσμού.



Τόσο η δοκιμή όσο και το σχεδιασμός των δοκιμίων γίνεται σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN EN 150 204 (Metallic materials-Uniaxial creep tensing in Tension-Method of test, 2005), έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων διαφορετικών πειραμάτων. Η ευθύτητα του δοκιμίου πρέπει να ελέγχεται και να βρίσκεται μέσα στο 0.5% της διαμέτρου. Ειδάλλως αναπτύσσονται καμπτικές τάσεις οι οποίες θα αλλοιώσουν το αποτέλεσμα. Η επιφάνεια του δοκιμίου είναι και αυτή σημαντική. Το δείγμα πρέπει να είναι ομαλό και λείο, χωρίς εκδορές και το μηκυσιόμετρο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο πάνω στο δοκίμιο και όχι σε κάποιο άλλο μέρος της μηχανής ερπυσμού έτσι ώστε να είναι πραγματική η μέτρηση της μεταβολής του μήκους του δοκιμίου. Για υλικά που αντιδρούν στον αέρα, το πείραμα γίνεται σε ειδικούς θαλάμους παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας ή κενού.

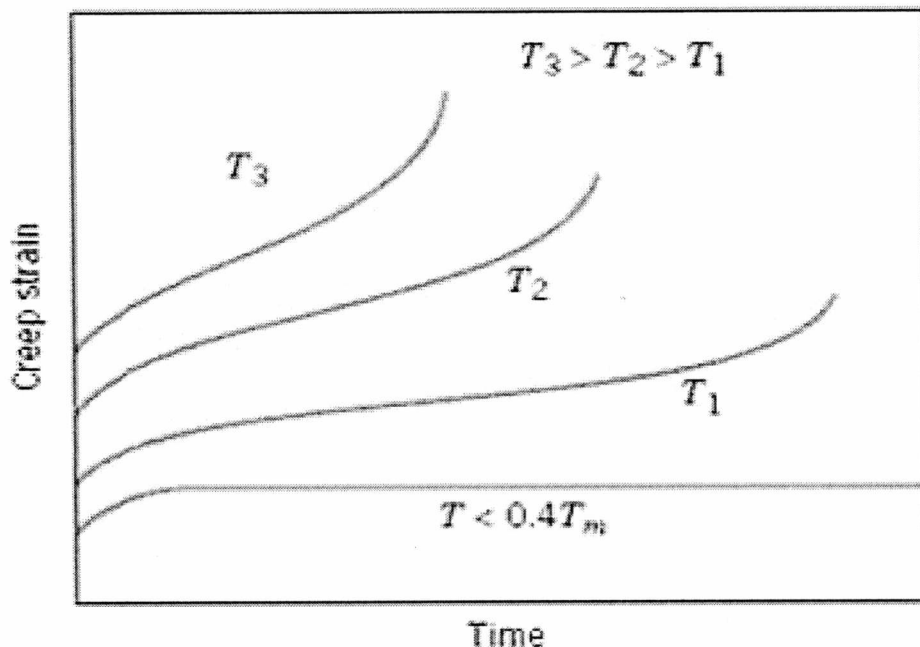
Το ότι το φορτίο είναι σταθερό δεν σημαίνει ότι το πείραμα γίνεται υπό σταθερή τάση, διότι κατά την επιμήκυνση λόγω εφελκυσμού μειώνεται η διατομή του δοκιμίου. Έτσι ενώ το φορτίο παραμένει σταθερό η τάση αυξάνεται πραγματικά. Θα ήταν προτιμότερο να γίνονται τα πειράματα υπό σταθερή τάση αλλά αυτό απαιτεί πολύ ακριβές πειραματικές διατάξεις και δεν συνηθίζεται.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3, όσο αυξάνεται η τάση, η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού αυξάνεται.



Σχ. 1.3 Τυπική μορφή καμπύλης ερπυσμού για διάφορες τάσεις.

Ανάλογα μεταβάλλεται η μορφή της καμπύλης παραμόρφωσης-χρόνου με ίδια τάση αλλά διαφορετική θερμοκρασία (Σχήμα 1.4). Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα παραμόρφωσης του υλικού λόγω ερπυσμού.



Σχ. 1.4 Τυπική μορφή καμπύλης ερπυσμού για διάφορες Θερμοκρασίες.

Για την σχεδίαση των εγκαταστάσεων που θα λειτουργούν σε συνθήκες όπου εμφανίζεται το φαινόμενο του ερπυσμού είναι υποχρεωτικό να προβλεφθεί η συμπεριφορά του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί σε μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και φορτίσεις. Μία τέτοια πρόβλεψη προϋποθέτει την γνώση μεγάλου αριθμού δεδομένων και απαιτεί την διεξαγωγή πολυάριθμων δοκιμών και μακροχρόνιων πειραμάτων. Διευκολύνεται όμως όταν είναι γνωστοί οι νόμοι που συνδέουν:

- A) τις ταχύτητες παραμόρφωσης με την τάση, υπό σταθερή θερμοκρασία,
- B) τις ταχύτητες παραμόρφωσης με την θερμοκρασία υπό σταθερή τάση.

Η ανάγκη λοιπόν για μοντελοποίηση της ερπυστικής συμπεριφοράς ενός υλικού κάτω από διαφορετικές συνθήκες καταπόνησης είναι επιτακτική.

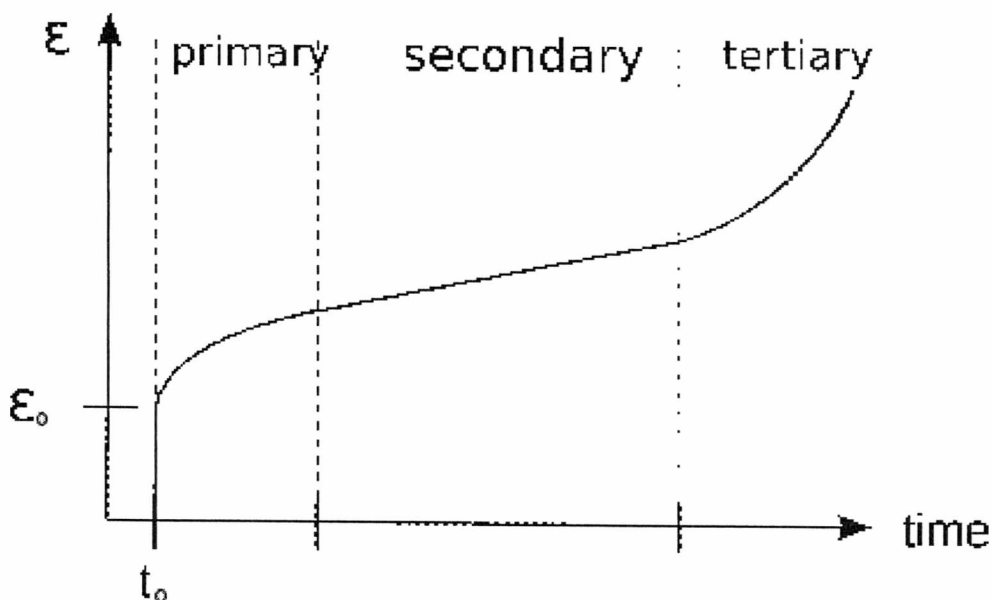
## 1.4 Τυπική συμπεριφορά υλικού στον ερπυσμό

Η τυπική συμπεριφορά ενός υλικού σε ερπυσμό αποδίδεται στο σχήμα 1.4 σε ένα διάγραμμα παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - χρόνου  $t$ . Στον άξονα των παραμορφώσεων παρατηρείται αρχικά η παραμόρφωση του υλικού  $\varepsilon_0$ , η οποία επέρχεται στιγμιαία μόλις επιβληθεί το σταθερό φορτίο. Για την ακρίβεια μέρος της παραμόρφωσης αυτής μπορεί να είναι και ανελαστική και να χρειάζεται κάποιο χρόνο για να μηδενιστεί όταν αρθεί το φορτίο, όμως μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ως ελαστική και να αφαιρεθεί από την συνολική παραμόρφωση του ερπυσμού.

Στην συνέχεια η παραμόρφωση προχωρεί με ταχύ αλλά συνεχώς ελαττούμενο ρυθμό, μέχρι την σταθεροποίηση της ταχύτητας παραμόρφωσης ε' μία έως δύο τάξεις μεγέθους κάτω από την αρχική. Στο στάδιο αυτό η αντοχή ερπυσμού του δοκιμίου αυξάνεται. Το στάδιο αυτό χαρακτηρίζεται ως στάδιο I του ερπυσμού και ονομάζεται πρωτογενής ή μεταβατικός ερπυσμός.

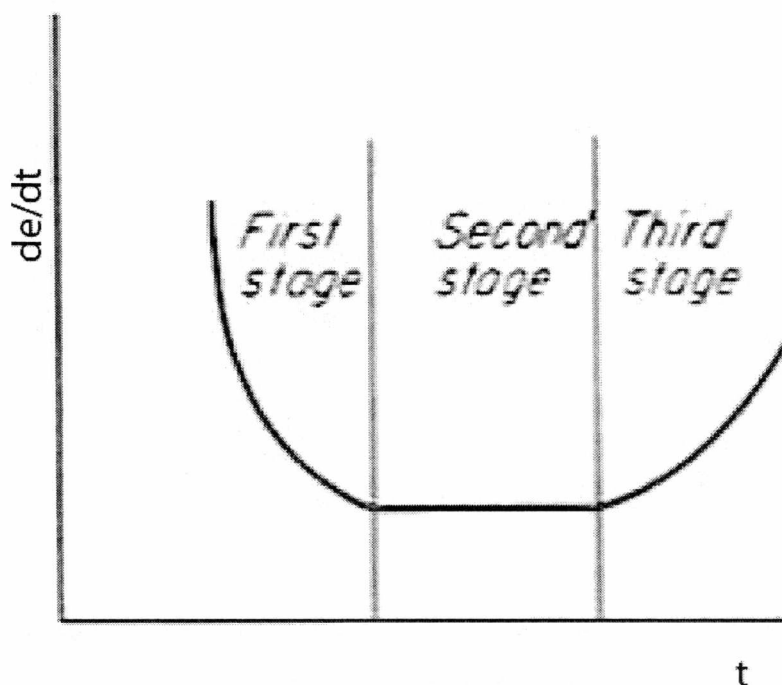
Κατόπιν ο ερπυσμός συνεχίζει με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το στάδιο αυτό, στάδιο II του ερπυσμού, παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και χαρακτηρίζεται ως ερπυσμός σταθερής κατάστασης, ή δευτερογενής ερπυσμός (δεύτερο στάδιο).

Το τελευταίο, ισχυρά ανοδικό τμήμα της καμπύλης είναι το στάδιο III του ερπυσμού και αποδίδει το τελικό στάδιο καταστροφής του υλικού με έντονη παραμόρφωση και την συνακόλουθη ενδεχόμενη θραύση. Χαρακτηρίζεται ως τριτογενής ή επιταχυνόμενος ερπυσμός. Επέρχεται όταν η διατομή του δοκιμίου έχει ελαττωθεί σημαντικά λόγω του σχηματισμού λαιμού.[5]



Σχ. 1.5 Τυπική καμπύλη παραμόρφωσης-χρόνου για το πείραμα του ερπυσμού.

Η διαδοχή των προαναφερθέντων σταδίων του ερπυσμού γίνεται άμεσα αντιληπτή και από την μεταβολή της ταχύτητας του ερπυσμού στη διάρκεια μιας δοκιμής, όπου ξεχωρίζει ξεκάθαρα η φθίνουσα ταχύτητα του πρώτου, η σταθερή ταχύτητα του δεύτερου και η αυξανόμενη ταχύτητα του τρίτου σταδίου του ερπυσμού.

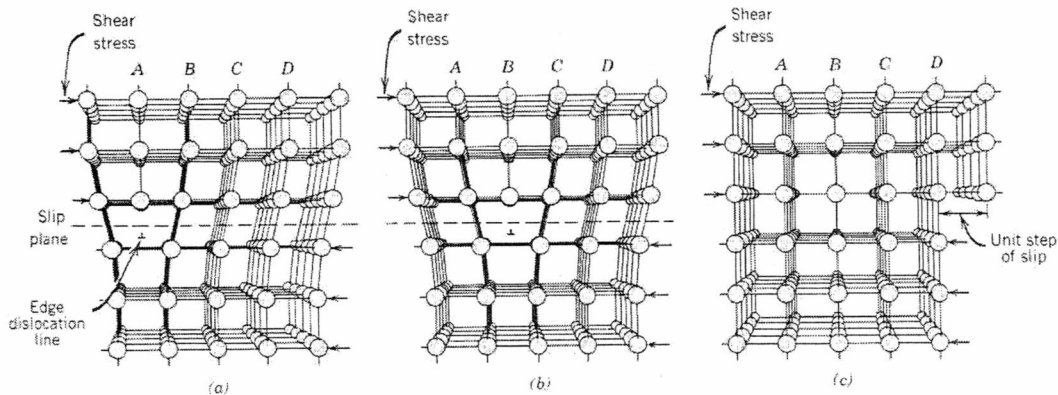


Σχ. 1.6 Τυπική καμπύλη ρυθμού παραμόρφωσης - χρόνου για το πείραμα του ερπυσμού

## 1.5 Μικροδομή

Για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου του ερπυσμού παρατίθεται μια ανάλυση για το πώς λειτουργεί το φαινόμενο μικροσκοπικά. [6]

Οι καταναγκασμοί (dislocations) είναι ελαττωματικές σειρές ατόμων που γλιστράνε μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα όταν ασκείται μία κρίσιμη τάση. Αρχικά γλιστράνε στις διπλανές σειρές ατόμων δημιουργώντας κενά στην κρυσταλλική δομή Σχήμα 1.7.



Σχ. 1.7 Κίνηση καταναγκασμών (dislocations) στο κρυσταλλικό πλέγμα, δημιουργώντας κενά.

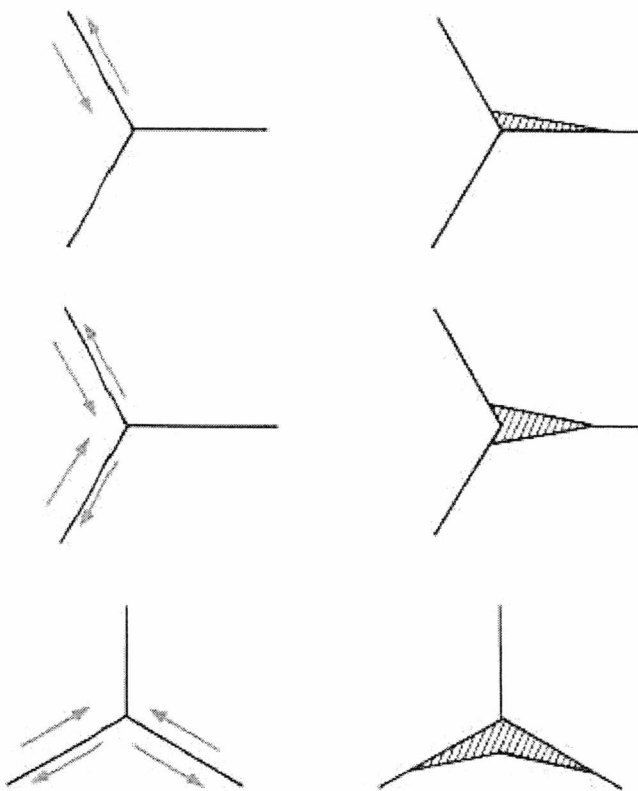
Όσο προχωράει η παραμόρφωση, ακόμα περισσότερα μόρια αποκτούν τέτοια κενά κατάλληλα προσανατολισμένα από την τάση που ασκείται. Οι καταναγκασμοί μπορούν να μπλεχτούν ή να κόψουν ο ένας τον άλλο δημιουργώντας ακόμα περισσότερα κενά. Όταν φτάνουν στα όρια του μορίου, μπορεί να μην καταφέρουν να μεταφερθούν στα διπλανά μόρια εξ αιτίας του διαφορετικού προσανατολισμού, δημιουργώντας έτσι μία συσσώρευση στα όρια του μορίου. Έτσι δημιουργούνται εμπόδια τα οποία χρειάζεται πολλαπλάσια ενέργεια για να περαστούν. Αυτό οδηγεί στην ενδοτράχυνση του μετάλλου, δηλαδή όσο το μέταλλο παραμορφώνεται, τόσο χρειάζεται να ασκηθεί μεγαλύτερη τάση για να συνεχιστεί η πλαστική παραμόρφωση.

Στο πρώτο στάδιο του ερπυσμού αυτό οδηγεί σε ελατούμενο ρυθμό παραμόρφωσης καθώς η τάση παραμένει σταθερή.

Η κίνηση των καταναγκασμών παρεμποδίζεται από εμπόδια όπως: όρια μορίων, προσμείξεις σωματιδίων, τα πεδία των τάσεων γύρω από τα άτομα, ή τα πεδία παραμορφώσεων άλλων καταναγκασμών. Στα εμπόδια αυτά δημιουργούνται συσσωματώματα.

Στο δεύτερο στάδιο του ερπυσμού η συσσωρευμένη αυτή ενέργεια σε συνδυασμό με την αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάνε στην δημιουργία μίας δύναμης επανάκτησης. Κατά την επανάκτηση μειώνεται η πυκνότητα των καταναγκασμών και μεταφέρονται σε στοιβάδες χαμηλότερης ενέργειας. Έτσι οι καταναγκασμοί αλλάζουν στοιβάδες και μπορούν να σκαρφαλώσουν πάνω από τα εμπόδια (climb mechanism). Έχουμε λοιπόν ένα συνδυασμό της ενδοτράχυνσης και της επανάκτησης. Αυτός είναι ο λόγος που στο δεύτερο στάδιο ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι σταθερός.

Η εκδήλωση του τρίτου σταδίου του ερπυσμού είναι ένα σημάδι ότι έχει γίνει ζημιά στη δομή ενός μετάλλου. Κυκλικά και σφηνοειδή κενά μπορούν να παρατηρηθούν γύρω από τα όρια των μορίων. Ο μηχανισμός που κυριαρχεί στο τρίτο στάδιο λέγεται «ολίσθηση στα όρια των κόκκων» (grain boundary slidding). Τα όρια των μορίων από την τάση που δέχονται γλιστράνε μεταξύ τους και δημιουργούν κενά όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8 .



Σχ. 1.8 Ολίσθηση στα όρια των κόκκων (Grain boundary slidding).

Εκεί έρχεται η σταδιακή καταστροφή του υλικού και συνεπώς ο διαρκώς αυξανόμενος ρυθμός παραμόρφωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

## 2 Γενικά

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρατεθούν οι πρόσφατες εξελίξεις πάνω στην μοντελοποίηση του φαινομένου του ερπυσμού. Η ανάγκη ταχύτητας στην εκτίμηση συμπεριφορών κάποιου υλικού βρίσκει επιτακτική την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων. Προσπάθειες μοντελοποίησης έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές και τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες.

### 2.1 Μοντέλα μικροδομής (Microstructure models)

Ο Yin και ο Faulkner [7] χρησιμοποίησαν κλασσική πυρηνική θεωρία προκειμένου να προσομοιώσουν την αποδιοργάνωση των μορίων ασύλληπτου μικρού μεγέθους M23C6 του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παράμετροι που προσεγγίζονται στο μοντέλο τους περιλαμβάνουν την πυκνότητα των επιμέρους εμπύρηνων περιοχών που παρουσιάζονται εξετάζοντας μικροσκοπικά την εσωτερική καρβιδική-φερριτική ενέργεια ανά μονάδα περιοχής. Η θεωρία επίσης ενσωματώνει τις επόμενες προσεγγίσεις, ότι η διάχυση μεταξύ των συστατικών στοιχείων μπορεί να παραμεληθεί, ότι τα τριχοειδή φαινόμενα μπορούν να υπολογιστούν χωρίς την επιρροή των συστατικών στοιχείων κ.τ.λ. Στα πλαίσια αυτά, εξετάζοντας την εκτράχυνση του υλικού, κινήθηκαν ο Venugopalan και ο Kirkaldy.[8]

Τέλος ο Abe [9] εξέθεσε ενδιαφέροντα στοιχεία για την εκτράχυνση των μικροσκοπικών μορίων M23C6 ενός Fe-9Cr-W χάλυβα σαν συνάρτηση του περιεχόμενου βολφραμίου και του χρόνου, κατά την διάρκεια ενός πειράματος ερπυσμού στους 600 °C. Σύμφωνα με τον Abe η προσθήκη βολφραμίου ελαττώνει τον ρυθμό εκτράχυνσης.

## 2.2 Παραμετρικά μοντέλα

Η αντίσταση ενός υλικού στον ερπυσμό είναι αρκετά πολύπλοκη και δεν θα μπορούσε επαρκώς να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Εν τούτοις είναι αναγκαίο να γνωρίζει κανείς την μακροπρόθεσμη ερπυστική συμπεριφορά τέτοιων υλικών για την ασφαλή χρήση τους σε εφαρμογές, όπου αυτό είναι άκρως απαραίτητο, όπως εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας και αεροκινητήρες. Για τον λόγο αυτό ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημιεμπειρικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς επιτρέπει την ακριβή παρουσίαση πειραματικών δεδομένων και την ίδια στιγμή διευκολύνει τον στόχο που δεν είναι άλλος από την εξαγωγή αποτελεσμάτων ικανών να δώσουν χρήσιμα συμπεράσματα συμπεριφοράς ερπυσμού. [10]

Ο ρυθμός παραμόρφωσης του ερπυσμού είναι μια απευθείας μέτρηση της υπολειπόμενης ζωής του υλικού, έτσι ο ασφαλής υπολογισμός τέτοιων δεδομένων είναι ένας κύριος στόχος στον δρόμο μιας όσο το δυνατόν αξιόλογης και ακέραιης εξαγωγής στοιχείων.

Μία αρκετά δημοφιλής μέθοδος είναι το “μοντέλο θ” [11]. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είναι η εξής:

$$\varepsilon = \theta_1[1 - \exp\{-\theta_2 t\}] + \theta_3[\exp\{\theta_4 t\} - 1] \quad (\text{εξ } 2.1)$$

Όπου  $\theta_i$  παράμετροι οι οποίες προσδιορίζονται έτσι ώστε να προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα. Οι δύο πρώτες περιγράφουν το πρώτο και το δεύτερο στάδιο της παραμόρφωσης ερπυσμού ενώ οι υπόλοιποι δύο την επιτάχυνση του φαινομένου (τρίτο στάδιο).

Το δεύτερο και κυρίαρχο στάδιο όπως επιτάσσει η θεωρία του ερπυσμού οδηγεί σε μια εξίσωση της μορφής:

$$\dot{\varepsilon} = \alpha_3 \sigma_n \exp\{-Q/RT\} \quad (\text{εξ } 2.2)$$

Όπου  $\alpha_3$  είναι μια εμπειρική σταθερά. Αυτή η εξίσωση μπορεί να πάρει την μορφή προκειμένου να βρεθεί ο χρόνος θραύσης  $t_r$ , ως εξής:

$$\ln\{t_r\} = \ln\{\varepsilon_r/\alpha_3\} - n \ln\{\sigma\} + Q/RT \quad (\text{εξ } 2.3)$$



Για την πρόβλεψη συμπεριφοράς ενός 2.25Cr-1Mo μία εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε και μπορεί να εξάγει ικανοποιητικά συμπεράσματα είναι η εξής:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + A\{1-\exp(-\alpha_t)\} + B\{\exp(\alpha_t)-1\} \quad (\text{εξ 2.4})$$

Όπου  $\varepsilon_0$ ,  $A, B$  παράμετροι που προσδιορίζονται έτσι ώστε η καμπύλη που προκύπτει να ταυτίζεται με πειραματικά δεδομένα. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με την μέθοδο των παραμέτρων  $\theta$ .

Ο Maruyama [12] κατέληξε ότι ο χρόνος θραύσης μπορεί να συσχετιστεί γραμμικά με την ακόλουθη παράμετρο θραύσης  $P$  που προκύπτει από την εξίσωση ερπυσμού:

$$P = (1/a) \ln \{(\varepsilon_r - \varepsilon_0 - A)/B\} \quad (\text{εξ 2.5})$$

Η πρόβλεψη του χρόνου ζωής μπορεί να γίνει με την συμβολή της παραμέτρου  $P$ . [13,14].

### 2.3 Μοντέλα δικτύου (Neural Network Models)

Τα μοντέλα αυτά είναι μια γενική στατιστική μέθοδος απόκλισης μιας εξαρτημένης στατιστικής μεταβλητής. Τα μοντέλα αυτά κατά κύριο λόγο βασίζονται σε πειράματα που προέκυψαν με στατικές μεθόδους χρησιμοποιώντας προγενέστερες συνήθως εμπειρικές αναλύσεις. Με την μέθοδο αυτή μία ευπροσάρμοστη μη γραμμική συνάρτηση προσαρμόζεται πάνω στα πειραματικά δεδομένα. Λεπτομερείς αναφορές τέτοιων μοντέλων έχουν γίνει αρκετές [15,16]. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να ξεπεράσει δυσκολίες που σχετίζονται με γενικές γραμμικές αποκλίσεις της εξαρτημένης μεταβλητής, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες πρέπει να διαλεχτεί μια ακριβής σχέση εξάρτησης προτού αρχίσει η ανάλυση.[17]

Μιλώντας γενικά ένα τέτοιο μοντέλο δημιουργείται προσδιορίζοντας μία ομάδα παραμέτρων γνωστές ως «συντελεστές βαρύτητας» οι οποίοι συνθέτουν ένα μοντέλο το οποίο προσδιορίζει την διαδρομή από τα εισαχθέντα στα εξαχθέντα στοιχεία [18]. Οι παράμετροι αυτές προσδιορίζονται παίρνοντας ζευγάρια εισαγομένων και εξαγομένων δεδομένων με στόχο την προσεκτική δημιουργία μιας συνάρτησης λάθους [19]. Μια πιθανή δυσκολία που παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας την μη γραμμική απόκλιση είναι η πιθανότητα να συγκλίνουν περισσότερα απ' τα δεδομένα που θα πρεπε. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Bayesian [20] στον έλεγχο της πολυπλοκότητας του μοντέλου μπορεί να λυθεί το πρόβλημα αυτό. Ωστόσο οι «συντελεστές βαρύτητας» δεν

είναι πάντα εύκολο να προσδιοριστούν. Μία καλύτερη μέθοδος είναι να χρησιμοποιείται το «δίκτυο» ώστε να γίνονται προβλέψεις και στη συνέχεια να εφαρμόζονται αυτές οι προβλέψεις σε διάφορα πειραματικά δεδομένα. Η ευαισθησία της μη γραμμικής συνάρτησης σχετίζεται με τον αριθμό των κρυμμένων κόμβων  $i$ .

Η τελική εξαγόμενη μεταβλητή  $y$  (εξαρτημένη μεταβλητή) καθορίζεται ως εξής:

$$y = \sum_i w_i^{(2)} h_i + \theta^{(2)} \quad (\text{εξ 2.6})$$

$$h_i = \tanh(\sum_j w_j^{(1)} x_j + \theta_i^{(1)}) \quad (\text{εξ 2.7})$$

όπου  $x_j$  είναι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η  $y$ ,  $w_i$  συντελεστές βαρύτητας,  $h_i$  σφάλματα. Η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης χρησιμοποιείται διότι μια τέτοια συνάρτηση είναι μη γραμμική και ευέλικτη. Συνδυάζοντας ορισμένες υπερβολικές εφαπτόμενες μαζί δίνεται μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στο μοντέλο κάνοντάς το έτσι πιο πολύπλοκο. Με δεδομένες τις συναρτήσεις και τα βάρη, την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των εισαχθέντων τιμών προσδιορίζεται το δίκτυο ακριβώς.

Όταν το μοντέλο εφαρμόζεται σε εμπειρικά δεδομένα οι παράμετροι προσδιορίζονται έτσι ώστε να δημιουργούν μια μη γραμμική συνάρτηση που επαληθεύει τα δεδομένα αυτά. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα σύνολο συντελεστών και ο προσδιορισμός των συναρτήσεων οι οποίες περιλαμβάνουν τα βάρη.

Στην πλειοψηφία τους σε αυτή την κατηγορία μοντέλων ερπυσμού μπορούν να γίνουν προβλέψεις της ερπυστικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με μεταβλητές που εισάγονται όπως χρόνος, θερμοκρασία ή τάση. Τα διαγράμματα σφαλμάτων των προβλέψεων ποσοτικοποιούν την βεβαιότητα των προβλέψεών τους.

Σημαντική διαφορά ενός μοντέλου αυτής της κατηγορίας με ενός παραμετρικού μοντέλου είναι ότι οι συντελεστές τους δεν έχουν καμία φυσική σημασία.

## 2.4 Σύνθετα μοντέλα

Τα σύνθετα μοντέλα ως επί το πλείστον δεν εισάγουν παραμέτρους στο πρόβλημα όπως γίνεται με κάποιες άλλες διαδικασίες μοντελοποίησης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παρακάτω έρευνα. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένας χάλυβας 9-12% Cr χρησιμοποιήθηκε το σύνθετο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον W.Blum εισάγοντας δεδομένα που προήλθαν από θερμοδυναμικούς υπολογισμούς βασισμένα στην προσέγγιση του Calphad (θερμοδυναμική συνάρτηση). [21]

Το σύνθετο αυτό μοντέλο αποδίδει μια φυσική περιγραφή της συμπεριφοράς του ως προς την παραμόρφωση για υλικά τα οποία έχουν μια ευδιάκριτη ετερογενή αποδιοργάνωση στην δομή τους. Κάποιες από τις παραμέτρους που εισήχθησαν μετρήθηκαν θερμοδυναμικά μέσω κάποιας διάταξης H/Y και στην συνέχεια εισήχθησαν στο κυρίως πρόγραμμα [22]. Έτσι επιτρέπεται η προσέγγιση του προβλήματος με λιγότερες διερευνήσεις που θα αφορούσαν την μικροδομή.

Το σύνθετο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την επιρροή της αλλαγής της δομής των μορίων λόγω κίνησης με συνέπεια την παραμόρφωση που συμβαίνει στα κρυσταλλικά υλικά.

Το μοντέλο κάνει διαχωρισμό των εσωτερικών στοιχειωδών στοιχείων από τα περιμετρικά του υλικού και αναφέρει ως «μαλακές» και «σκληρές» αντίστοιχα τις περιοχές αυτές από πλευράς πλαστικής παραμόρφωσης. Ωστόσο δέχεται για λόγους εναρμόνισης ίση παραμόρφωση και στις δύο περιοχές. Έτσι έχουμε:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{s,pl}} + \sigma_{\text{s}}/E \quad (\text{εξ } 2.8)$$

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{h,pl}} + \sigma_{\text{h}}/E \quad (\text{εξ } 2.9)$$

Ο δεύτερος όρος και στις δύο περιπτώσεις παριστάνει την ελαστική παραμόρφωση. Παίρνοντας την διαφορά των δύο εξισώσεων προκύπτει:

$$E(\varepsilon_{\text{s,pl}} - \varepsilon_{\text{h,pl}}) = \sigma_{\text{h}} - \sigma_{\text{s}} \quad (\text{εξ } 2.10)$$

Η μέση τάση μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα βαρύτητας των αντίστοιχων τάσεων:

$$\sigma = (1-f_{\text{h}})\varepsilon_{\text{s,pl}} + f_{\text{h}} \sigma_{\text{h}} \quad (\text{εξ } 2.11)$$

Όπου  $f_{\text{h}}$  ο συντελεστής βαρύτητας της σκληρής περιοχής δηλαδή του συνόρου και  $(1-f_{\text{h}})$  ο συντελεστής βαρύτητας των εσωτερικών περιοχών. Τότε προκύπτει ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι

$$\varepsilon_{\text{tot}} = (1-f_h)\varepsilon_{s,pl} + f_h\varepsilon_{h,pl} \quad (\text{εξ 2.12})$$

Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι

$$\dot{\varepsilon}_{\text{tot},pl} = (1-f_h) \dot{\varepsilon}_{s,pl} + f_h \dot{\varepsilon}_{h,pl} + f_h(\varepsilon_{h,pl} - \varepsilon_{s,pl}) \quad (\text{εξ 2.13})$$

Τα μέλη αυτής της εξίσωσης είναι συναρτήσεις με παραμέτρους μικροδομής οι οποίες με την σειρά τους είναι συναρτήσεις παραμόρφωσης και θερμοκρασίας.

$$df_h / d\varepsilon_{\text{tot},pl} = 2 \{ (da / d\varepsilon_{\text{tot},pl}) w - a (dw / d\varepsilon_{\text{tot},pl}) \} / w^2$$

Οι σχέσεις κίνησης μπορούν να διατυπωθούν για τοπικούς πλαστικούς ρυθμούς παραμόρφωσης, για τις σκληρές και μαλακές περιοχές αντίστοιχα. Αυτές είναι συναρτήσεις των τοπικών τάσεων και της μικροδομής:

$$\dot{\varepsilon}_s(\sigma_s, X) \text{ και } \dot{\varepsilon}_h(\sigma_h, X)$$

$$k = 8 \sigma V^a m / \{ 9 \sum_{i=1}^c (x^a_i - x^{\beta/a}_i)^2 / [x^{\beta/a}_i \Delta b_i] / RT \}$$

όπου X αντιπροσωπεύει τις διάφορες παραμέτρους μικροδομής.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η ολική παραμόρφωση όπως επίσης και η πλαστική παραμόρφωση μεταξύ κάθε περιοχής. [23,24]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

#### 3 Γενικά για το μοντέλο

Ένα από τα παραμετρικά μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι αυτό που ανέπτυξε στην διδακτορική του διατριβή ο Ν.Βάσιλας [25]. Το μοντέλο έχει κοινά στοιχεία με αυτό των 5-θ και παρουσιάζει μια καλή προσέγγιση στη συμπεριφορά των υλικών στο φαινόμενο του ερπυσμού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το παραπάνω μοντέλο για να προσεγγιστεί η συμπεριφορά του ωστενικού χάλυβα X8 CrNiMoNb 16 16, χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα, από πείραμα που έγινε σε πανεπιστήμιο της Γερμανίας. Ο χάλυβας X8 είναι υψηλής αντοχής στη θερμοκρασία και χρησιμοποιείται κυρίως στην γεννήτριες ατμού που υποβάλλονται σε υψηλές τάσεις.

#### 3.1 Η έννοια της εσωτερικής αντίστασης.

Το παραπάνω μοντέλο εισάγει την έννοια της εσωτερικής αντίστασης (intrinsic resistance), ως παράμετρο δομής του υλικού. Η εσωτερική αντίσταση,  $\sigma_r$ , γίνεται αντιληπτή ως η μακροσκοπική τάση η οποία εκφράζει την αντίσταση στην ανελαστική παραμόρφωση του υλικού κάτω από μηχανικά φορτία. Μαθηματικά το παραπάνω μέγεθος διατυπώνεται σαν μια συνάρτηση τάσης που εξαρτάται από έναν αριθμό παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με μηχανισμούς που οδηγούν σε αύξηση ή μείωση της εσωτερικής αντίστασης του υλικού. Η συνάρτηση αυτή έχει την μορφή:

$$\sigma_r = f(\sigma_{ik}, \sigma_{dk}) \quad (\text{εξ } 3.1)$$

Όπου  $\sigma_{ik}$ ,  $\sigma_{dk}$  είναι οι τάσεις που εκφράζουν τους μηχανισμούς που οδηγούν σε αύξηση της εσωτερικής αντίστασης (ενδοτράχυνση, λόγω αδρανοποίησης των καταναγκασμών εξαιτίας της αλληλεπίδρασης αυτών ή λόγω διασκορπούμενων σωματιδίων κατακρημνίσεων κ.λπ.) και μείωσή της αντίστοιχα (συσσώρευση της φθοράς ερπυσμού λόγω δημιουργίας και αύξηση πόρων ή των ρωγμών, θερμικά ενεργοποιούμενοι μηχανισμοί, μείωση της φέρουσας διατομής λόγω αλλαγής της γεωμετρίας του υλικού κ.λπ.).

Το πλεονέκτημα της εσωτερικής αντίστασης είναι ότι είναι φυσικό μέγεθος με μονάδες τάσης πράγμα που διευκολύνει την κατανόηση της έννοιας της φθοράς και από την διεύθυνση.

### 3.2 Εκτίμηση συμπεριφοράς ερπυσμού

Συνδυάζοντας την εσωτερική αντίσταση με την κινητική εξίσωση ερπυσμού ο N. Βασίλας [25] κατέληξε στην μορφή της ενεργούς τάσης ( $\sigma_{ef}(t) = \sigma - \sigma_r(t)$ ), η οποία πήρε την καταληκτική μορφή:

$$\sigma_{ef}(t) = \sigma_{is} e^{-qt} + (\sigma - (1+\alpha)\sigma_{is}) + \alpha \sigma_{is} e^{nt} \quad (\text{εξ } 3.2)$$

Όπου  $\sigma_{is}$  η τιμή της σταθερής κατάστασης της  $\sigma_i$ ,  $q$  η ταχύτητα με την οποία τείνει το υλικό στο δεύτερο στάδιο ερπυσμού,  $\alpha$  μία σταθερά του υλικού και  $n$  μία παράμετρος που εκφράζει την ταχύτητα συσσώρευσης της τάσης  $\sigma_d$ .

Για την περιγραφή της παραμόρφωσης ερπυσμού θεωρείται ότι για μια στοιχειώδη μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης  $d\epsilon/dt$  απαιτείται μια στοιχειώδης μεταβολή της ενεργούς τάσης  $d\sigma_{ef}$ . Θεωρώντας τη σχέση μεταξύ τους γραμμική διατυπώνεται η ακόλουθη εξίσωση για τη συμπεριφορά ερπυσμού:

$$d\epsilon_c = K d\sigma_{ef} \quad (\text{εξ } 3.3)$$

Απ' την οποία προκύπτει η εξίσωση:

$$\epsilon_c(t) = K \sigma_{is} e^{-qt} + K (\sigma - (1+\alpha)\sigma_{is}) + K \alpha \sigma_{is} e^{nt} \quad (\text{εξ } 3.4)$$

Η παράμετρος  $K$  εξαρτάται από το υλικό και τις συνθήκες φόρτισης.

Η αναλυτική εξίσωση της παραμόρφωσης ερπυσμού προκύπτει μετά από ολοκλήρωση της (3.4) στα όρια:

$$t_1 = 0 \text{ και } \epsilon_c|_{t_1} = 0 \quad \text{έως, } t \text{ και } \epsilon_c(t)$$

Με αποτέλεσμα την εξίσωση:

$$\epsilon_c(t) = (K \sigma_{is} / q) (1 - e^{-qt}) + K (\sigma - (1+\alpha)\sigma_{is}) t + (K \alpha \sigma_{is} / n) (e^{nt} - 1) \quad (\text{εξ } 3.5)$$

Η μορφή των εξισώσεων συμπίπτει φορμαλιστικά με την πρόταση της 5-θ θεώρησης που έχει προταθεί από τους Evans et al. (1985). [18]

Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται στη θεώρηση εσωτερικών παραμέτρων δομής, εισάγοντας το μέγεθος της εσωτερικής αντίστασης ερπυσμού  $\sigma_r$  με διαστάσεις τάσης, για την περιγραφή των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά το φαινόμενο του ερπυσμού. Η αναλυτική μορφή της προτεινόμενης καταστατικής εξίσωσης εξαρτάται από την διατύπωση της εξίσωσης για την εσωτερική αντίσταση  $\sigma_r$ . Η αναλυτική μορφή της καταστατικής εξίσωσης μπορεί να αλλάξει μαθηματική μορφή εάν επιλεγούν διαφορετικές εξισώσεις εξέλιξης της δομής του υλικού, π.χ. στην περίπτωση διαφορετικών ή επιπρόσθετων μηχανισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την περιγραφή του φαινομένου του ερπυσμού.

### 3.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου.

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφορά του ερπυσμού με την βοήθεια των εξισώσεων (3.4) και (3.5) εισάγονται οι συντομογραφίες:

$$\varepsilon_p = K \sigma_{is} / q \quad (\text{εξ } 3.6)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = K (\sigma - (1+\alpha) \sigma_{is}) \quad (\text{εξ } 3.7)$$

$$\dot{\varepsilon}_t = K \alpha \sigma_{is} \quad (\text{εξ } 3.8)$$

Χρησιμοποιώντας τις συντομογραφίες οι δύο μορφές της καταστατικής εξίσωσης παίρνουν την μορφή

$$\dot{\varepsilon}_c(t) = \varepsilon_p q e^{-qt} + \dot{\varepsilon}_s + \dot{\varepsilon}_t e^{nt} \quad (\text{εξ } 3.9)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_p (1 - e^{-qt}) + \dot{\varepsilon}_s t + \dot{\varepsilon}_t/n (e^{nt} - 1) \quad (\text{εξ } 3.10)$$

Γενικά, οι τρεις όροι των παραπάνω εξισώσεων εκφράζουν τα τρία στάδια του ερπυσμού με την σειρά που αυτά εμφανίζονται. Ειδικότερα οι παράμετροι  $\varepsilon_p$  και  $q$  εκφράζουν την παραμόρφωση που συσσωρεύεται κατά το πρώτο στάδιο καθώς και την ταχύτητα με την οποία το υλικό τείνει προς το ομοιόμορφο στάδιο ερπυσμού αντίστοιχα. Το μέγεθος  $\dot{\varepsilon}_s$  είναι η παράμετρος που εκφράζει τον ρυθμό παραμόρφωσης σταθερής κατάστασης ερπυσμού. Η παράμετρος  $\dot{\varepsilon}_t$  εκφράζει την ταχύτητα εκκίνησης της παραμόρφωσης ερπυσμού, εάν το υλικό μετά την άσκηση του φορτίου έμπαινε κατευθείαν στο τρίτο στάδιο. Τέλος η παράμετρος  $n$  είναι ένα μέτρο για την αύξηση της ταχύτητας ερπυσμού στο τρίτο στάδιο.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $\varepsilon_p$ ,  $q$ ,  $\dot{\varepsilon}_s$ ,  $\dot{\varepsilon}_t$  και  $n$  που είναι απαραίτητες για την συμπεριφορά του ερπυσμού με τις σχέσεις (3.9) και (3.10), ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία, η οποία πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MATLAB και βασίζεται στην φυσική σημασία της κάθε μιας από τις παραπάνω πέντε παραμέτρους.

### 3.3.1 Διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων.

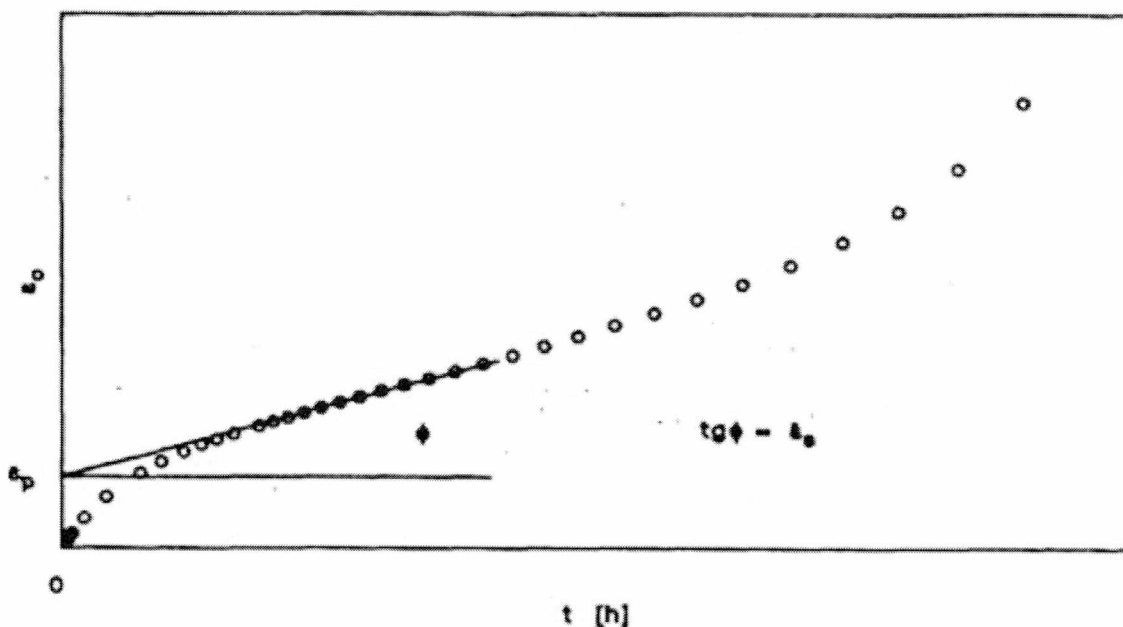
Οι πέντε παράμετροι υπολογίστηκαν πρώτα προσεγγιστικά με βάση την φυσική τους σημασία και στην συνέχεια ελαχιστοποιήθηκε η απόκλισή τους από τα πειραματικά δεδομένα με την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων βαρύτητας (Robust bisquare weights).

Παράμετρος  $\epsilon_s$ :

Φυσική σημασία: ρυθμός παραμόρφωσης του δευτέρου σταδίου του ερπυσμού.

Η προσέγγιση της παραμέτρου  $\epsilon_s$  έγινε χρησιμοποιώντας το τυπικό διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου.

Το μέγεθος της παραμέτρου  $\epsilon_s$  είναι η κλίση της ευθείας στην ομοιόμορφη περιοχή του ερπυσμού, όπως φαίνεται από το σχήμα 1.



Σχ. 4.1 Ποιοτική γραφική παράσταση προσδιορισμού των παραμέτρων  $\epsilon_p$  και  $\epsilon_s$ .

Παράμετρος  $\epsilon_p$ :

Φυσική σημασία: Παραμόρφωση που συσσωρεύεται κατά το πρώτο στάδιο του ερπυσμού.

Το μέγεθος της  $\epsilon_p$  ορίζεται από την τομή της ευθείας του δευτέρου σταδίου ερπυσμού με τον άξονα  $t = 0$ , (σχήμα 1).



Παράμετρος  $q$ :

Φυσική σημασία: Ταχύτητα με την οποία το υλικό φτάνει στο ομοιόμορφο – δεύτερο στάδιο ερπυσμού.

Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου  $q$  κατασκευάζεται το διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s)$  vs.  $t$ . Στην περιοχή του πρώτου σταδίου ο τρίτος όρος της εξίσωσης θεωρείται αμελητέος. Έτσι η εξίσωση (3.9) παίρνει την μορφή:

$$\dot{\epsilon}_c(t) = \epsilon_p q e^{-qt} + \dot{\epsilon}_s \quad (\text{εξ } 3.11)$$

Λογαριθμίζοντας παίρνει την μορφή:

$$\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s) = \ln(\epsilon_p q) - qt \quad (\text{εξ } 3.12)$$

Η εξίσωση (3.12) υπονοεί ότι τα πειραματικά στοιχεία αν παρασταθούν σε διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s)$  vs.  $t$ , θα βρίσκονται σε ευθεία γραμμή. Όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.1 η προσέγγιση αυτή είναι ρεαλιστική με εξαίρεση τα πολύ αρχικά στάδια της πρώτης φάσης του ερπυσμού. Αντίθετα κοντά στην περιοχή εκκίνησης ( $t \rightarrow t_1 = 0$ ), η μορφή της καμπύλης των πειραματικών σημείων αλλάζει και η κλίση της αυξάνει γρηγορότερα. Η παράμετρος  $q$  υπολογίστηκε γραφικά από την κλίση της ευθείας που σχηματίζουν τα πειραματικά σημεία (σχήμα 4.2).

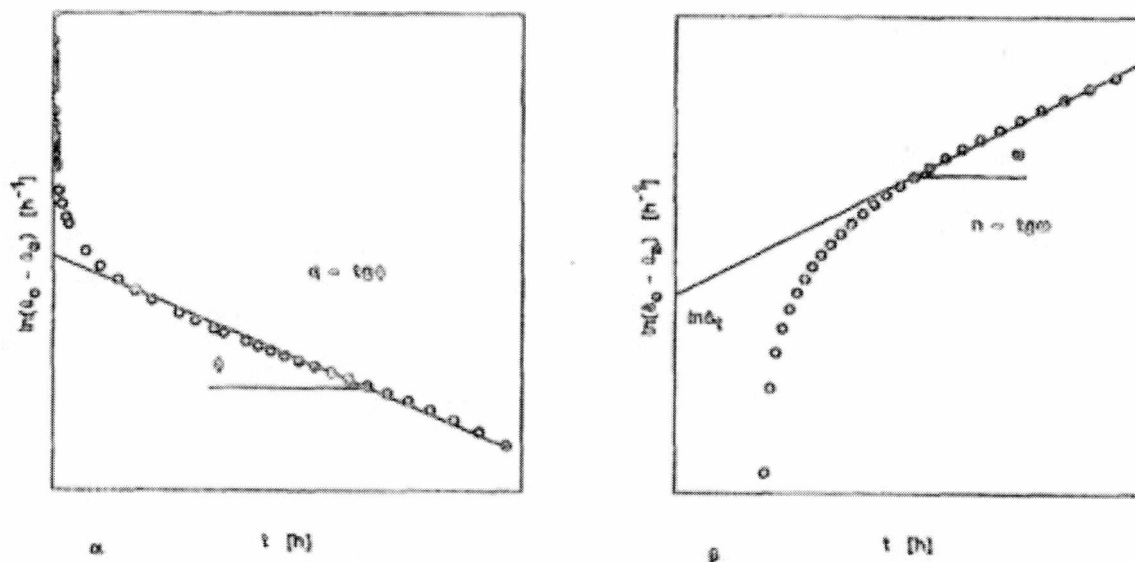
Η εξομοίωση της καμπύλης ερπυσμού με την σχέση (3.12) για την περιοχή του πρώτου σταδίου αναμένεται να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της παραμόρφωσης ερπυσμού στην περιοχή εκκίνησης. Για τον λόγο αυτό το παρών μοντέλο αναμένεται να οδηγήσει σε ικανοποιητική περιγραφή της συμπεριφοράς ερπυσμού σε υλικά όπου η μεταβολή του ρυθμού παραμόρφωσης στο πρώτο στάδιο δεν είναι πάνω από δύο τάξεις μεγέθους.

Παράμετρος  $\dot{\epsilon}_t$ :

Φυσική σημασία: ταχύτητα εκκίνησης της παραμόρφωσης ερπυσμού, εάν το υλικό μετά την άσκηση του φορτίου έμπαινε κατευθείαν στο τρίτο στάδιο.

Παράμετρος  $n$ :

Φυσική σημασία: Η παράμετρος  $n$  είναι μέτρο για την αύξηση της ταχύτητας ερπυσμού στο τρίτο στάδιο.



Σχ. 4.2 Ποιοτική γραφική παράσταση προσδιορισμού των παραμέτρων  $q$ ,  $n$  και  $\dot{\epsilon}_t$ .

Για την περιοχή του τρίτου σταδίου ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.9) θεωρείται αμελητέος και η εξίσωση (3.9) γράφεται στην μορφή:

$$\dot{\epsilon}_c(t) = \dot{\epsilon}_s + \dot{\epsilon}_t e^{nt} \quad (\text{εξ } 3.13)$$

Λογαριθμίζοντας παίρνει την μορφή:

$$\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s) = \ln(\dot{\epsilon}_t) + nt \quad (\text{εξ } 3.14)$$

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη ανάλυση, η εξίσωση (3.14) υπονοεί ότι τα πειραματικά σημεία της περιοχής του τρίτου σταδίου, εάν παρασταθούν σε διάγραμμα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s)$  vs.  $t$ , βρίσκονται σε μια ευθεία. Η προσέγγιση αυτή είναι ρεαλιστική εκεί όπου οι μηχανισμοί του τρίτου σταδίου είναι κυρίαρχοι. Κοντά στο δεύτερο στάδιο, η αλληλεπίδραση τρίτου και δεύτερου σταδίου είναι σημαντική και η επίδραση των μηχανισμών είναι συγκρίσιμη.

Η παράμετρος  $\dot{\epsilon}_t$  υπολογίστηκε γραφικά από την κλίση της ευθείας που σχηματίζουν τα πειραματικά σημεία του τρίτου σταδίου, ενώ η παράμετρος  $n$  προκύπτει από την τομή της προέκτασης της ευθείας εξομοίωσης με τον άξονα  $\ln(\dot{\epsilon}_c - \dot{\epsilon}_s)$  στην θέση  $t_1 = 0$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.

Η εξομοίωση της καμπύλης ερπυσμού για το τρίτο και δεύτερο στάδιο με την σχέση (3.14) αναμένεται να οδηγήσει σε σχετική υπερεκτίμηση της παραμόρφωσης ερπυσμού. Η υπερεκτίμηση αυτή βελτιώνει αριθμητικά την υστέρηση στην παραμόρφωση που προβλέπεται με την επιλεγείσα προσομοίωση του πρώτου σταδίου.

### 3.3.2 Βελτίωση αποτελεσμάτων με την βοήθεια ελάχιστων τετραγώνων βαρύτητας.

Αφού εκτιμηθήκαν προσεγγιστικά οι παράμετροι της εξίσωσης, βελτιώθηκαν ώστε να μειωθούν οι αποκλίσεις από τα πειραματικά σημεία με την μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων βαρύτητας στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB.

Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων μικραίνει το σφάλμα ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των σημείων της εξίσωσης από τα πειραματικά σημεία. Δηλαδή στην εξίσωση:

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{εξ 3.15})$$

$S=S_{\min}$ . Όπου  $n$  ο αριθμός των σημείων,  $y_i$  η τεταγμένη των πειραματικών σημείων και  $\hat{y}_i$  η τεταγμένη των σημείων της εξίσωσης στην αντίστοιχη θέση.

Επειδή όμως τα σημεία έχουν προκύψει από πείραμα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κάποια σημεία να είναι πολύ μακριά από εκεί που τα περιμένουμε λόγω πειραματικού σφάλματος. Εκεί έρχεται η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων βαρύτητας για να περιορίσει την επίδραση που έχουν αυτά τα σημεία μειώνοντας την βαρύτητά τους στην τελική εξίσωση. Έτσι η εξίσωση που πρέπει πλέον να γίνει ελάχιστη είναι η

$$s = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{εξ 3.16})$$

Όπου  $w_i$  είναι η βαρύτητα του κάθε σημείου η οποία εξαρτάται από το πόσο μακριά είναι το σημείο από την καμπύλη. Έτσι τα μεγάλα σφάλματα σχεδόν εξαλείφονται και τα μικρά έχουν μικρότερη βαρύτητα στο τελικό αποτέλεσμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### 4.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δοκίμια από τον χάλυβα X8 CrNiMoNb 16 16 με ενεργό μήκος 50 mm και διάμετρο 10 mm στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες και τάσεις.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (MPa)	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
120	8	700°C
140	8	700°C
160	4	700°C
180	9	700°C
200	8	700°C

Πίνακας 4.1 Κατηγοριοποίηση δοκιμίων.

Κωδικός πειράματος	Ονομαστική τάση (MPa)
8067	100
80380	120
80381	120
80409	120
80410	120
80411	120
80420	120
80421	120
80422	120
80401	140
80402	140
80403	140
80404	140

Κωδικός πειράματος	Ονομαστική τάση (MPa)
80405	140
80406	140
804001	140
804061	140
80387	160
80389	160
80390	160
80393	160
80366	180
80367	180
80370	180
80394	180
80396	180

Κωδικός πειράματος	Ονομαστική τάση (MPa)
80397	180
80398	180
80399	180
80400	180
80382	200
80383	200
80384	200
80385	200
80386	200
80388	200
80391	200
80392	200

Πίνακας 4.2 Κατηγοριοποίηση των πειραμάτων.

Οι αναγνώσεις των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης και του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου λήφθηκαν κατά τη διάρκεια κάθε μιας από αυτές τις δοκιμές και παρατηρήθηκαν οι καμπύλες ερπυσμού οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου.

Όλα τα πειράματα για αυτό το υλικό έγιναν σε σταθερή θερμοκρασία 700°C.

Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν ως αποτέλεσμα της χρήσης του μοντέλου πάνω στα πειραματικά δεδομένα φαίνονται στον πίνακα 4.3 .

Κωδικός πειράματος	Ονομαστική τάση (MPa)	$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon'_s$	$\epsilon'_t$	$n$
8067	100	0,0005236	0,0756	0,000004217	0,000001555	0,0019
80380	120	0,00171	0,909	0,00000871	0,00002132	0,00749
80381	120	0,002037	0,64092	0,000008981	0,000023715	0,00767
80409	120	0,0028	1,03	0,0000058	0,00004725	0,008827
80410	120	0,002256	0,48	0,00000572	0,00000941	0,0051
80411	120	0,0021658	0,41	0,00001239	1,781E-07	0,00045
80420	120	0,0019	0,12	0,00000317	0,00000002	0,036
80421	120	0,0019	0,46	0,0000029	9,42E-08	0,004
80422	120	0,001615	0,41	0,0000043	0,000000321	0,00393
80401	140	0,00474	0,75	0,0000595	0,0000186	0,0278
80402	140	0,00774	0,63	0,0000535	0,00003806	0,017177
80403	140	0,002448	0,68	0,0000263	0,0000072	0,0266
80404	140	0,003375	0,64	0,00000581	0,00001138	0,01025
80405	140	0,0042	2,619	0,0000232	0,000052	0,0271
80406	140	0,0055	1,27	0,000021	0,000102	0,0208
804001	140	0,0047	1,22	0,000072	0,000009	0,033
804061	140	0,011172	1,95	0,000089	0,0001213	0,0253
80387	160	0,008265	2,132	0,000319	0,0000122	0,09504
80389	160	0,00342	1,848	0,0001314	0,00001917	0,041303
80390	160	0,01104	3,24	0,0001375	0,00001314	0,042723
80393	160	0,0044	1,08	0,0000599	0,0000224	0,0245
80366	180	0,0099	0,98	0,0000552	0,00000403	0,031185
80367	180	0,013286	3,0101	0,0000681	0,0000151	0,0343
80370	180	0,00874	1,422	0,0000523	0,0000086	0,032769
80394	180	0,0123	2,11	0,000086	1,045E-08	0,15741
80396	180	0,00784	3,93	0,000221	0,0000042	0,122
80397	180	0,016758	4,389	0,000398	0,000301	0,146
80398	180	0,01764	4,862	0,00291	0,0000116	0,243
80399	180	0,013	5,964	0,000229	0,000037	0,155
80400	180	0,01001	6,16	0,000123	0,0000132	0,070296
80382	200	0,005795	2,336	0,000010934	0,0000084	0,18312
80383	200	0,01067	1,845	0,000051	0,00002816	0,021
80384	200	0,01666	3,688	0,000513	0,000013	0,1683
80385	200	0,020907	2,13	0,000624	0,00008772	0,13056
80386	200	0,01995	2,412	0,000514	0,0000625	0,14948
80388	200	0,02755	5,355	0,00189	0,00001111	0,324
80391	200	0,01785	5,832	0,001474	0,00002852	0,26418
80392	200	0,022	4,22	0,00141	0,0000431	0,261

Έπειτα παρατίθεται η προσαρμογή της εξίσωσης (3.10) στα διαγράμματα παραμόρφωσης - χρόνου και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης - χρόνου για κάθε τάση για κάθε πείραμα ξεχωριστά καθώς και τα συγκεντρωτικά διαγράμματα παραμόρφωσης - χρόνου και ρυθμού μεταβολής παραμόρφωσης - χρόνου για κάθε τάση. Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα παραμόρφωσης - χρόνου των πειραμάτων και της εξίσωσης που προκύπτει από την μέση τιμή των παραμέτρων για κάθε τάση.

Συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.1.1 φαίνεται το πείραμα 8067 που είναι το μόνο στην τάση 100 MPa.

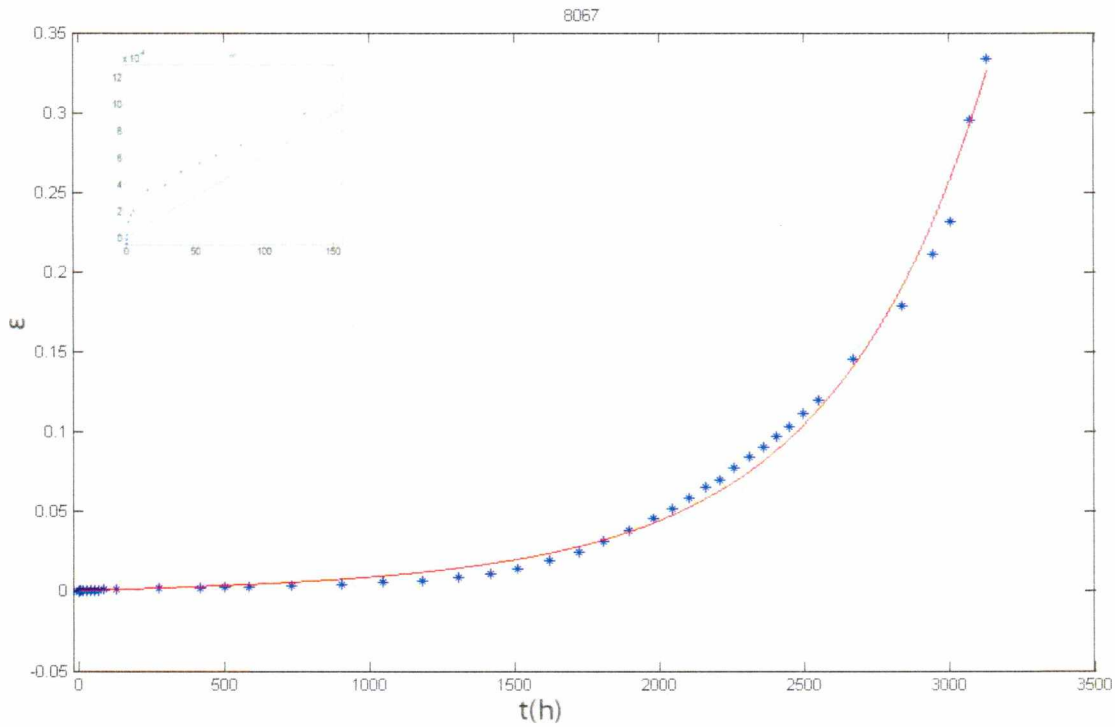
Έπειτα στο σχήμα 4.2.2 φαίνονται όλα τα πειράματα της τάσης **120** MPa συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα. Ακολουθούν από 4.1.3 μέχρι 4.1.10 ένα-ένα τα πειράματα της τάσης 120 MPa.

Στο σχήμα 4.1.11 φαίνονται όλα τα πειράματα της τάσης **140** MPa συγκεντρωτικά και ακολουθούν ξεχωριστά το καθένα στα σχήματα 4.1.12 μέχρι 4.1.19

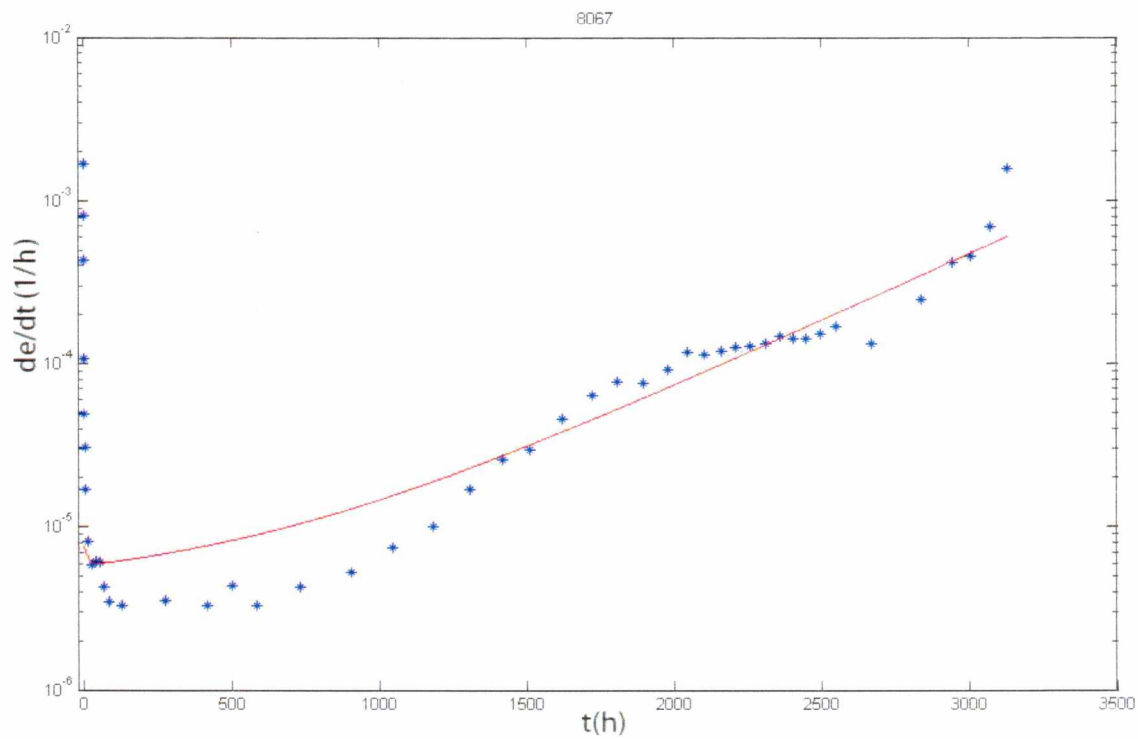
Στο σχήμα 4.1.20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειράματα της τάσης **160** MPa και στα σχήματα 4.1.21 μέχρι 4.1.24 ένα-ένα τα πειράματα της τάσης αυτής.

Ακολουθούν τα πειράματα της τάσης **180** MPa συγκεντρωτικά στο σχήμα 4.1.25 και ξεχωριστά τα πειράματα αυτής της τάσης στα σχήματα 4.1.26 μέχρι 4.1.33

Στο σχήμα 4.1.34 φαίνονται όλα τα διαγράμματα της τάσης **200** MPa συγκεντρωτικά και ακολουθούν τα σχήματα 4.1.35 μέχρι 4.1.42 όπου παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτής της τάσης ένα-ένα.



(α)

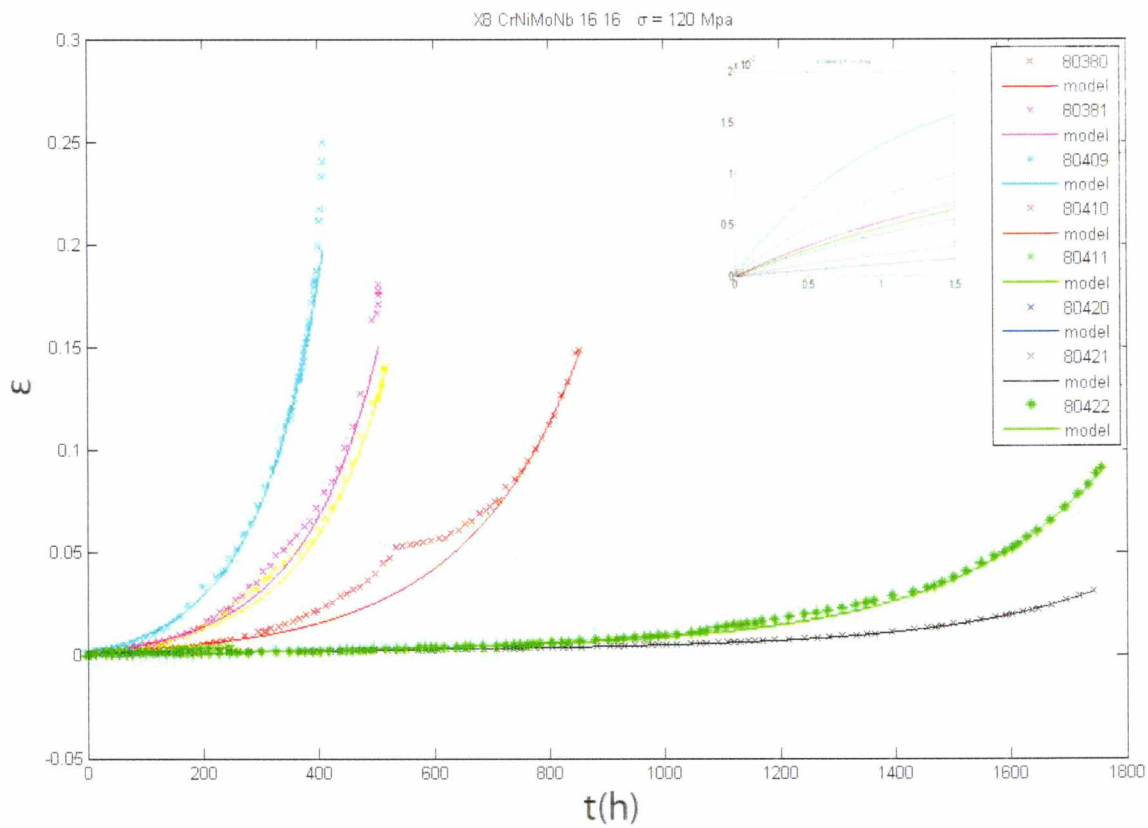


(β)

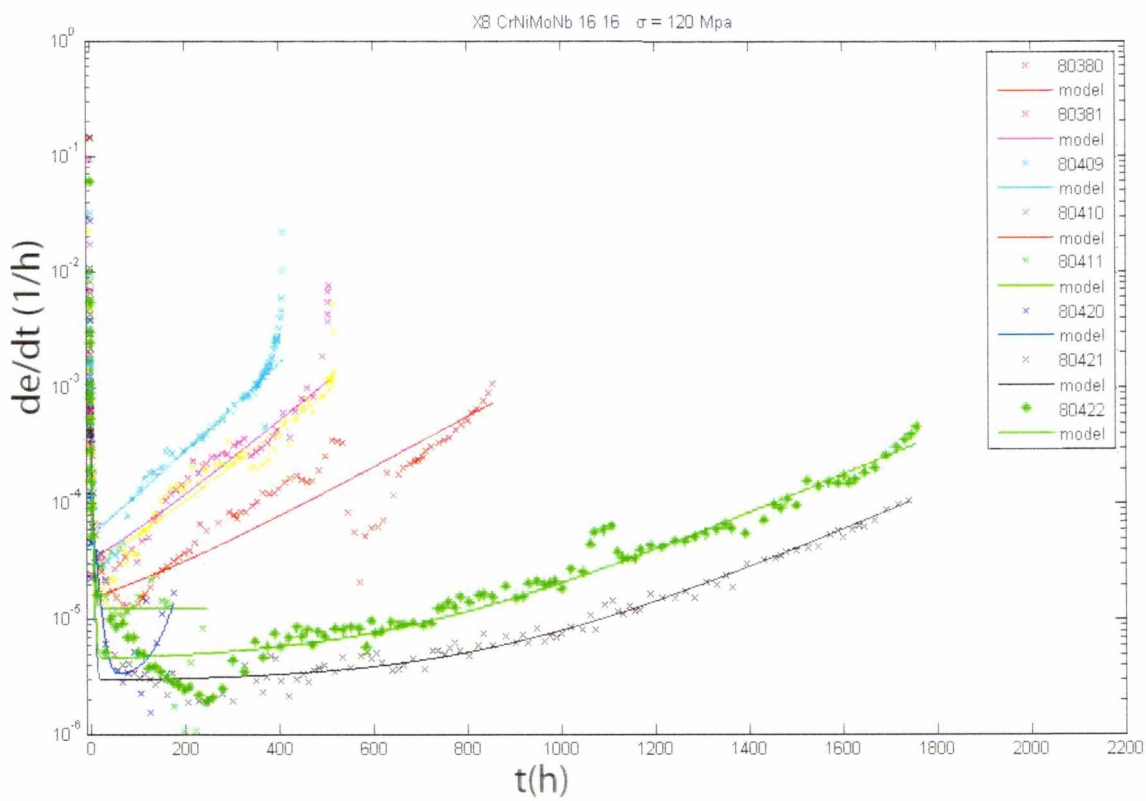
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,000524	0,0756	4,22E-06	1,56E-06	0,0019

Σχ. 4.1.1

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 100 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

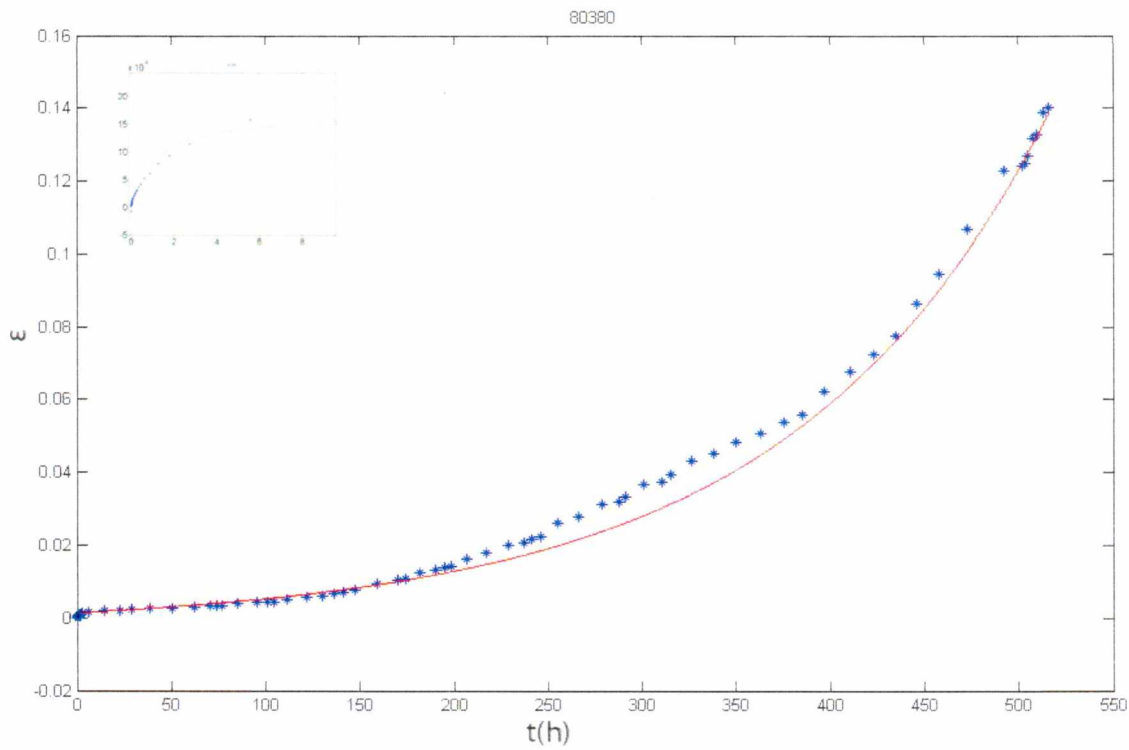


(β)

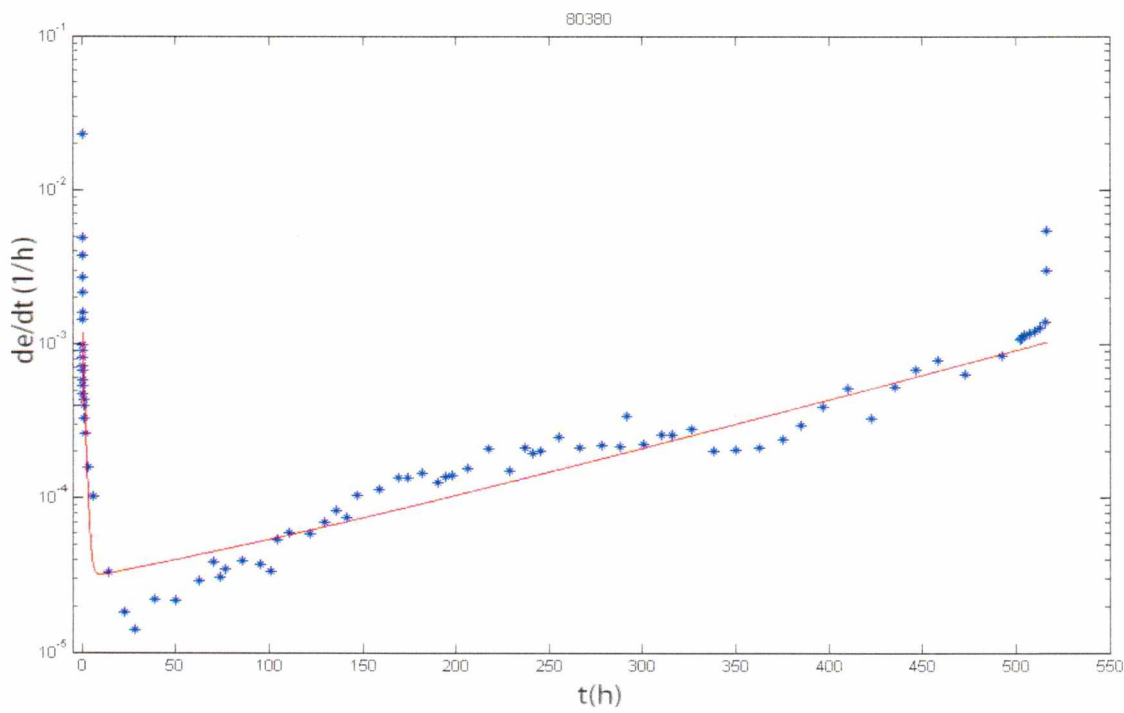
Σχ. 4.1.2

α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 120 Mpa  
 β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $de/dt$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 120 Mpa





(α)

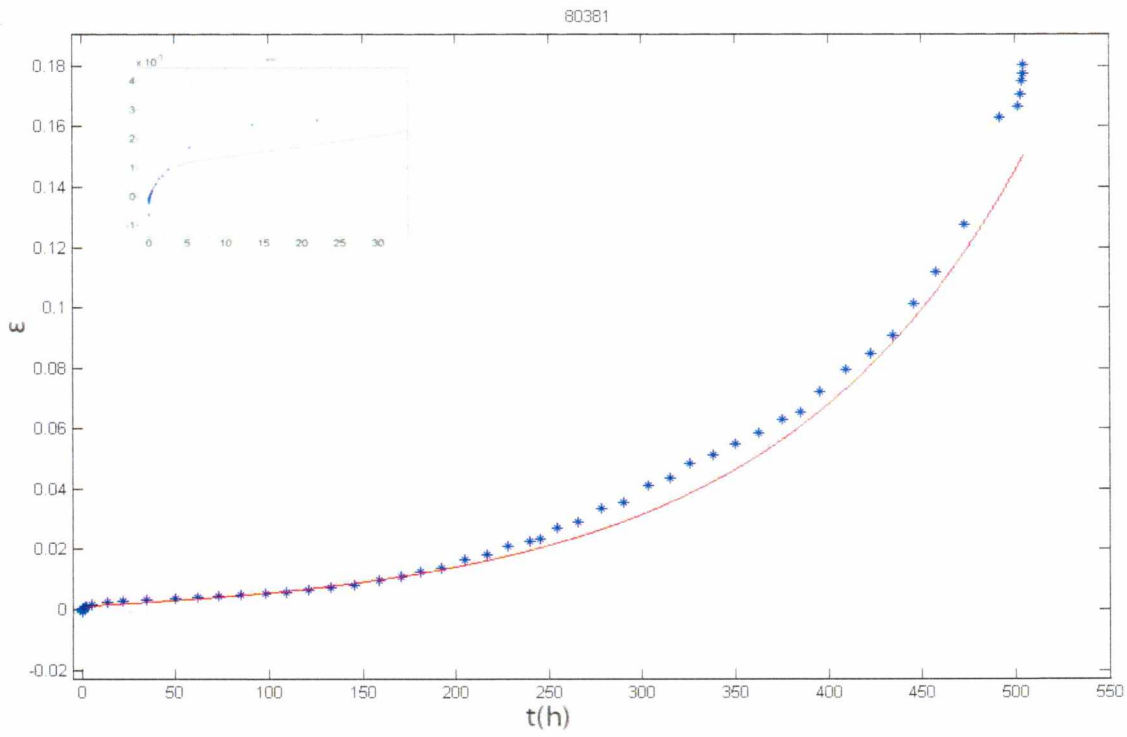


(β)

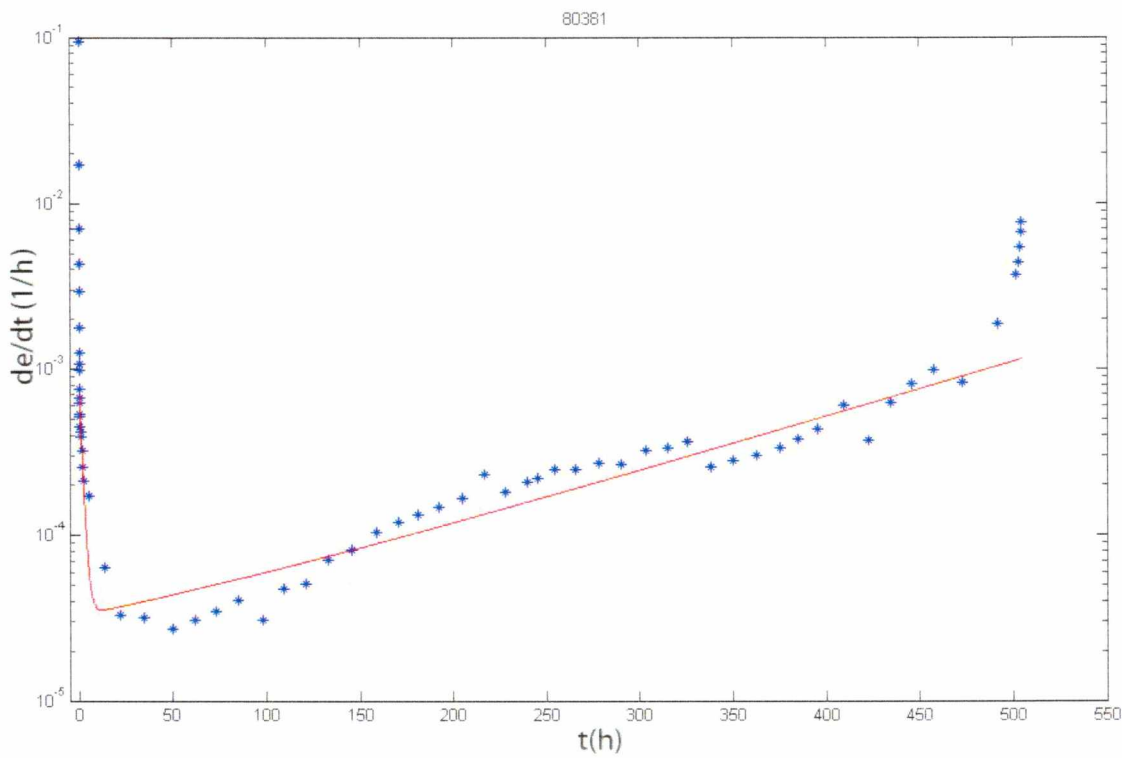
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,00171	0,909	8,71E-06	2,13E-05	0,00749

Σχ. 4.1.3

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

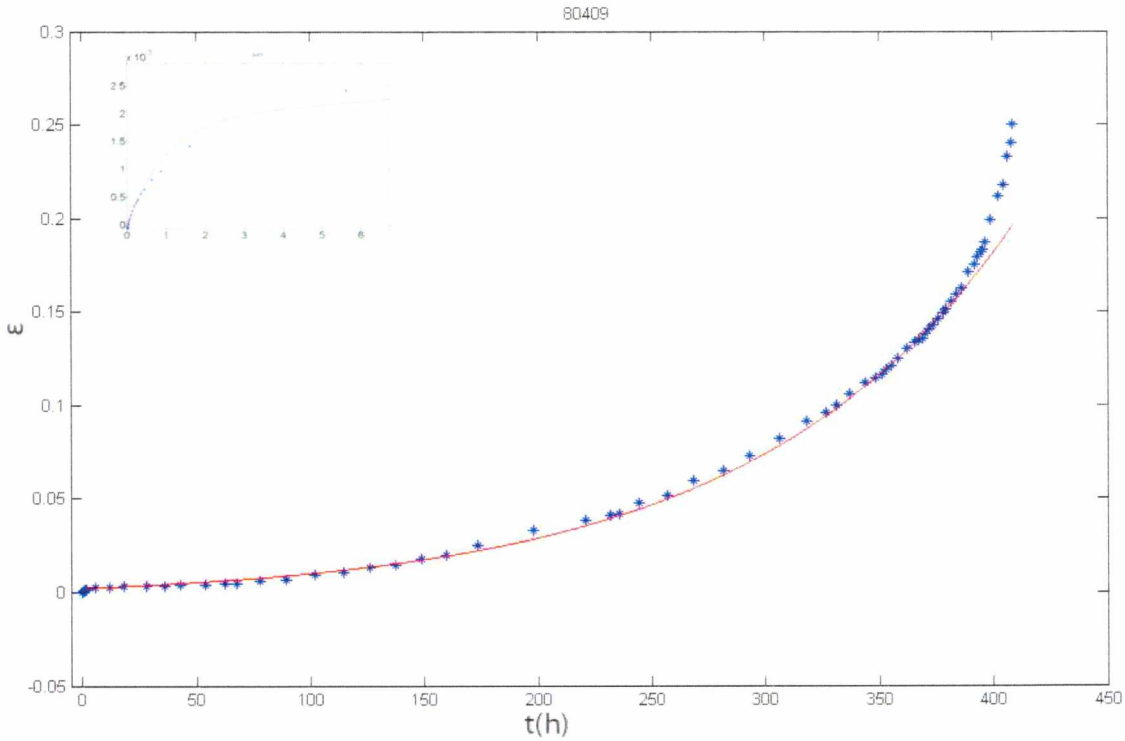


(β)

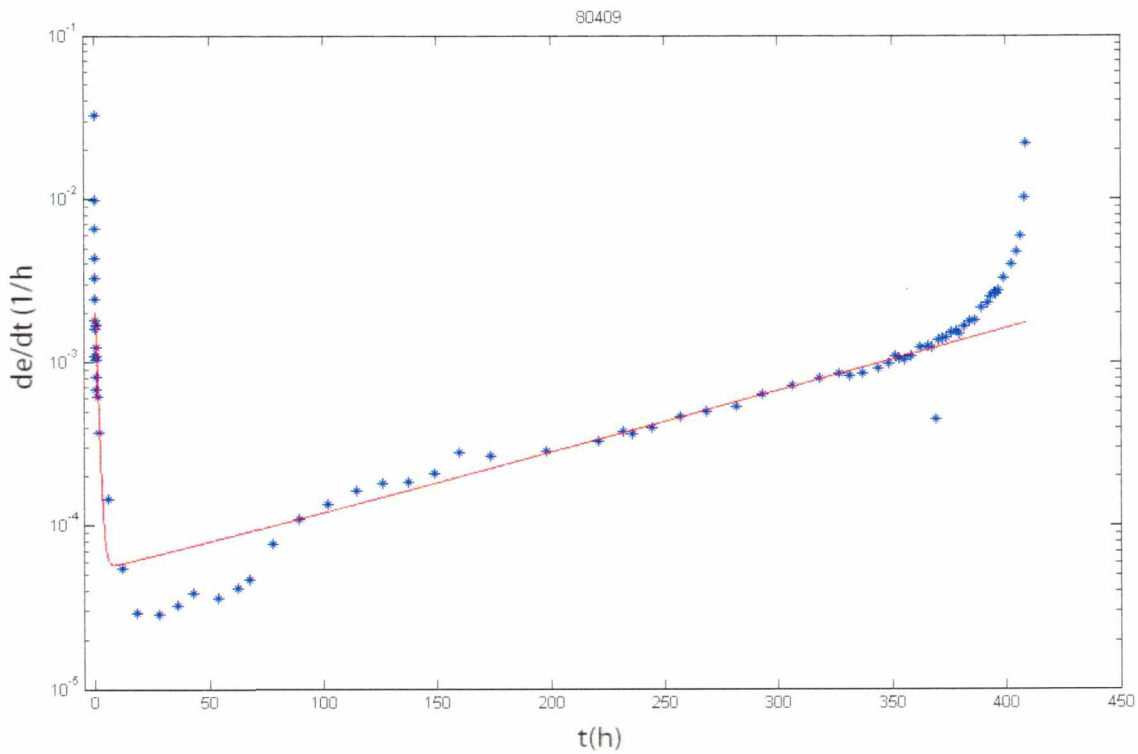
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,002037	0,64092	8,98E-06	2,37E-05	0,00767

Σχ. 4.1.4 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα

β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



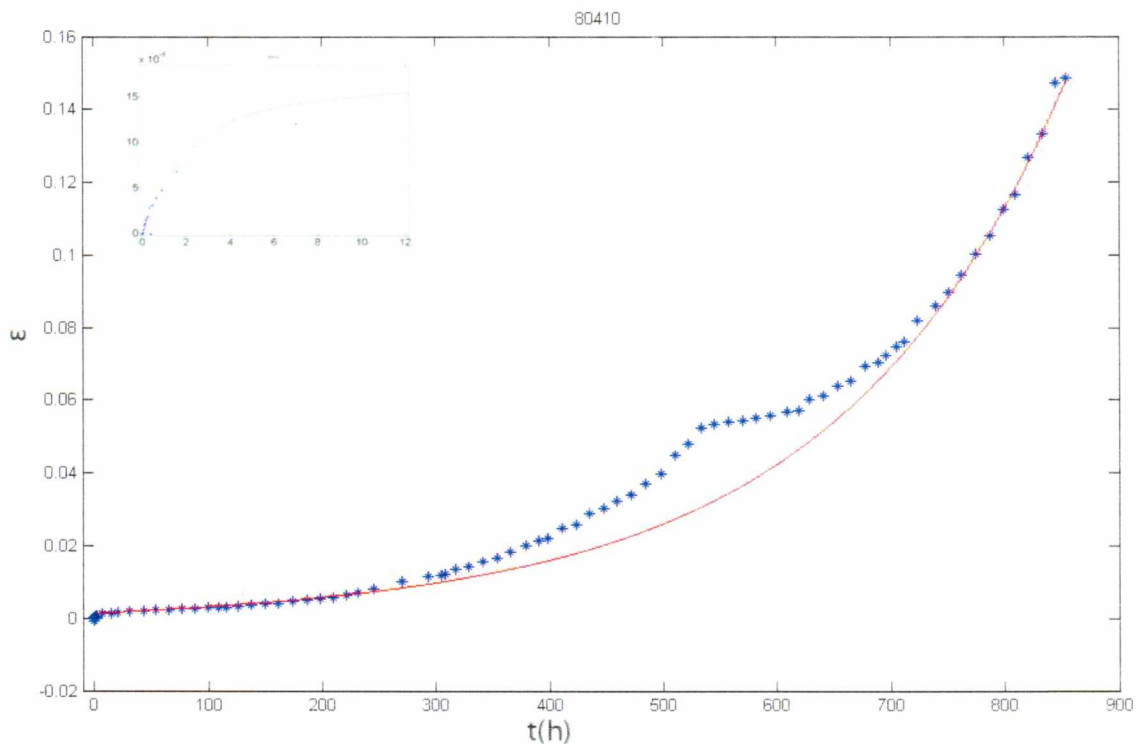
(α)



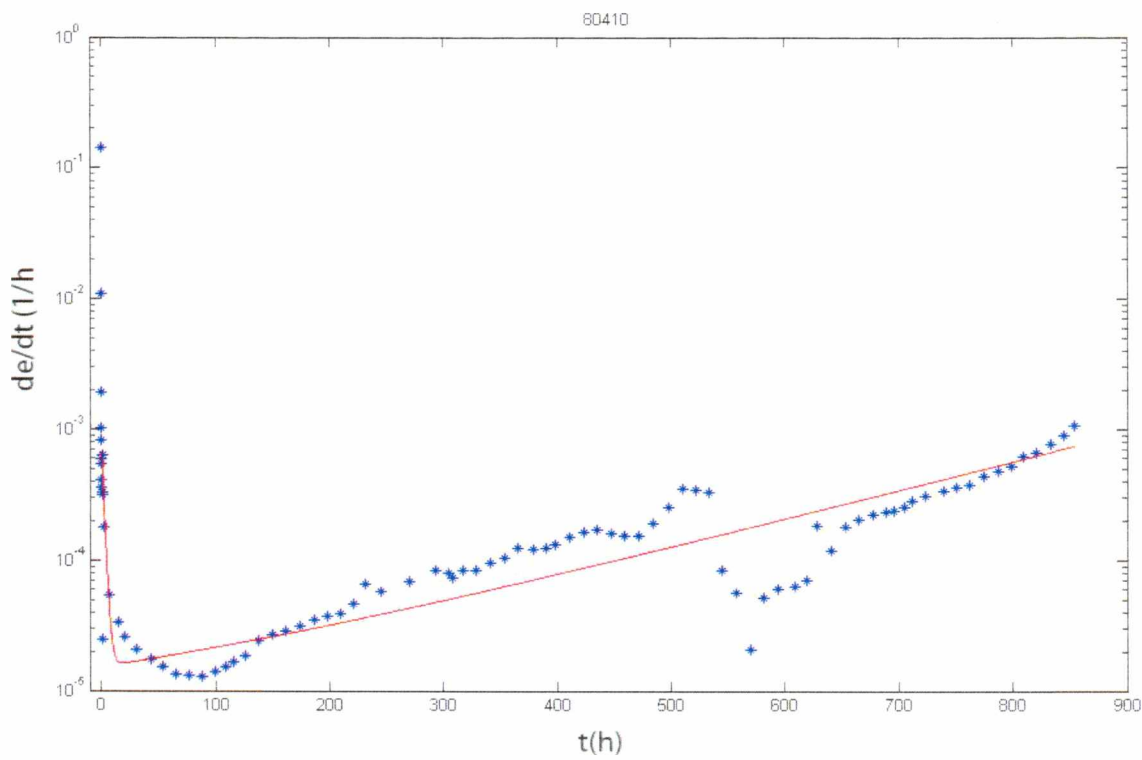
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0028	1,03	5,8E-06	4,73E-05	0,008827

Σχ. 4.1.5 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



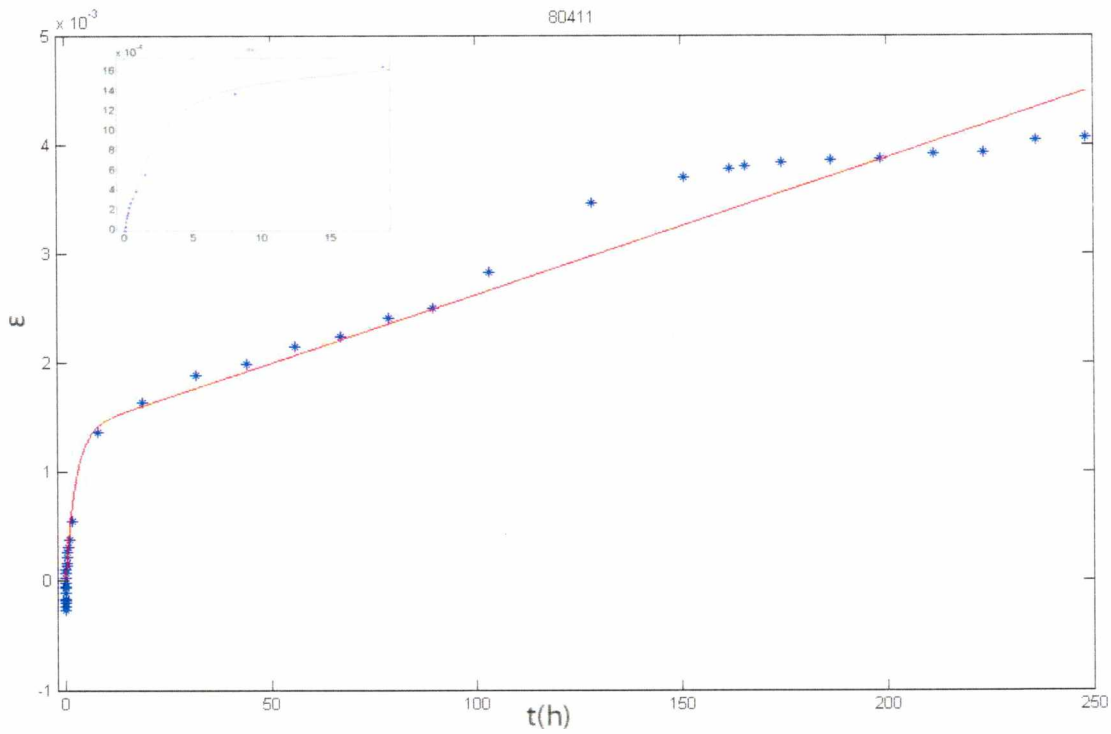
(α)



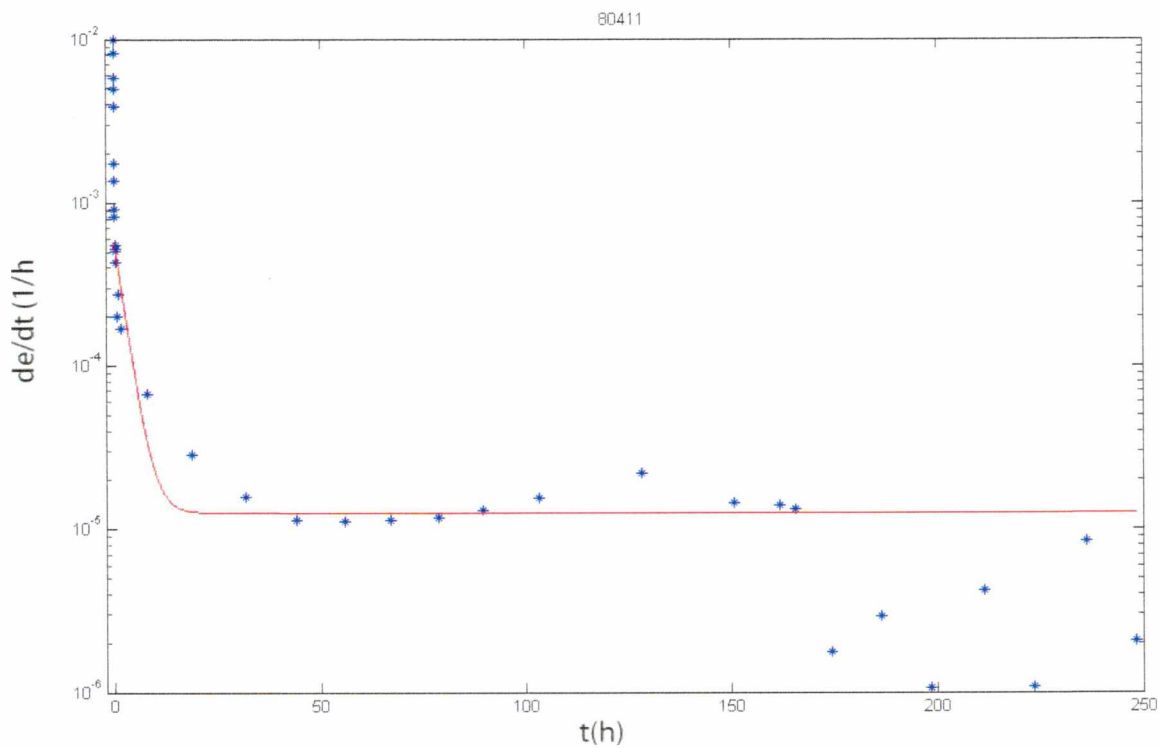
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,002256	0,48	5,72E-06	9,41E-06	0,0051

Σχ. 4.1.6 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 ΜΡα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

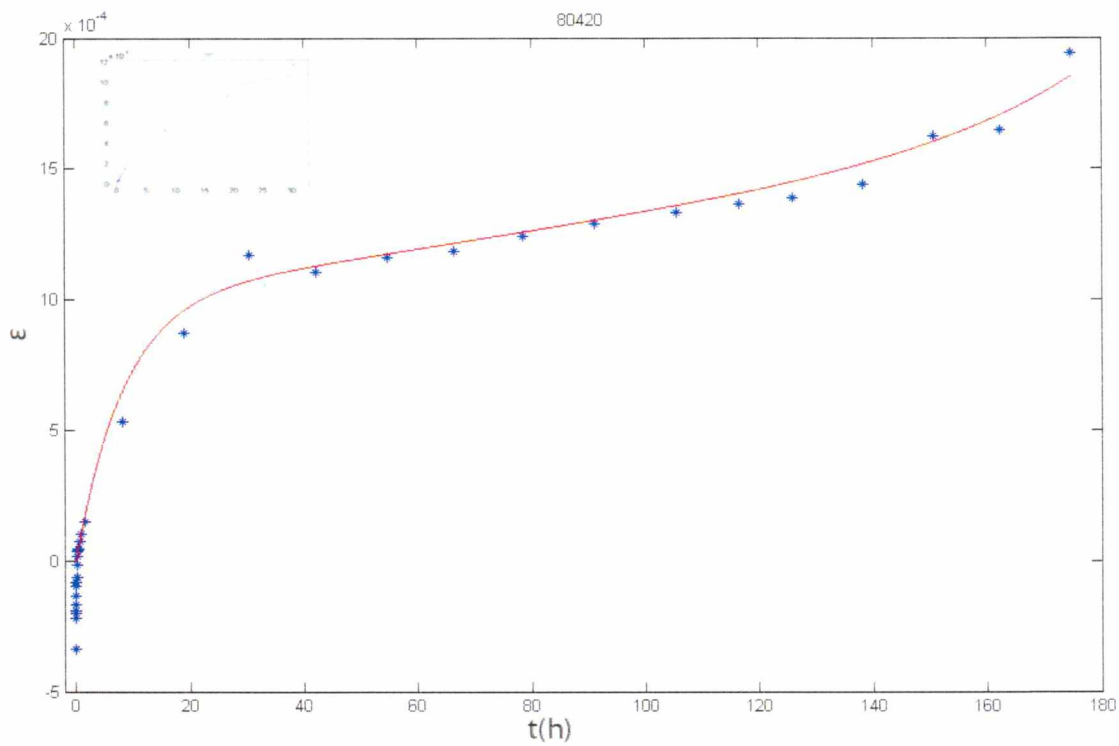


(β)

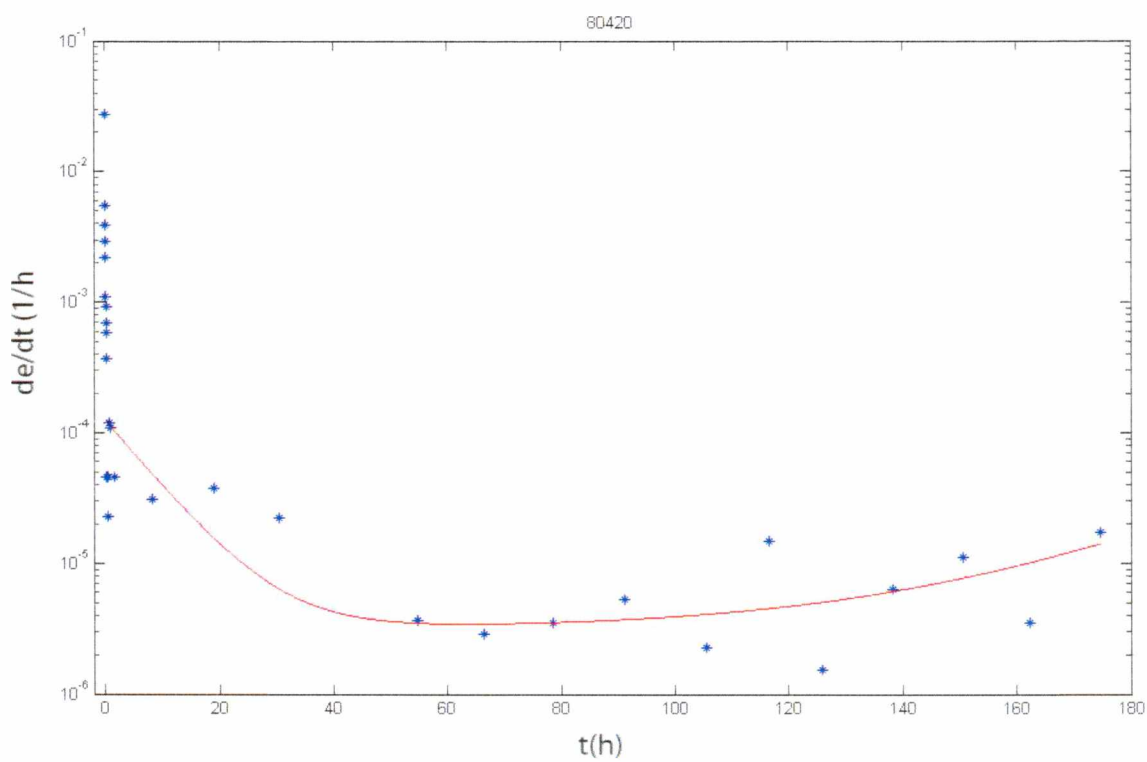
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,002166	0,41	1,24E-05	1,78E-07	0,00045

Σχ. 4.1.7

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

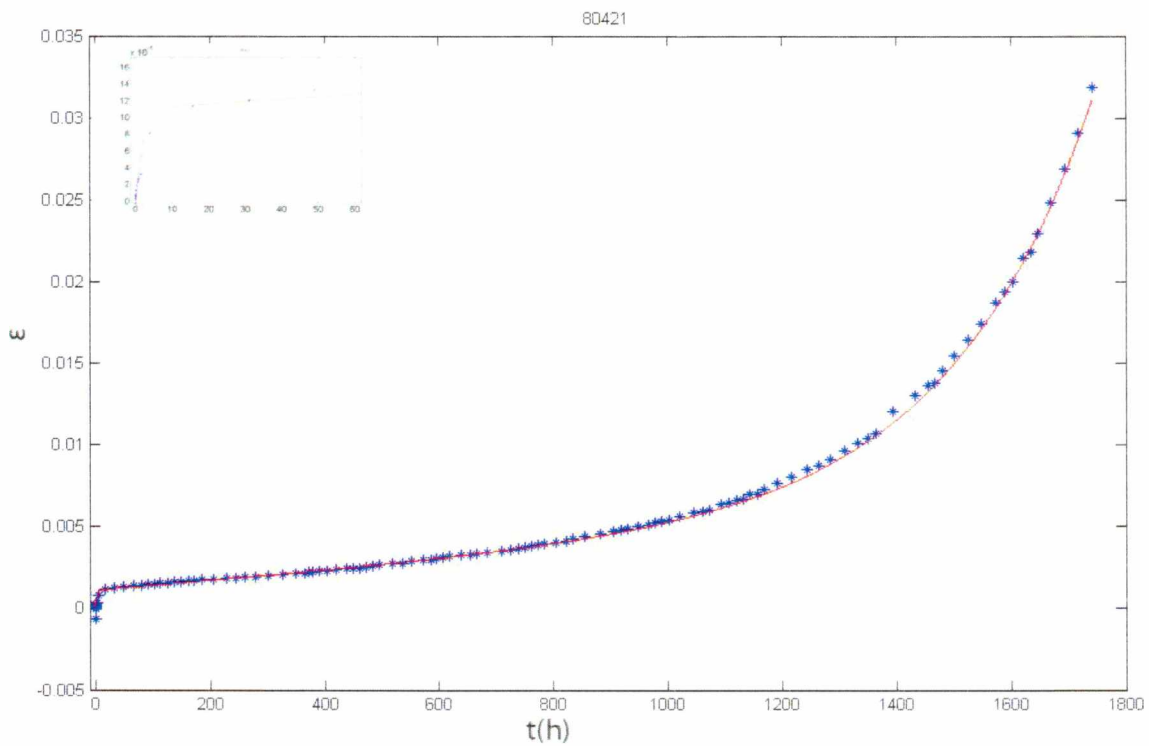


(β)

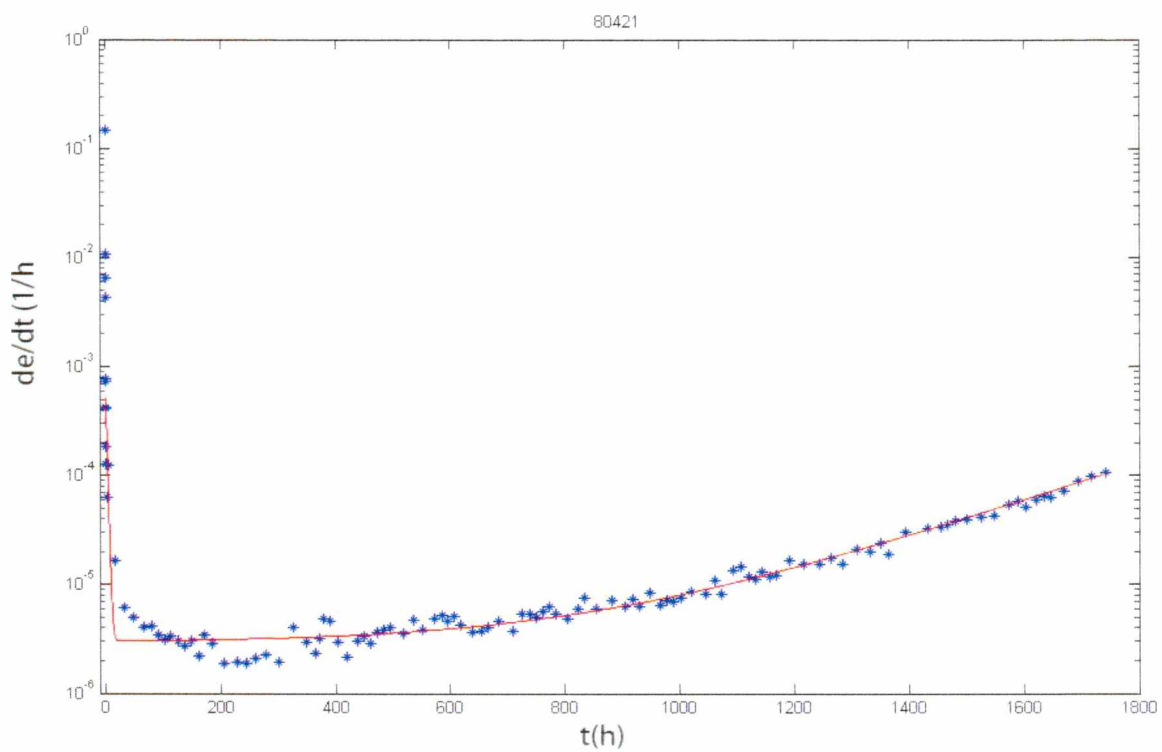
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0019	0,12	3,17E-06	2E-08	0,036

Σχ. 4.1.8

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

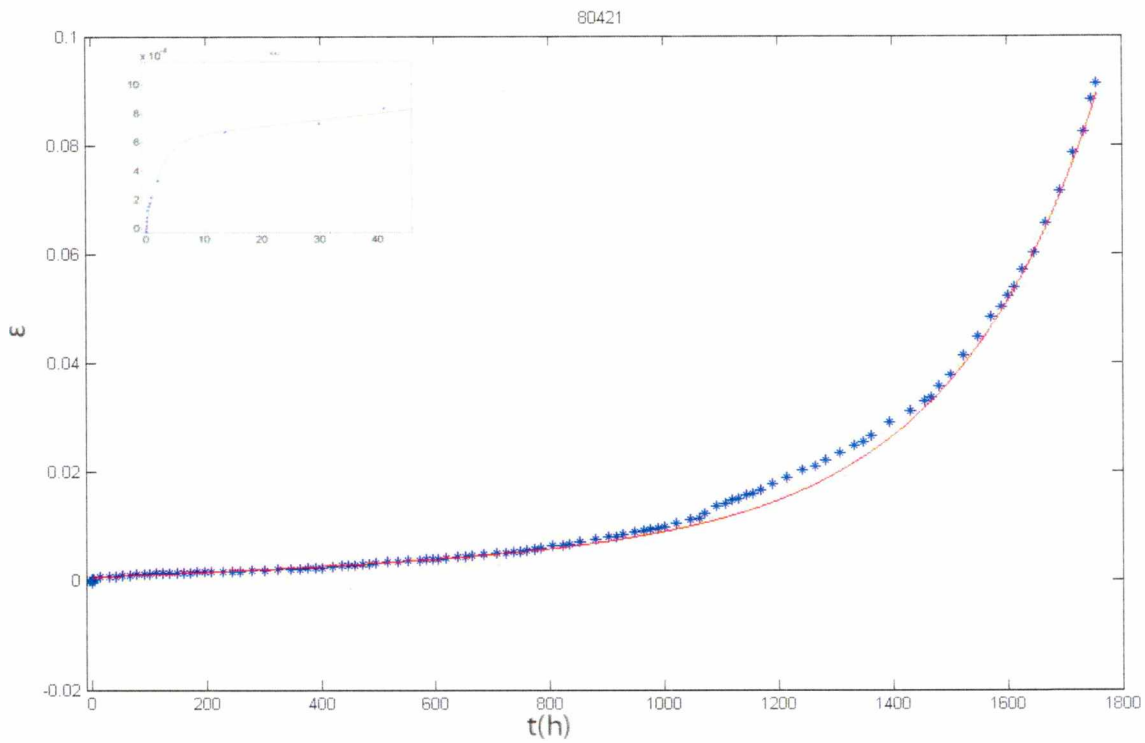


(β)

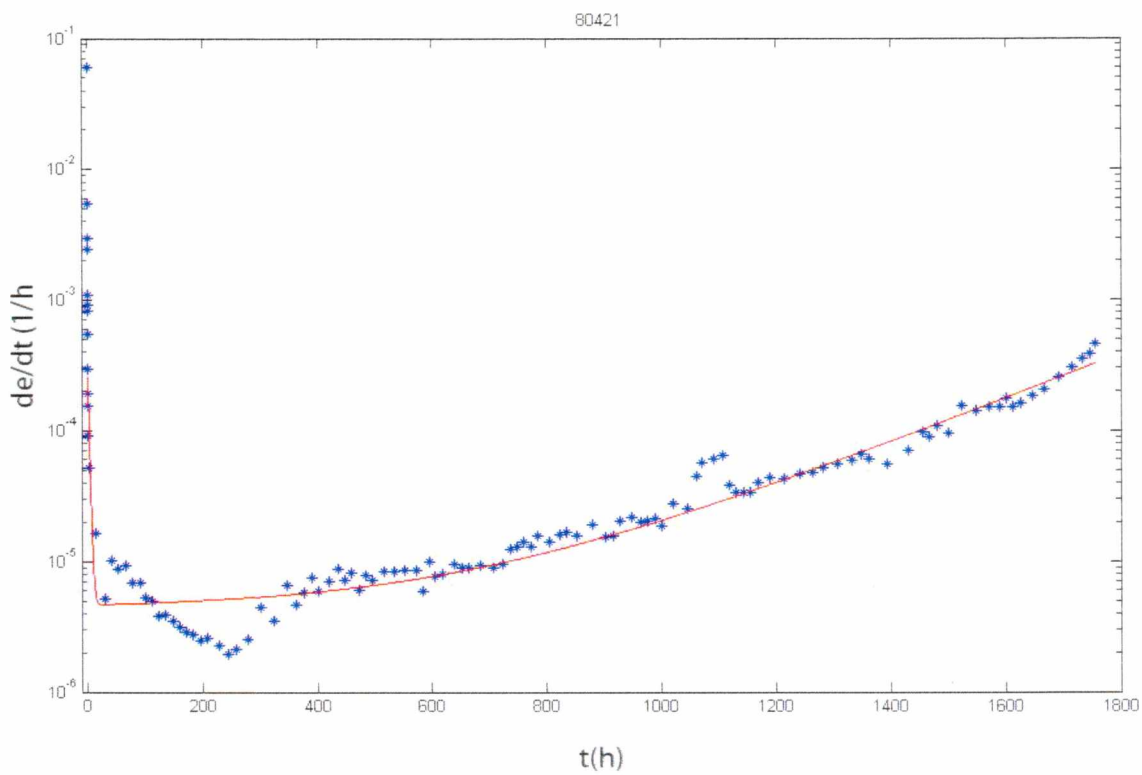
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0019	0,46	2,9E-06	9,42E-08	0,004

Σχ. 4.1.9

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

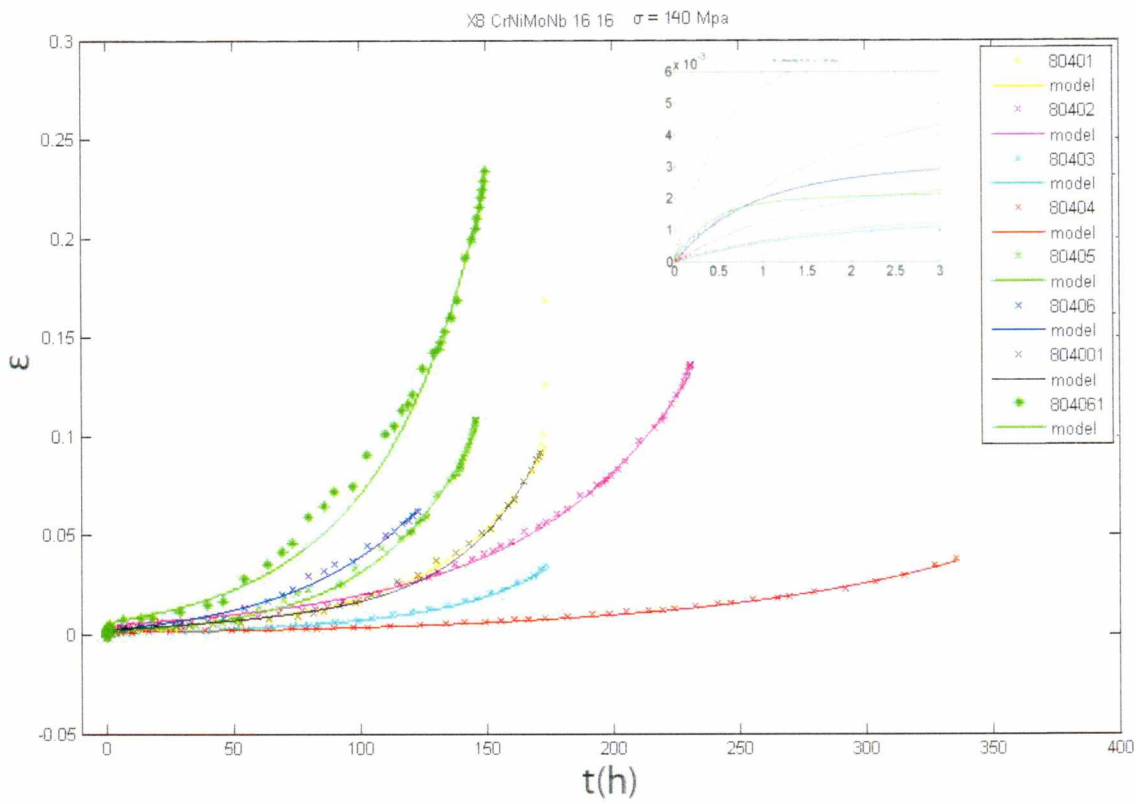


(β)

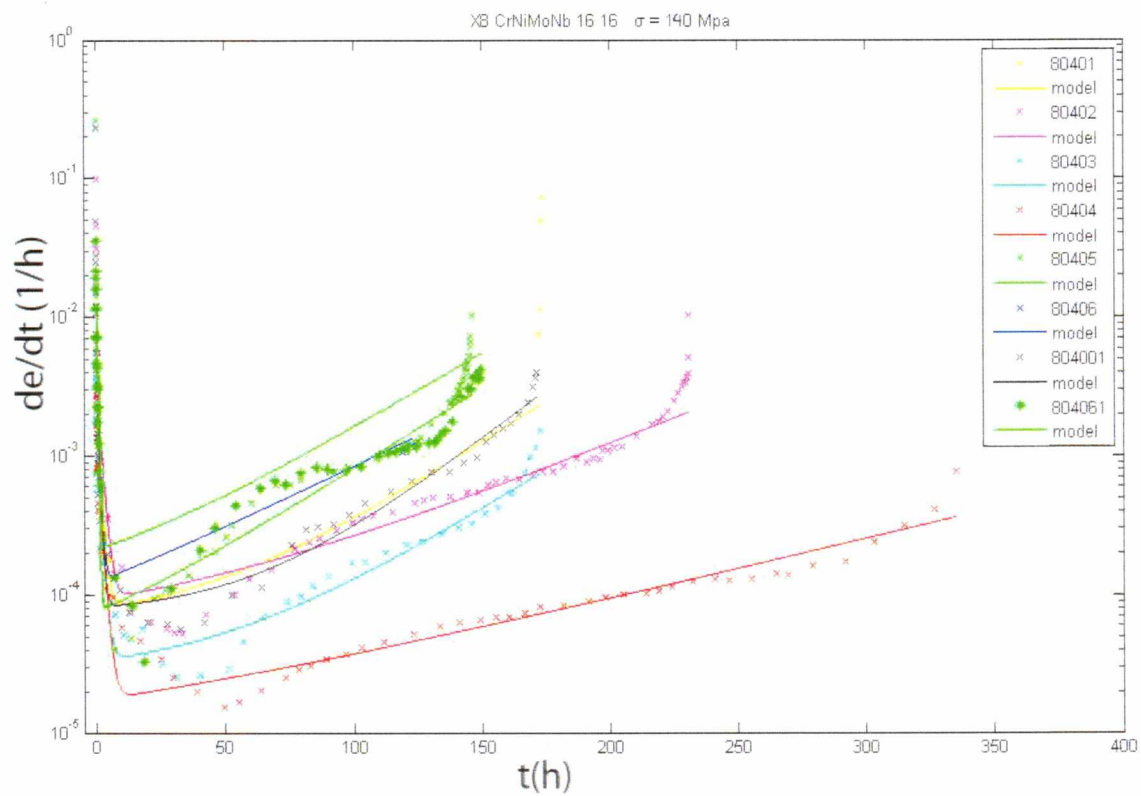
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,001615	0,41	4,3E-06	3,21E-07	0,00393

Σχ. 4.1.10 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσεως του χρόνου σε τάση 120 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου





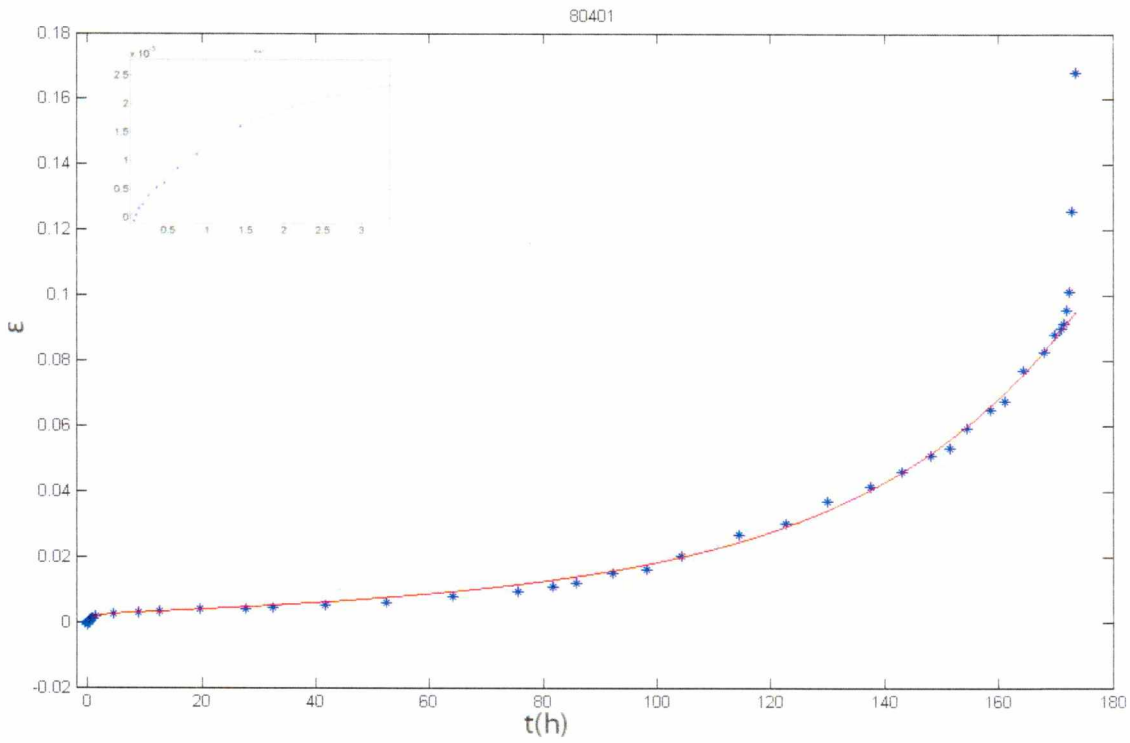
(α)



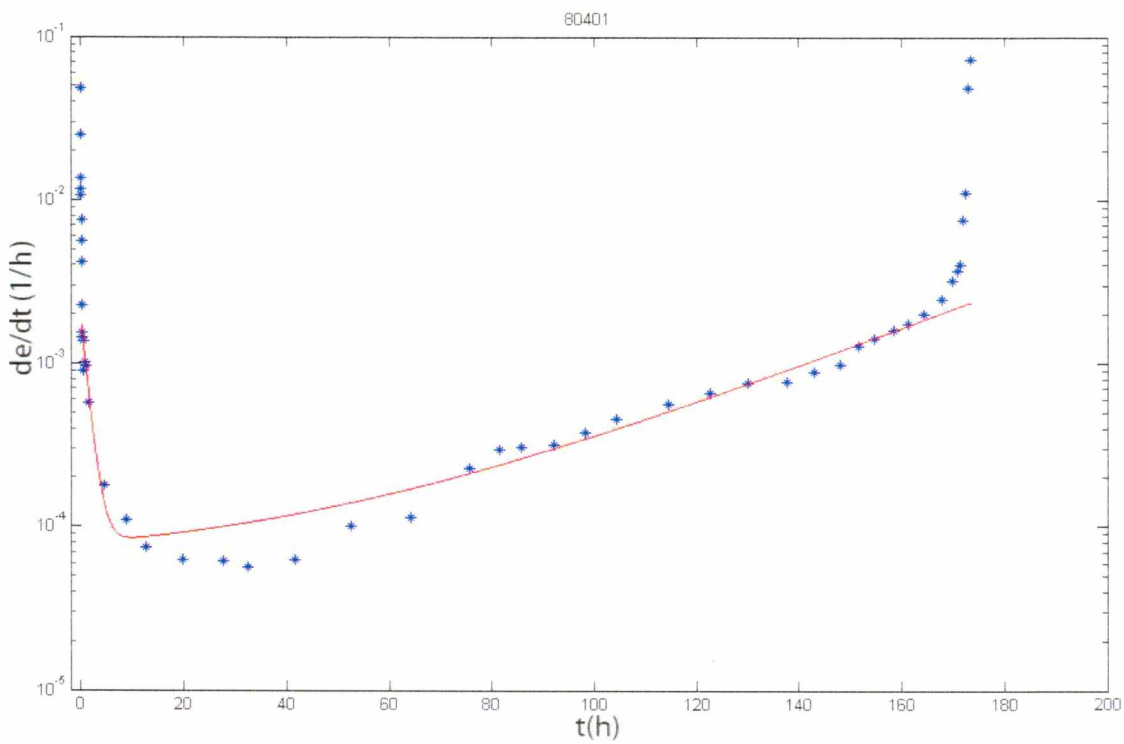
(β)

Σχ. 4.1.11

α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 140 Mpa  
 β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $de/dt$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 140 Mpa



(α)



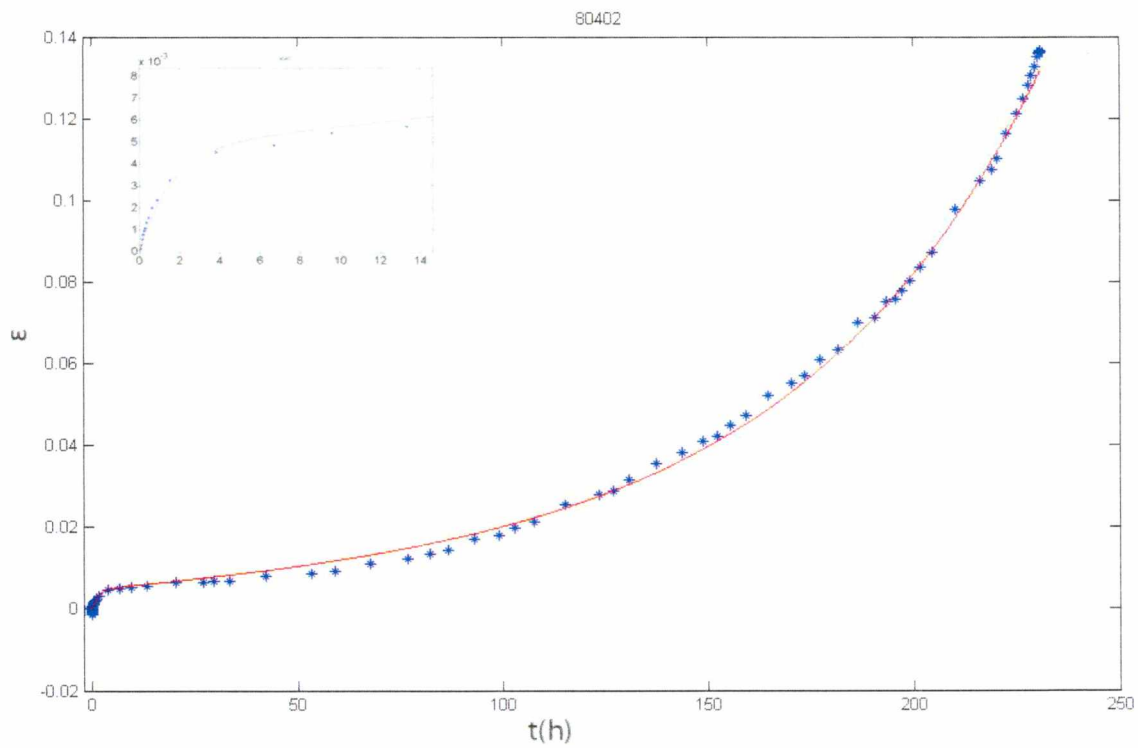
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,00474	0,75	5,95E-05	1,86E-05	0,0278

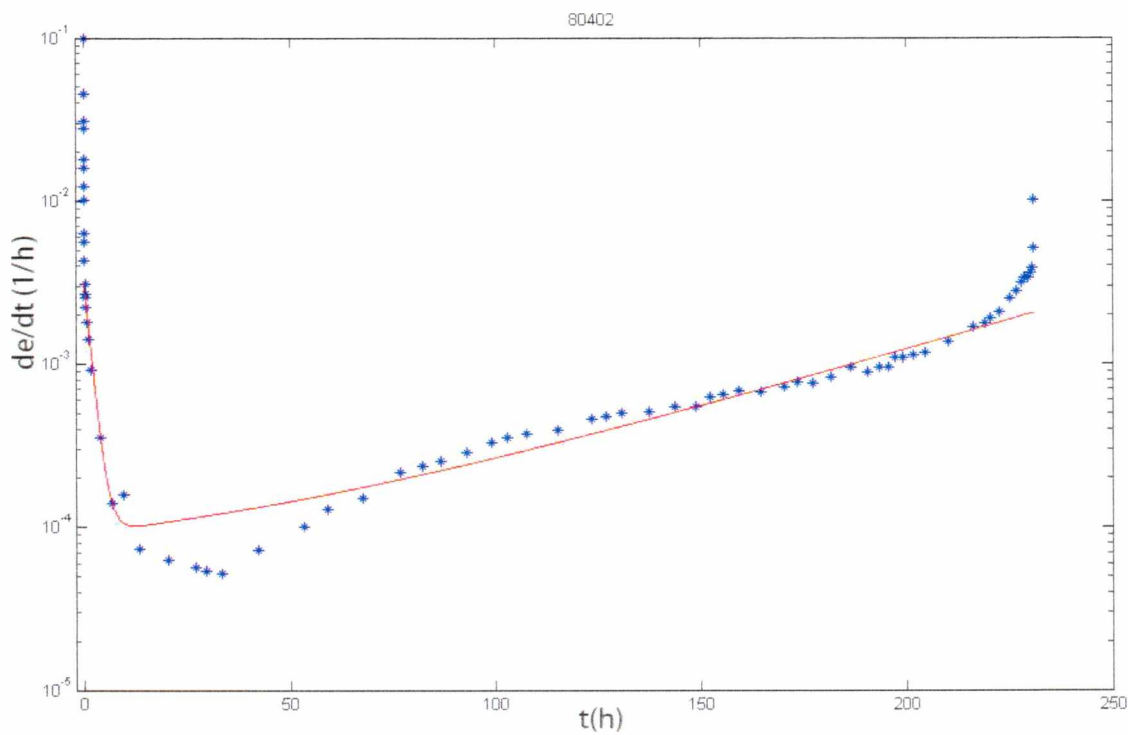
Σχ. 4.1.12

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα

β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



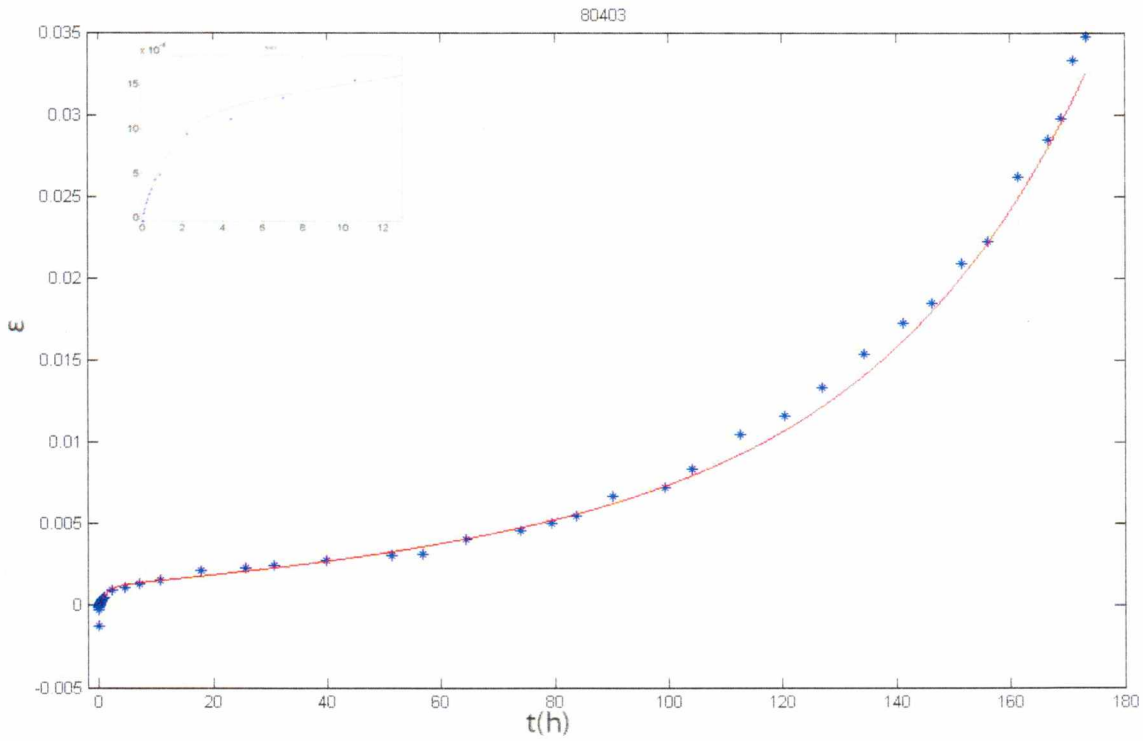
(α)



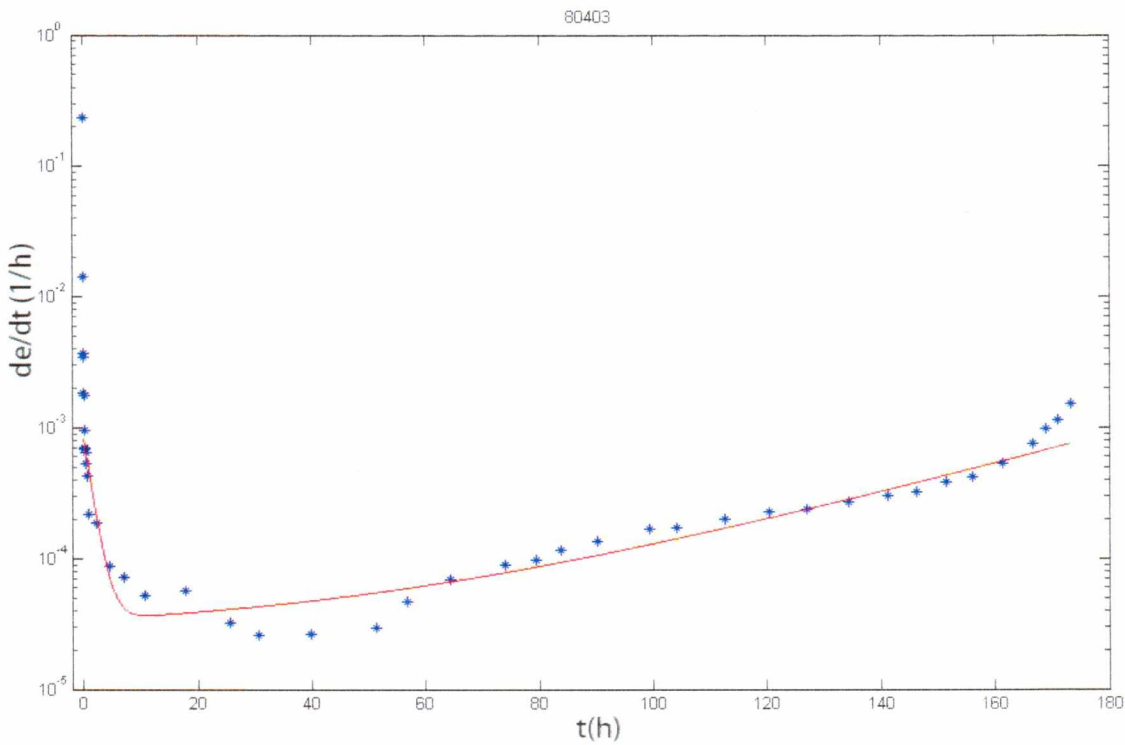
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,00774	0,63	5,35E-05	3,81E-05	0,017177

Σχ. 4.1.13 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

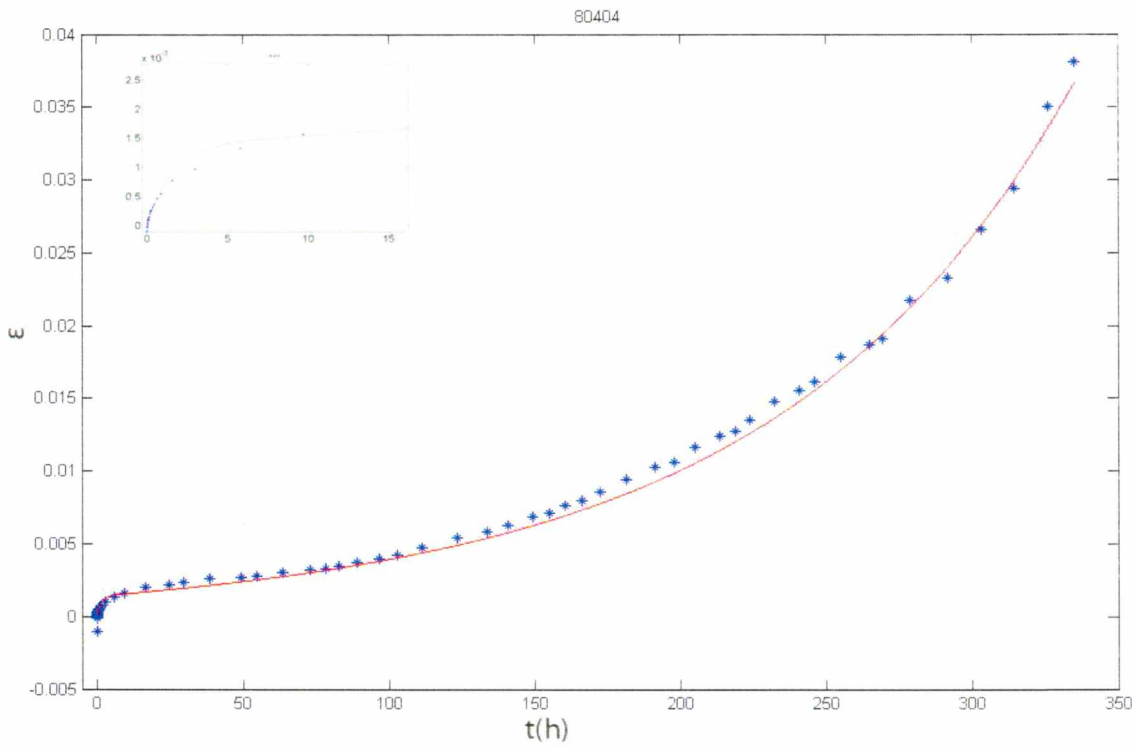


(β)

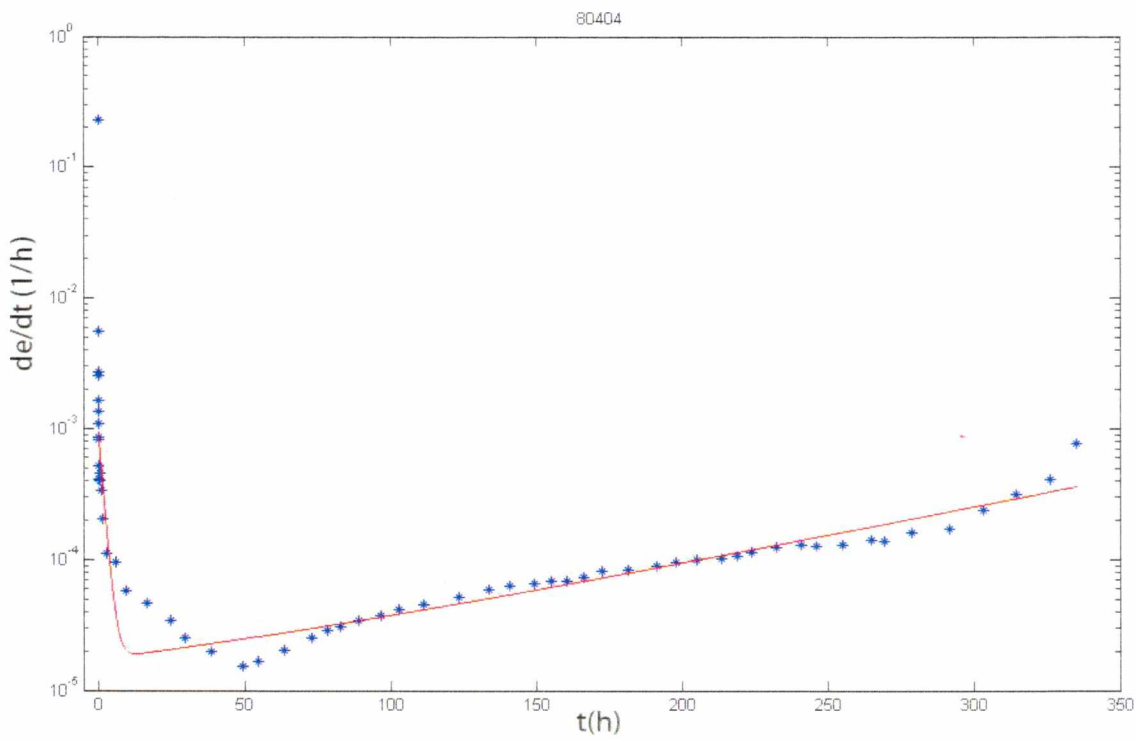
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,002448	0,68	2,63E-05	7,2E-06	0,0266

Σχ. 4.1.14

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



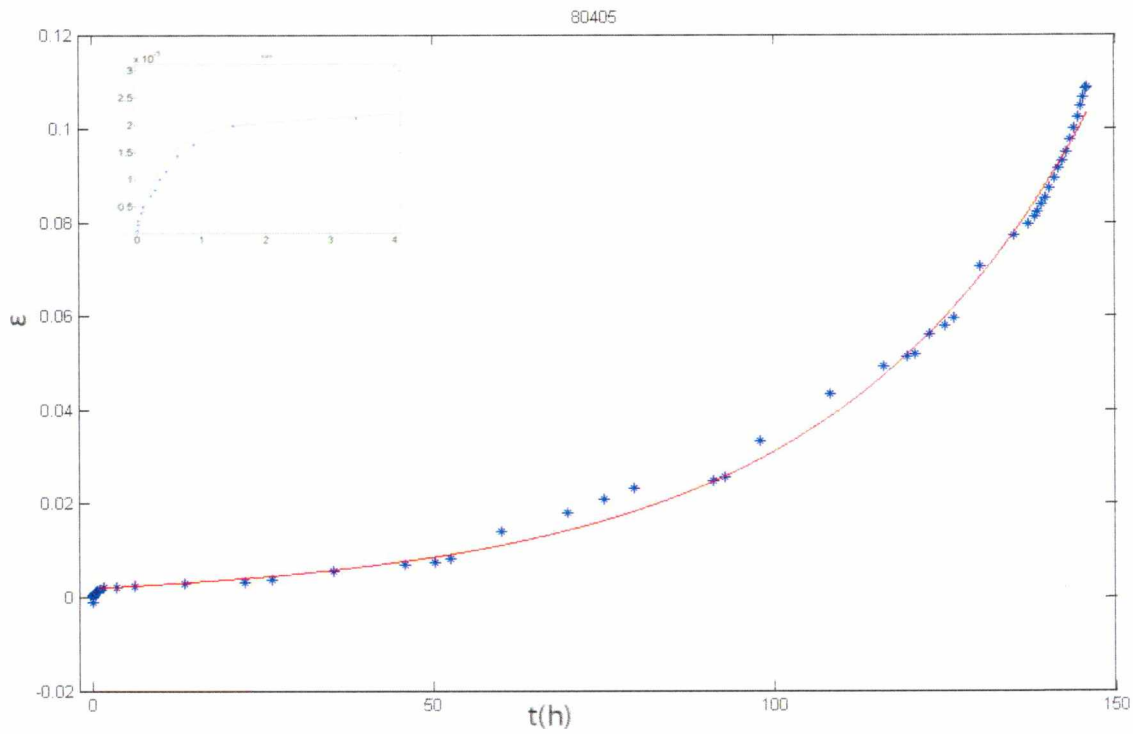
(α)



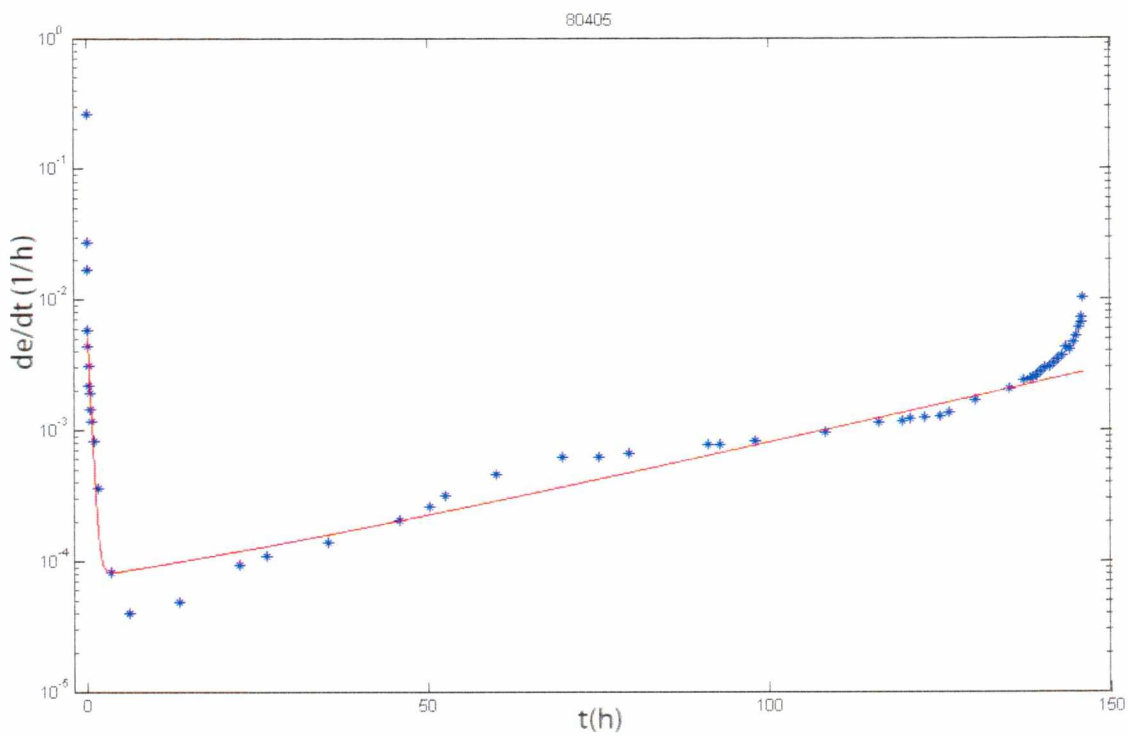
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,003375	0,64	5,81E-06	1,14E-05	0,01025

Σχ. 4.1.15 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



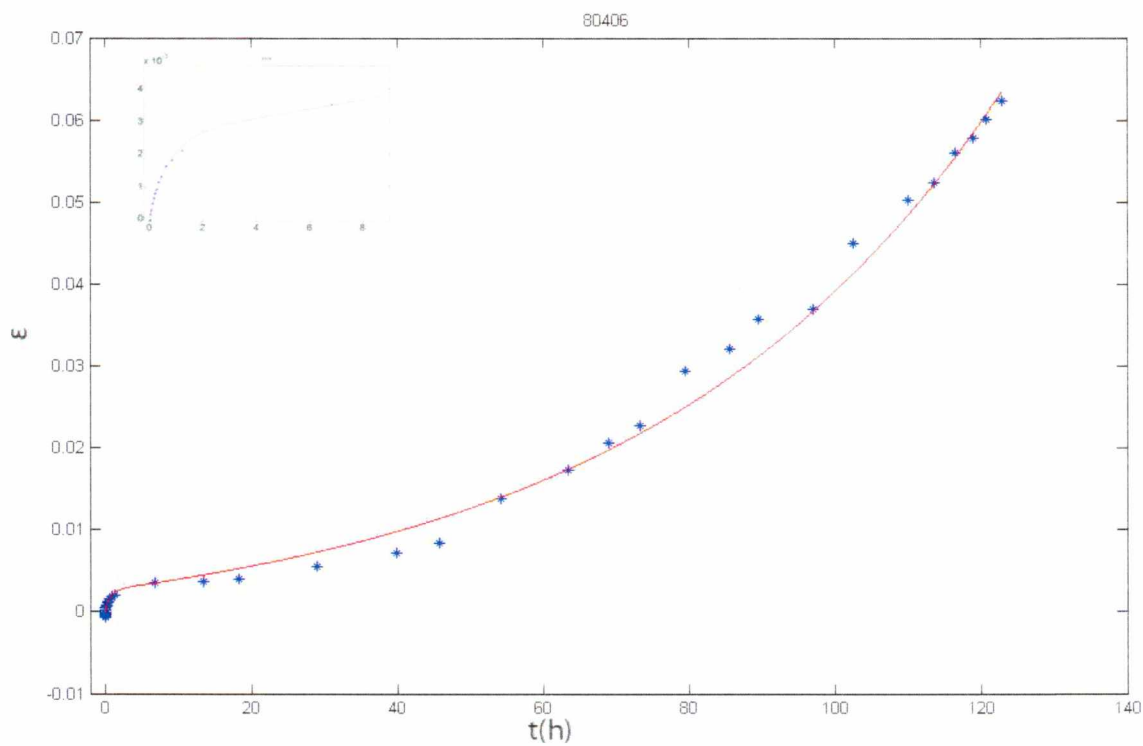
(α)



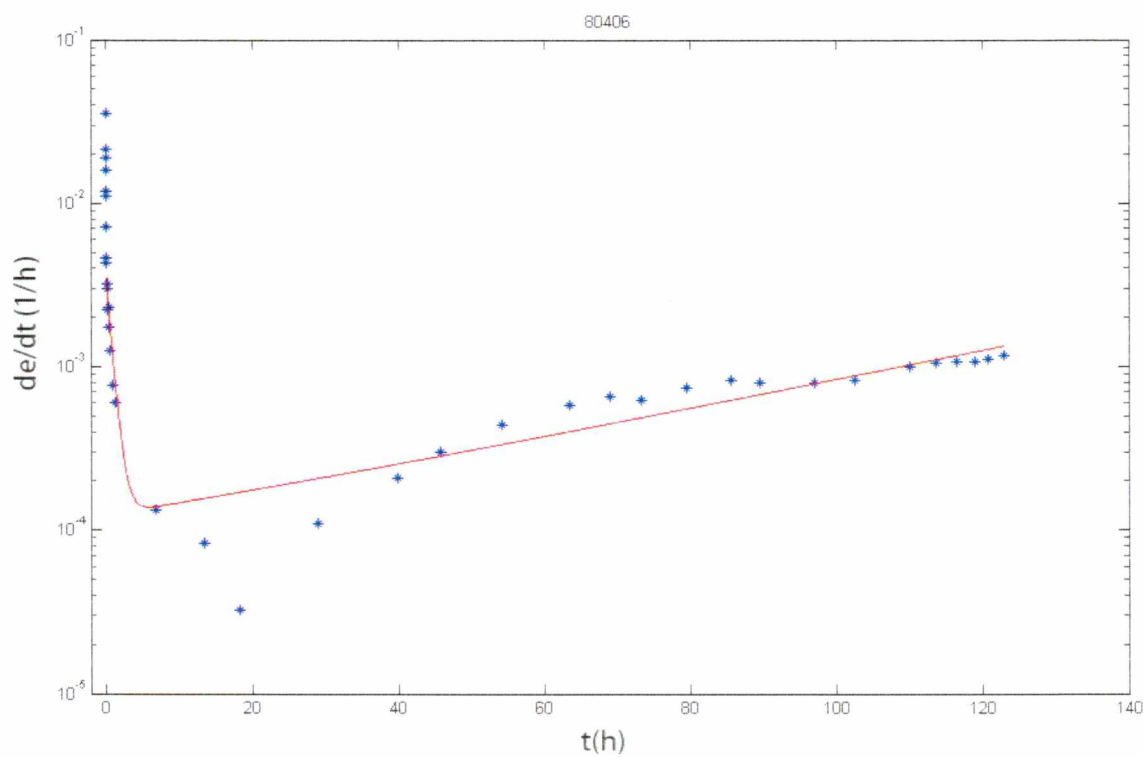
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0042	2,619	2,32E-05	0,000052	0,0271

Σχ. 4.1.16 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



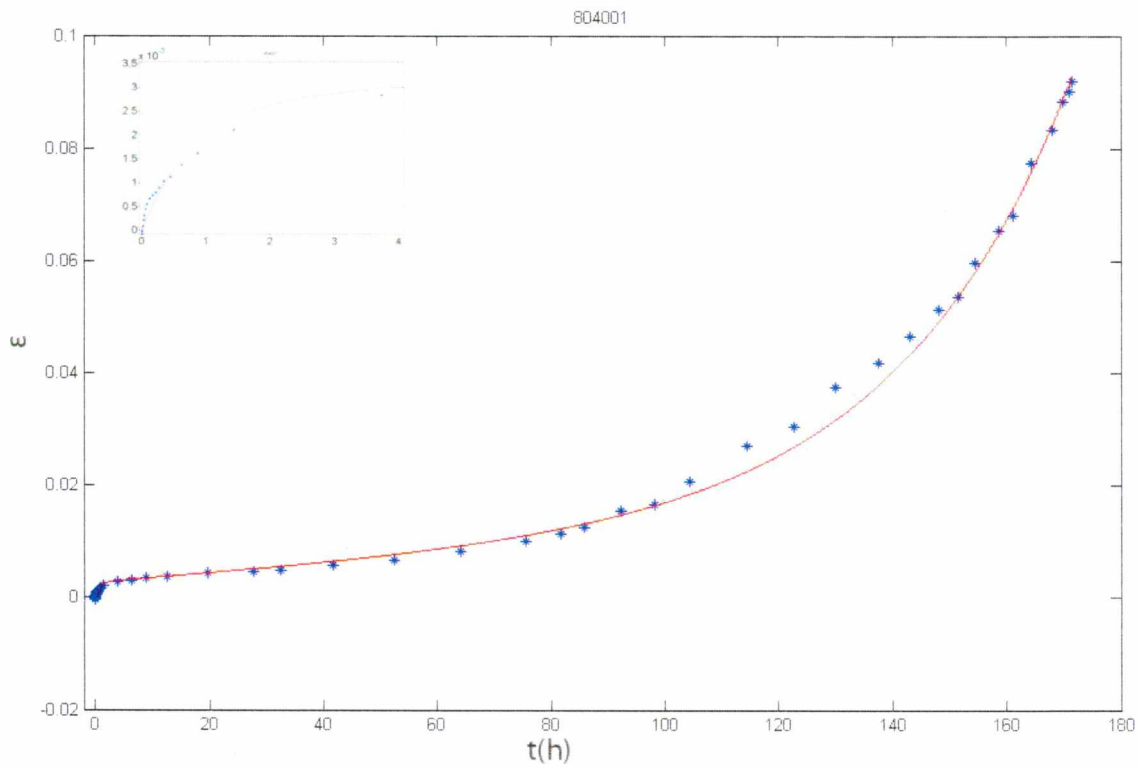
(α)



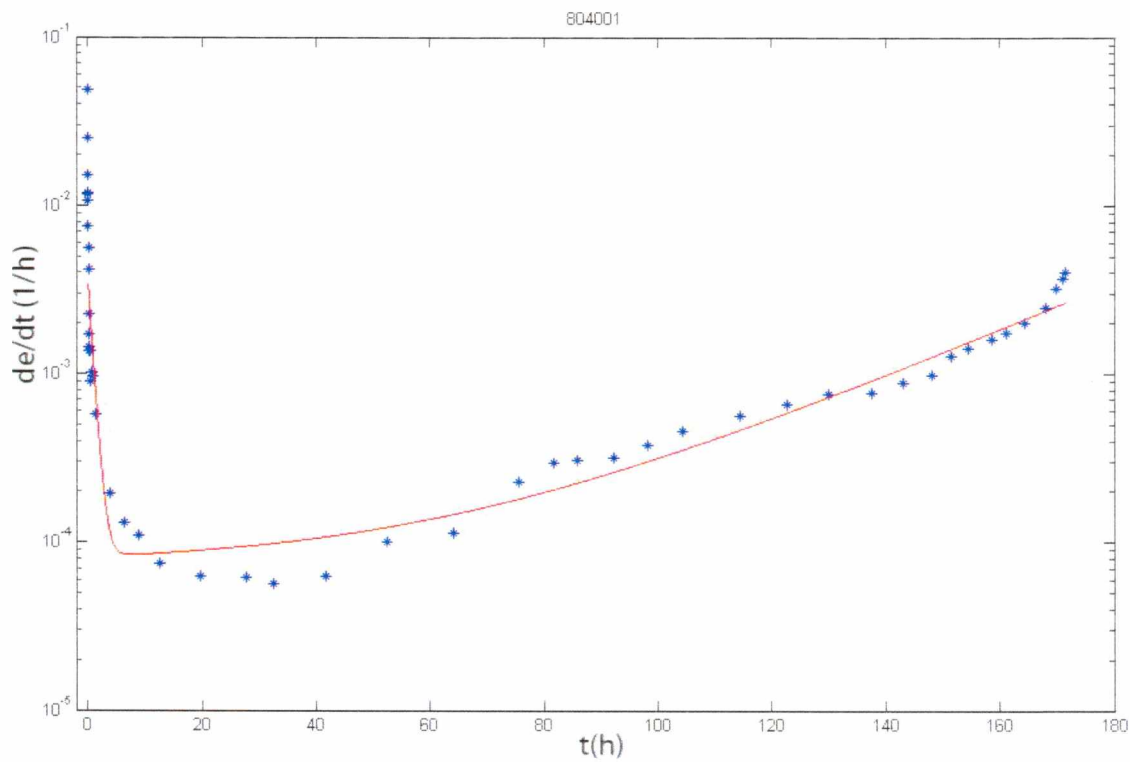
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0055	1,27	0,000021	0,000102	0,0208

Σχ. 4.1.17 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

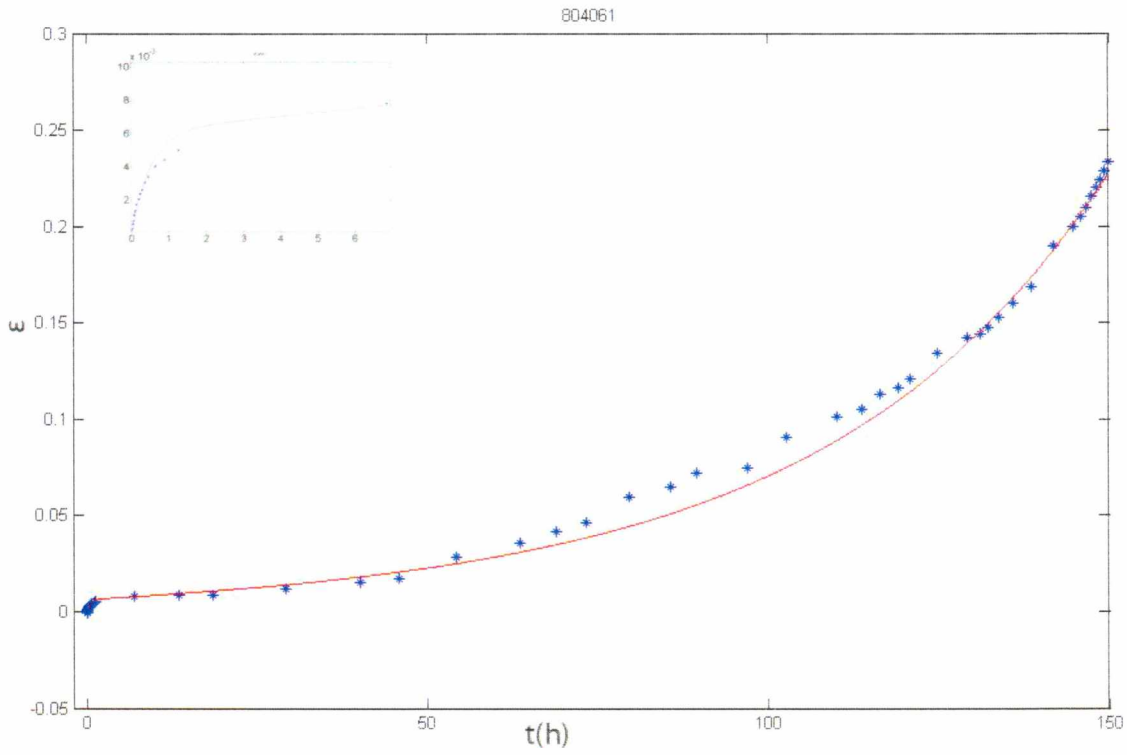


(β)

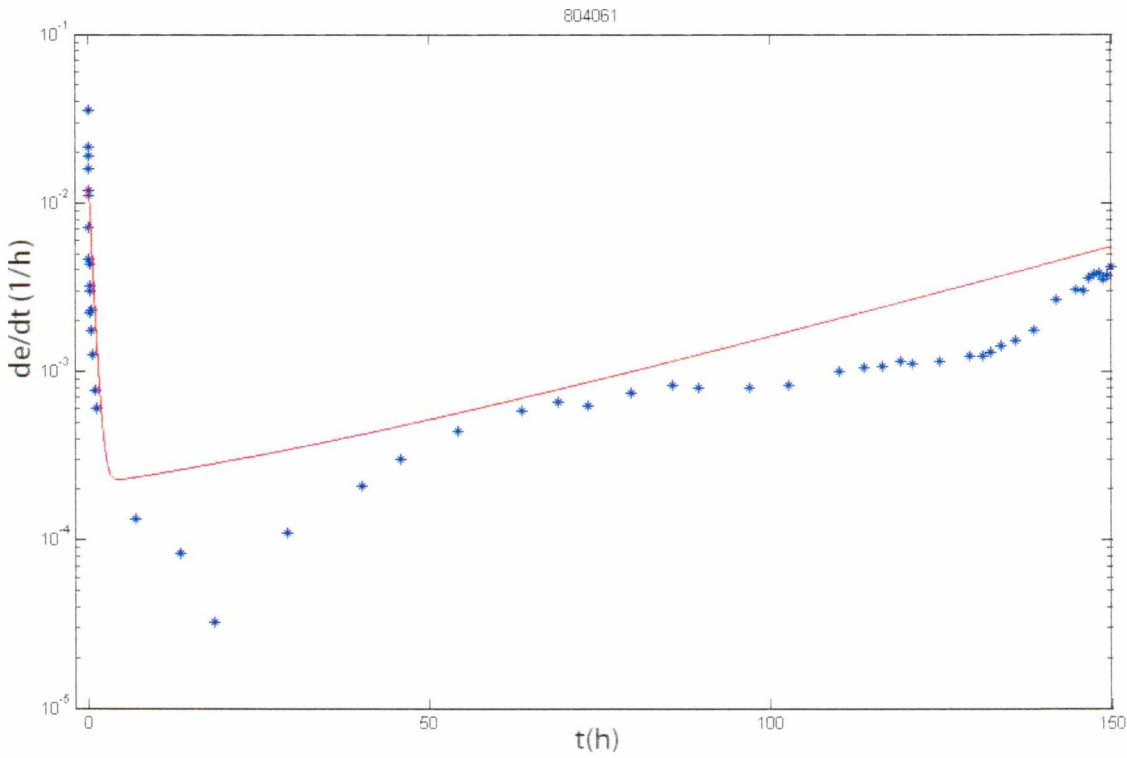
$\varepsilon_p$	$q$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_t$	$n$
0,0047	1,22	0,000072	0,000009	0,033

Σχ. 4.1.18 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου





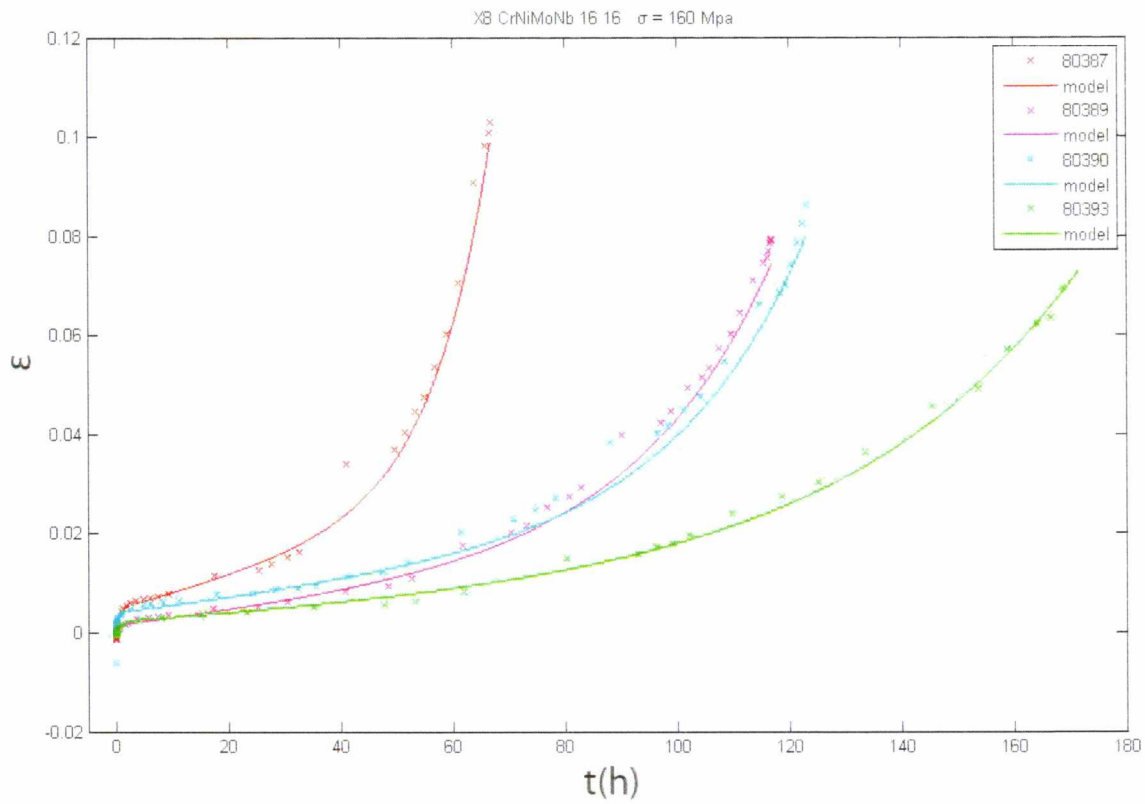
(α)



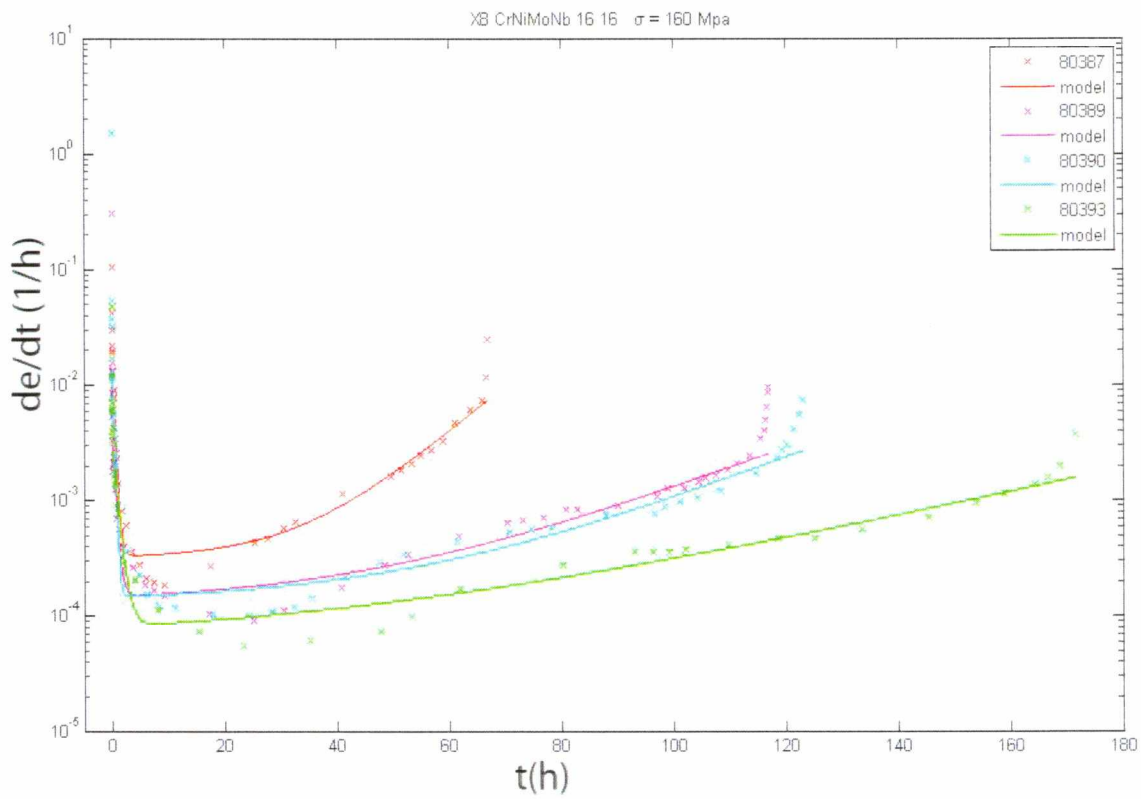
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,011172	1,95	0,000089	0,000121	0,0253

Σχ. 4.1.19 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 140 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου

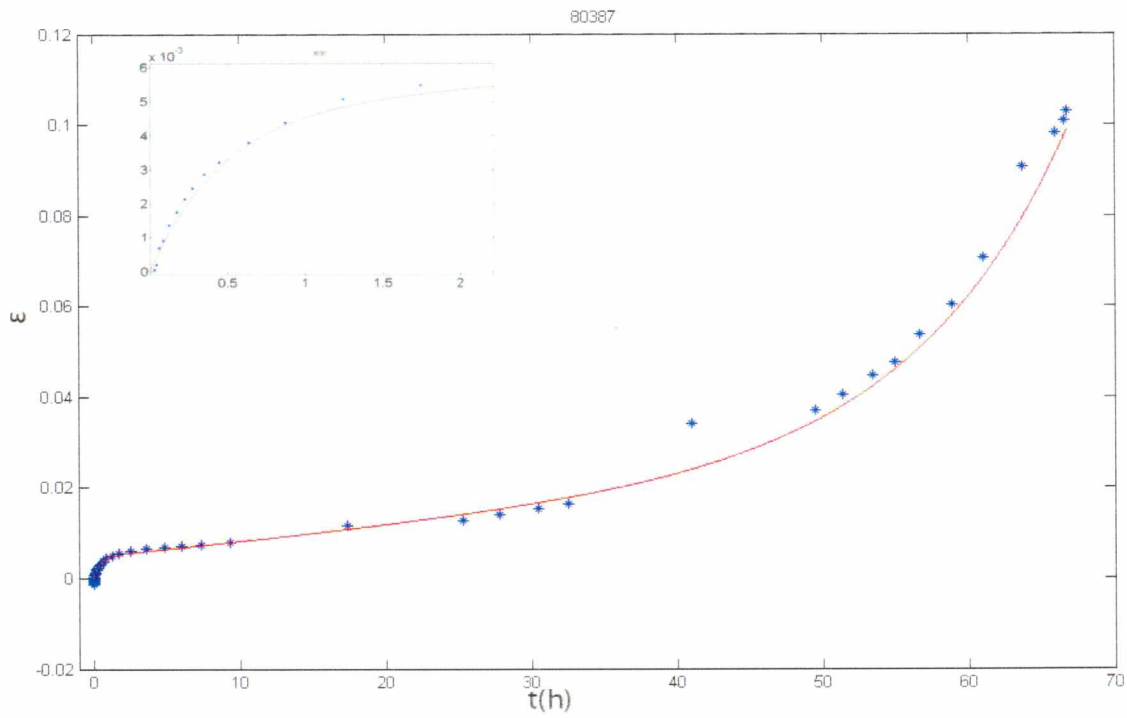


(α)

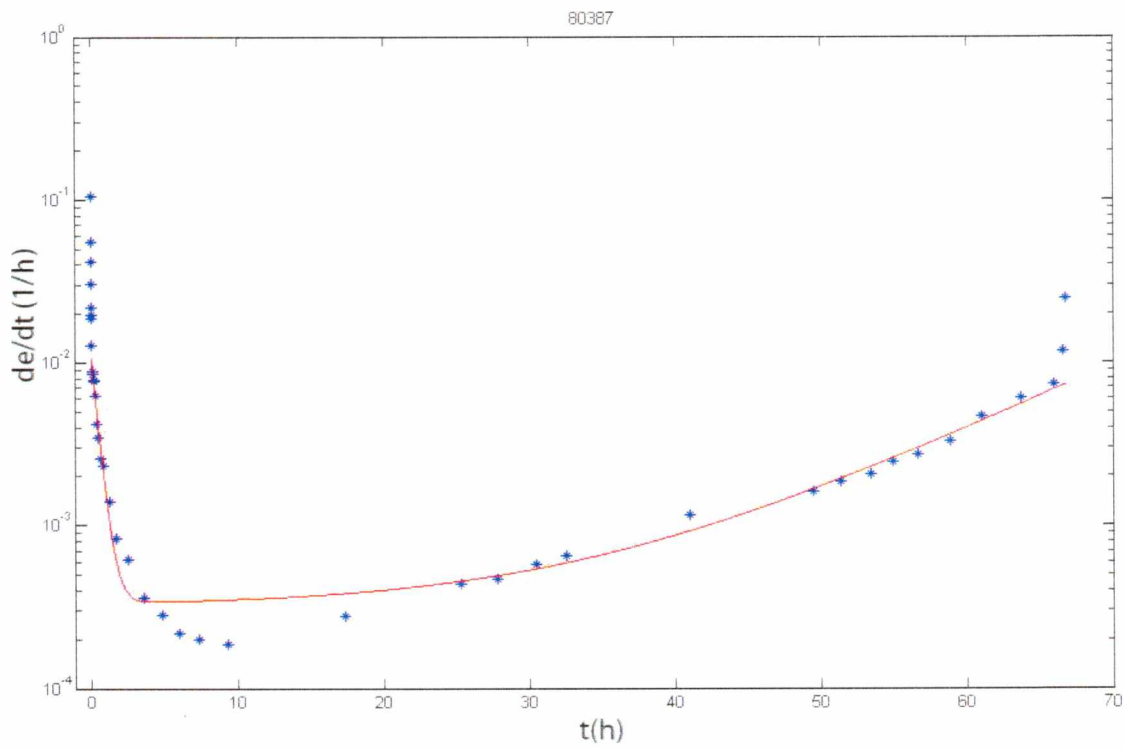


(β)

Σχ. 4.1.20 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 160 Mpa  
 β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $de/dt$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 160



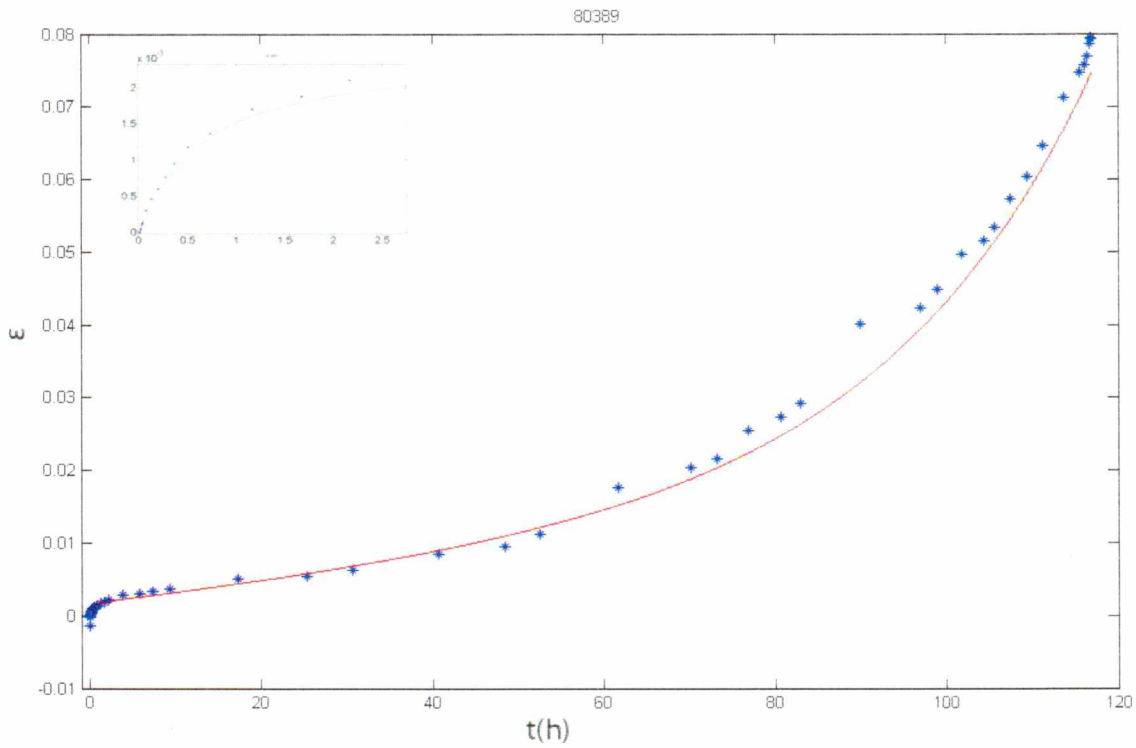
(α)



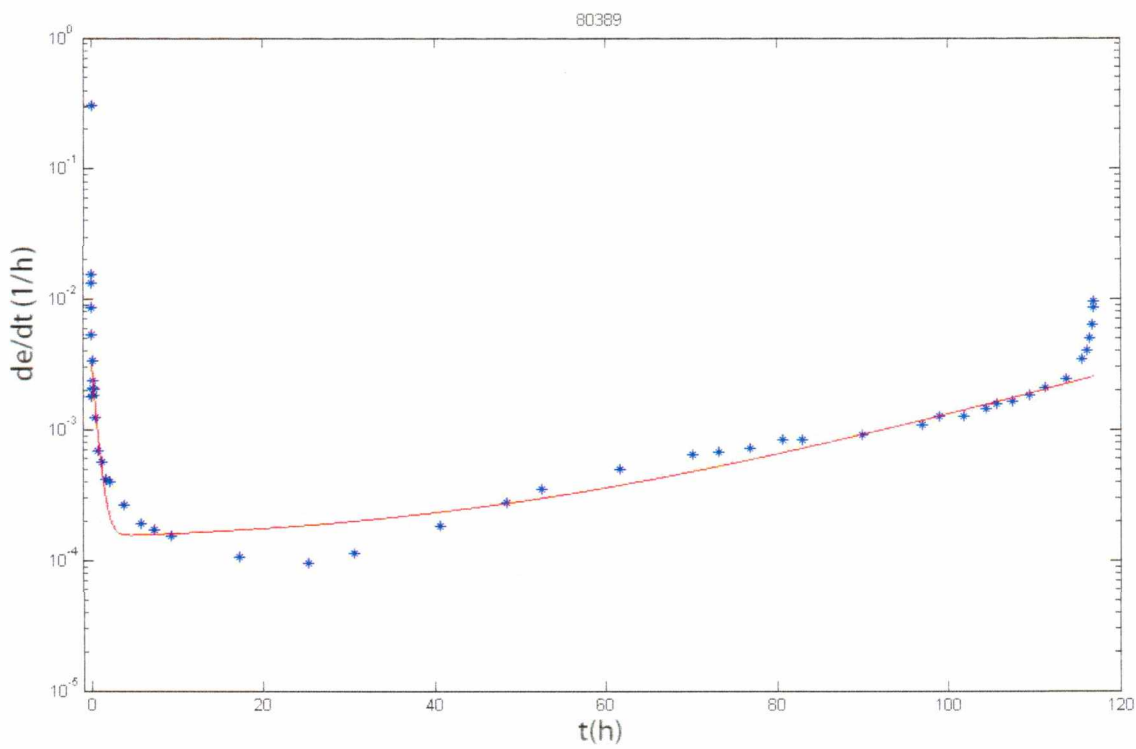
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,008265	2,132	0,000319	$1,22E-05$	0,09504

Σχ. 4.1.21 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



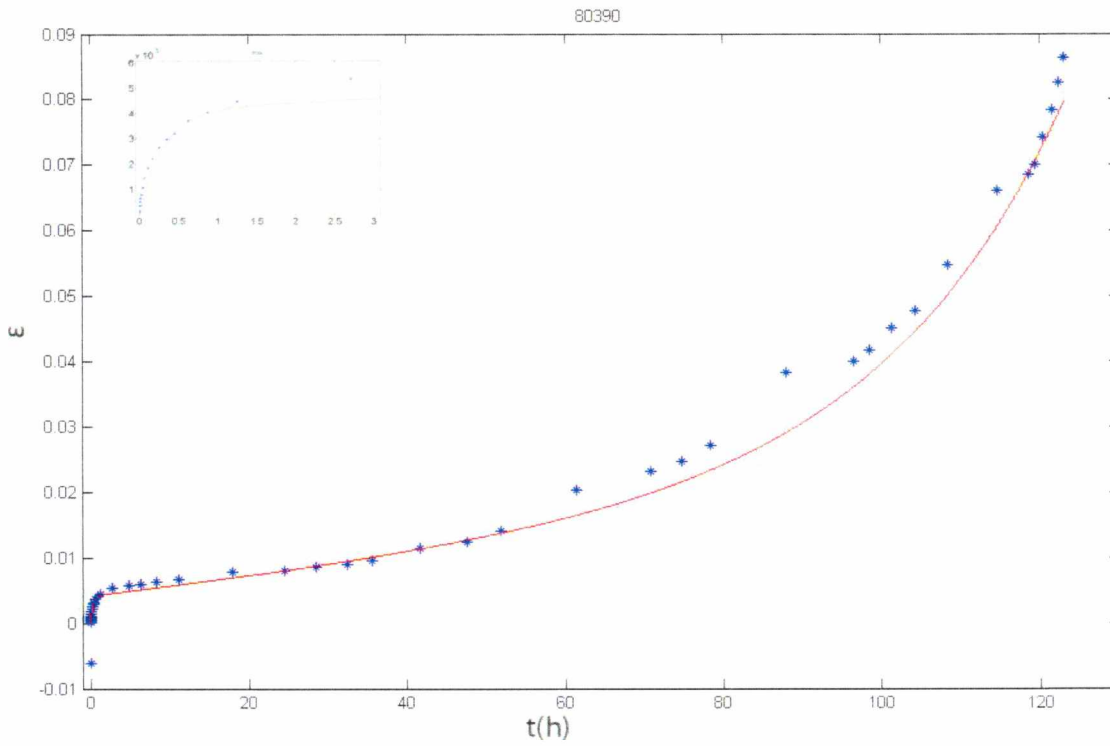
(α)



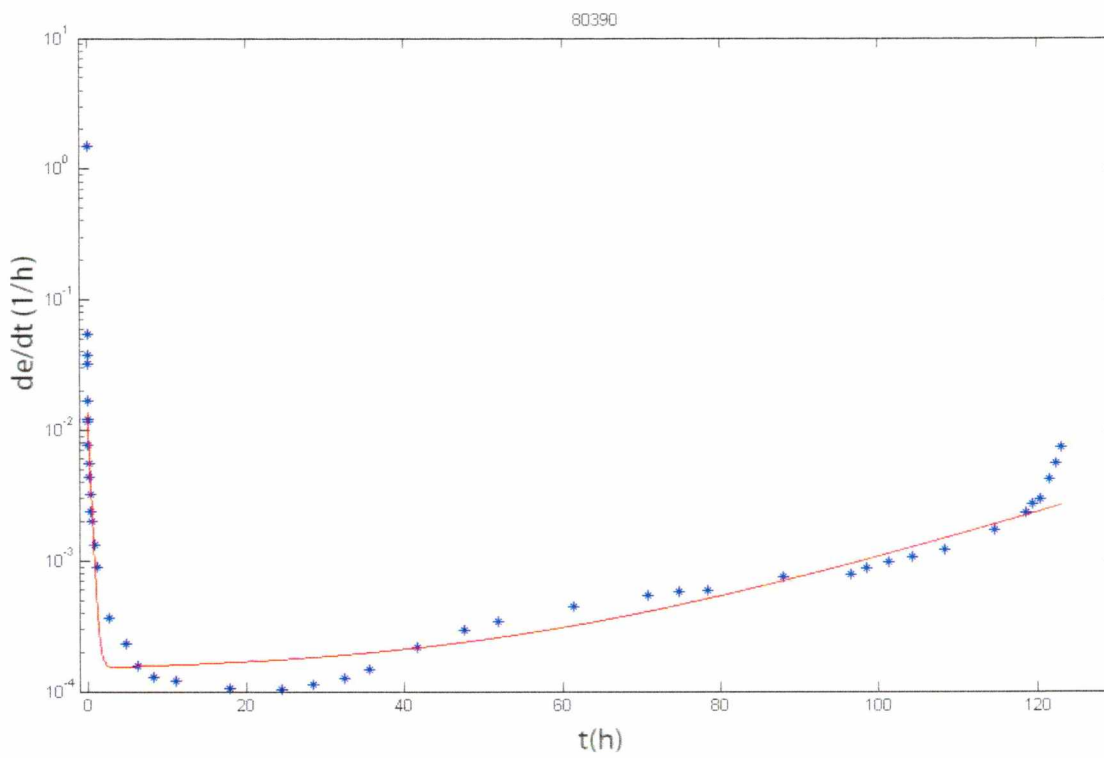
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,00342	1,848	0,000131	1,92E-05	0,041303

Σχ. 4.1.22 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσεως του χρόνου σε τάση 160 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου



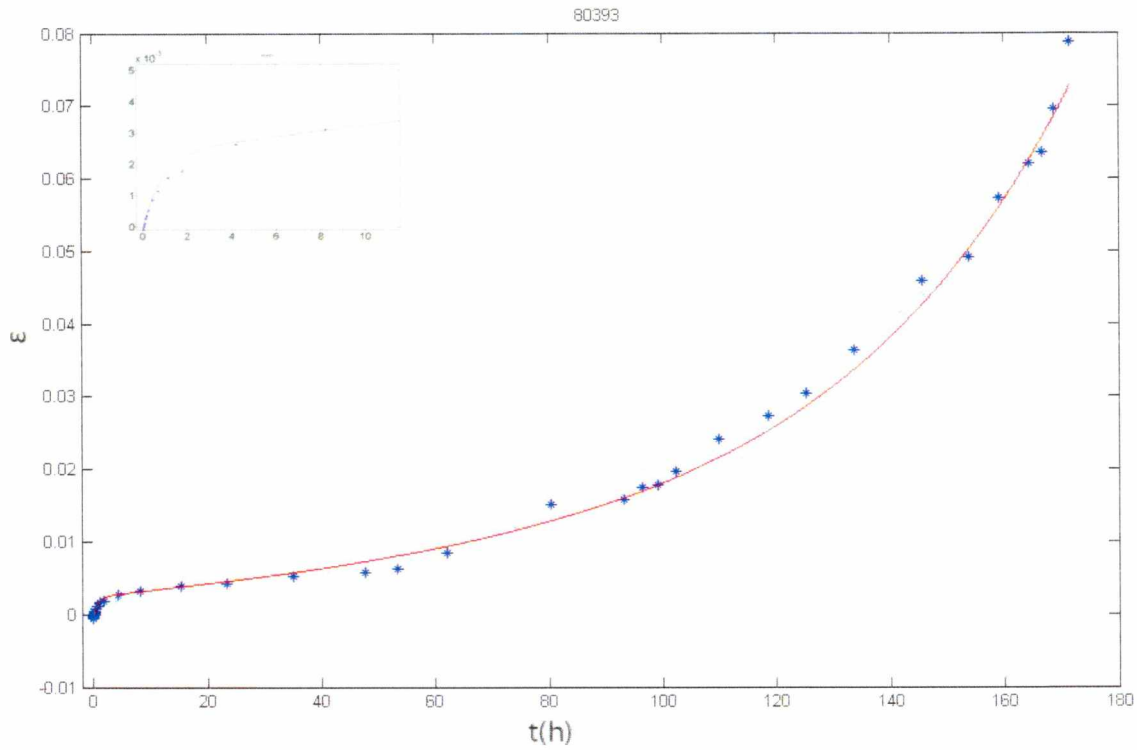
(α)



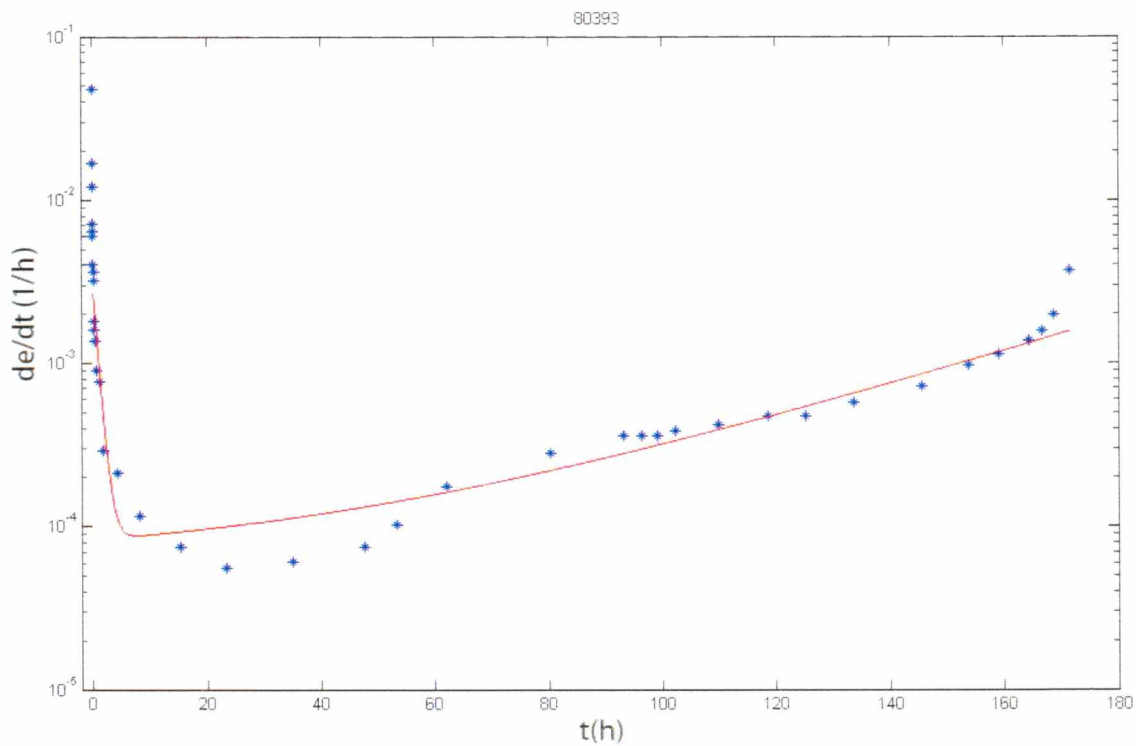
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,01104	3,24	0,000138	1,31E-05	0,042723

Σχ. 4.1.23 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



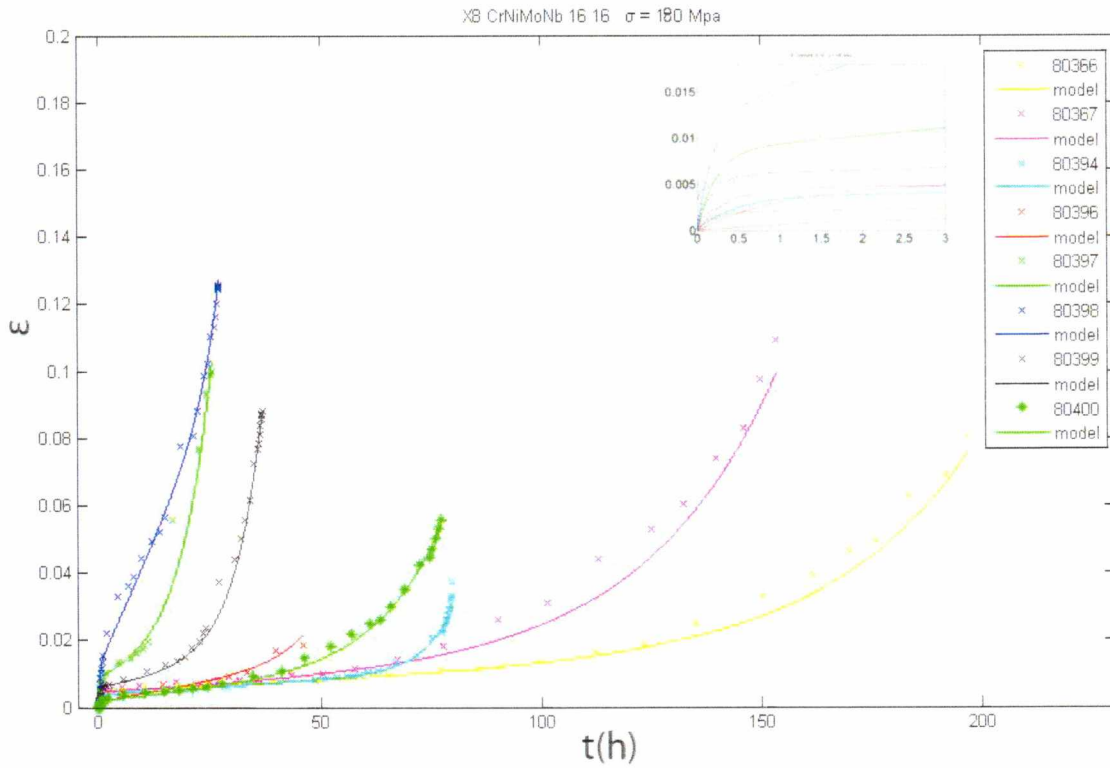
(α)



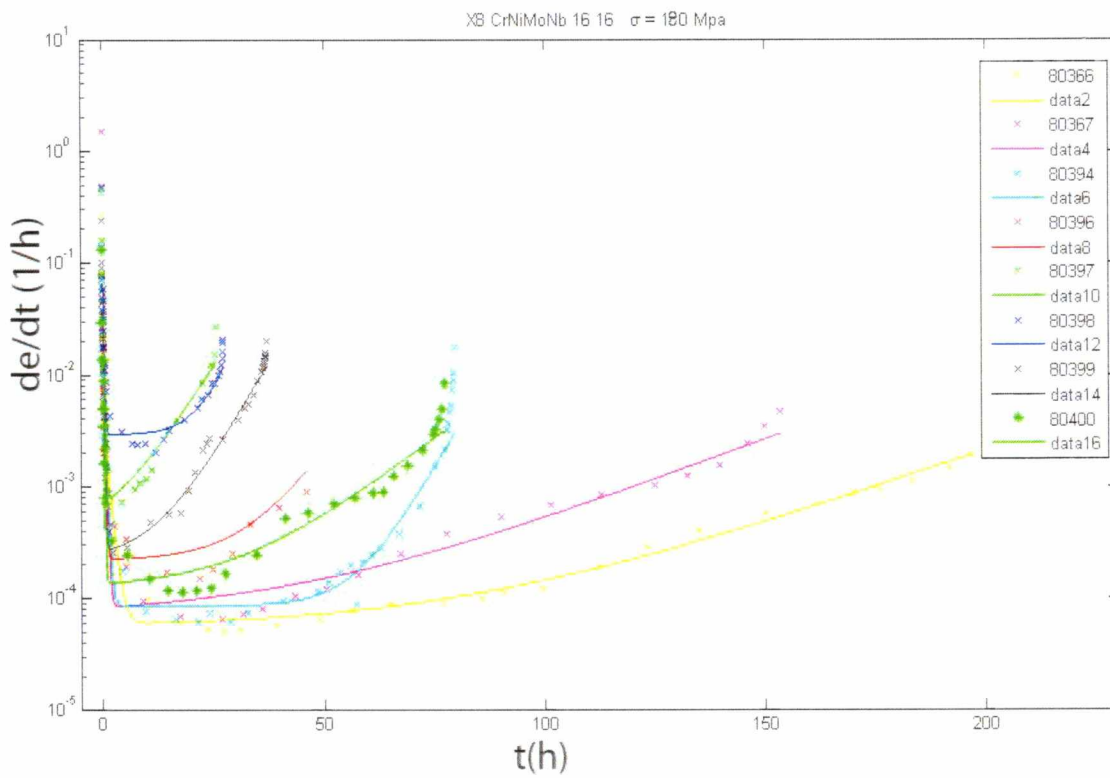
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0044	1,08	5,99E-05	2,24E-05	0,0245

Σχ. 4.1.24 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 160 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου

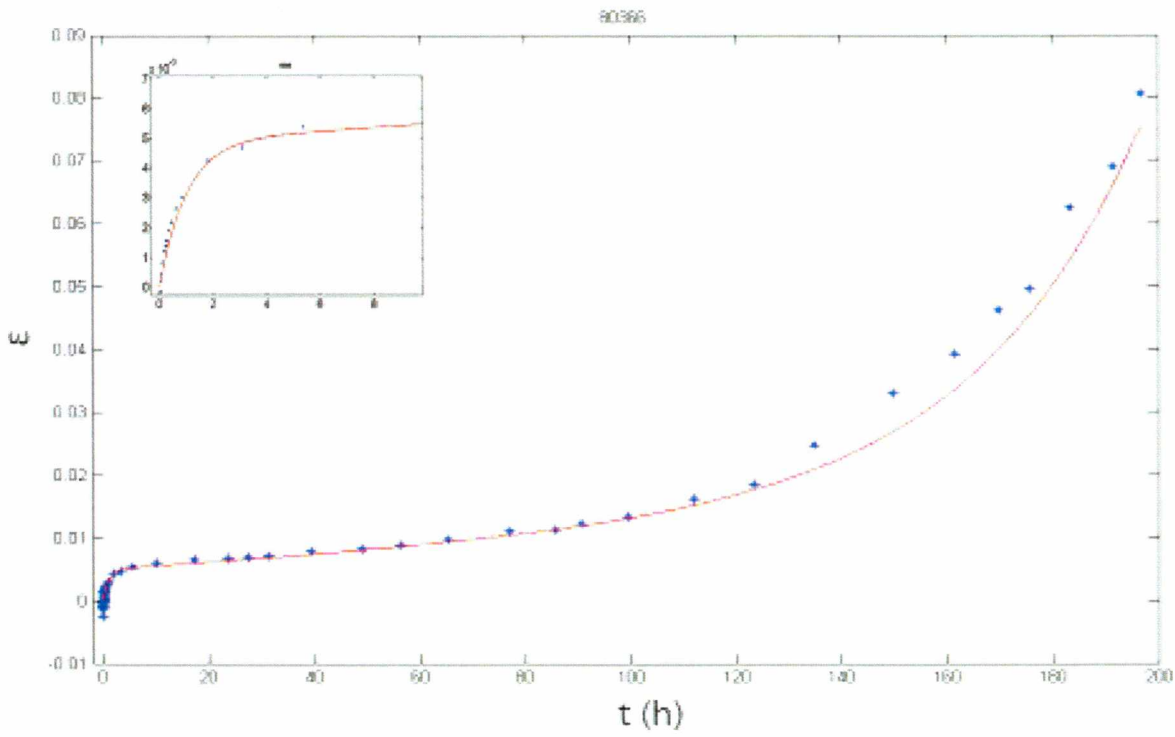


(α)

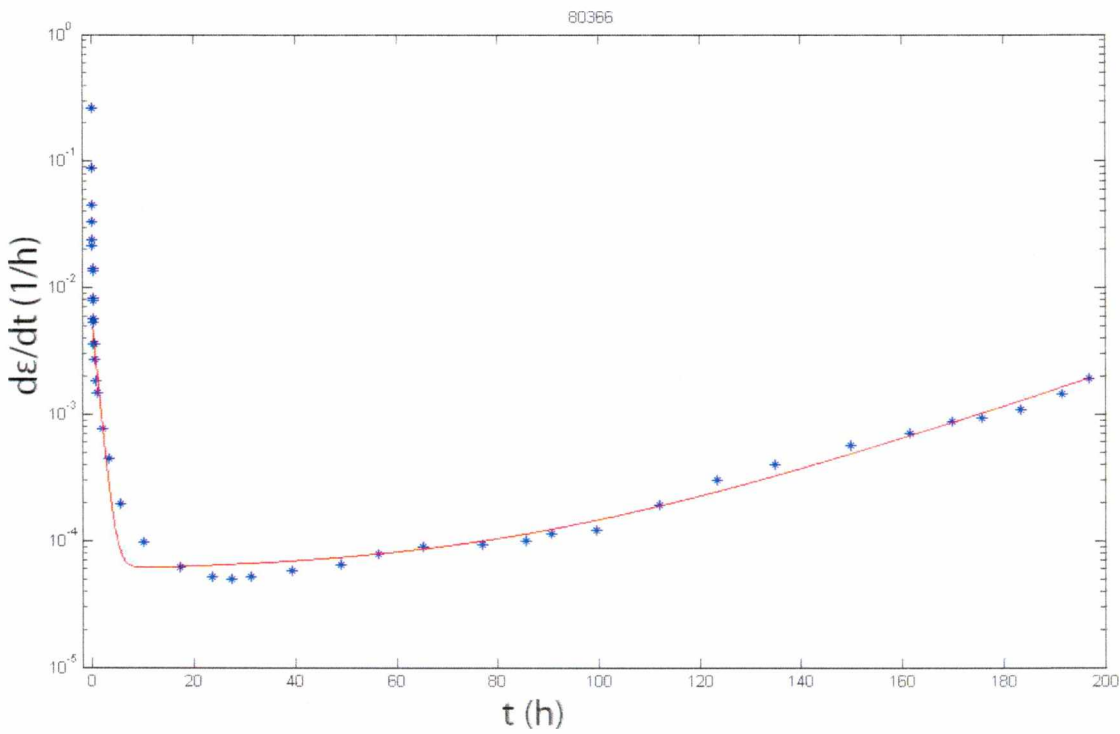


(β)

Σχ. 4.1.25 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 180 Mpa  
 β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $de/dt$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 180 Mpa



(α)

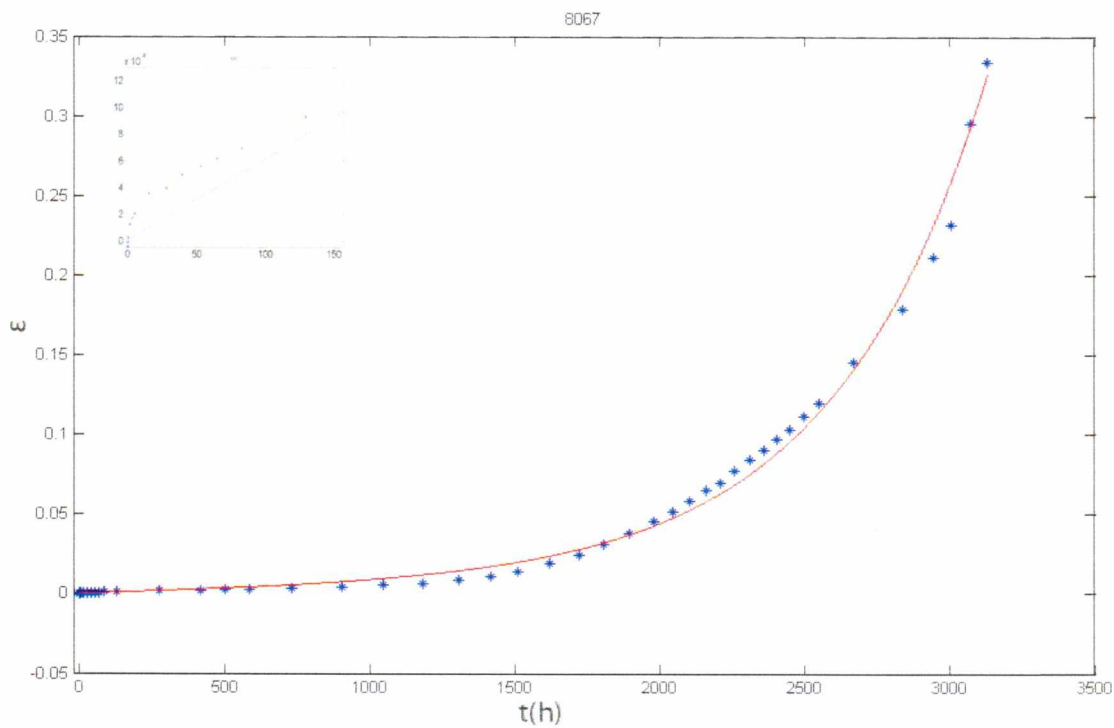


(β)

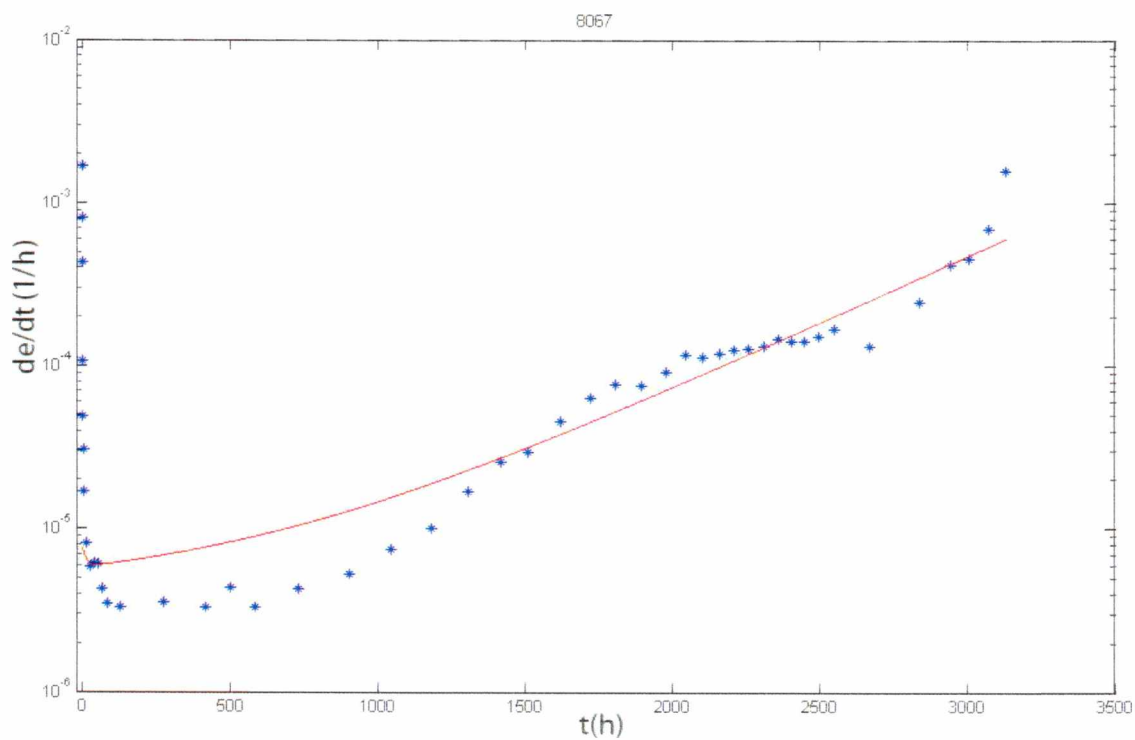
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0099	0,98	5,52E-05	4,03E-06	0,031185

Σχ. 4.1.26 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου





(α)

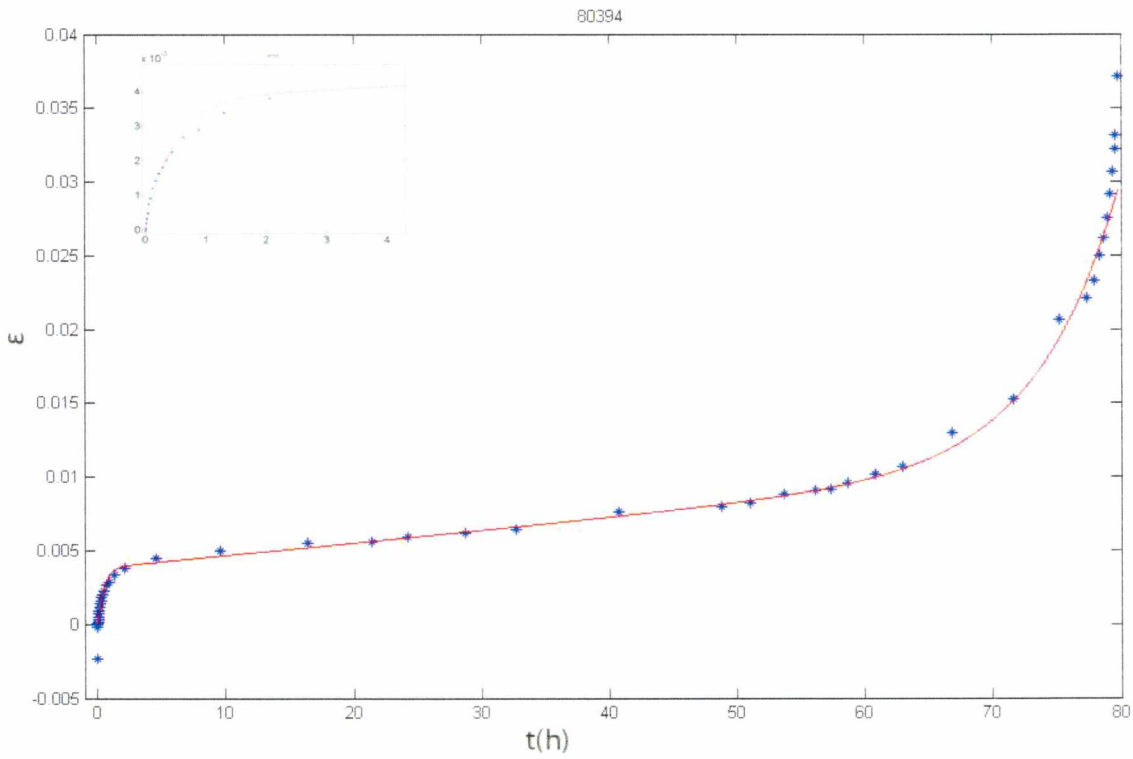


(β)

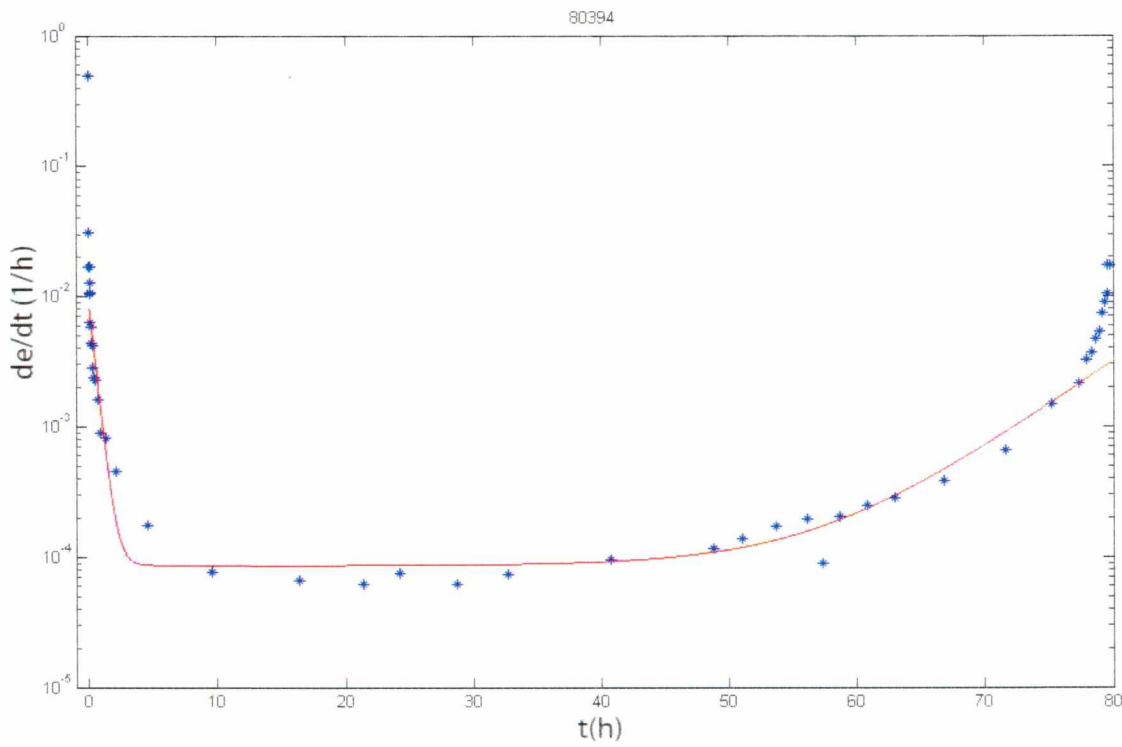
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,000524	0,0756	4,22E-06	1,56E-06	0,0019

Σχ. 4.1.27

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



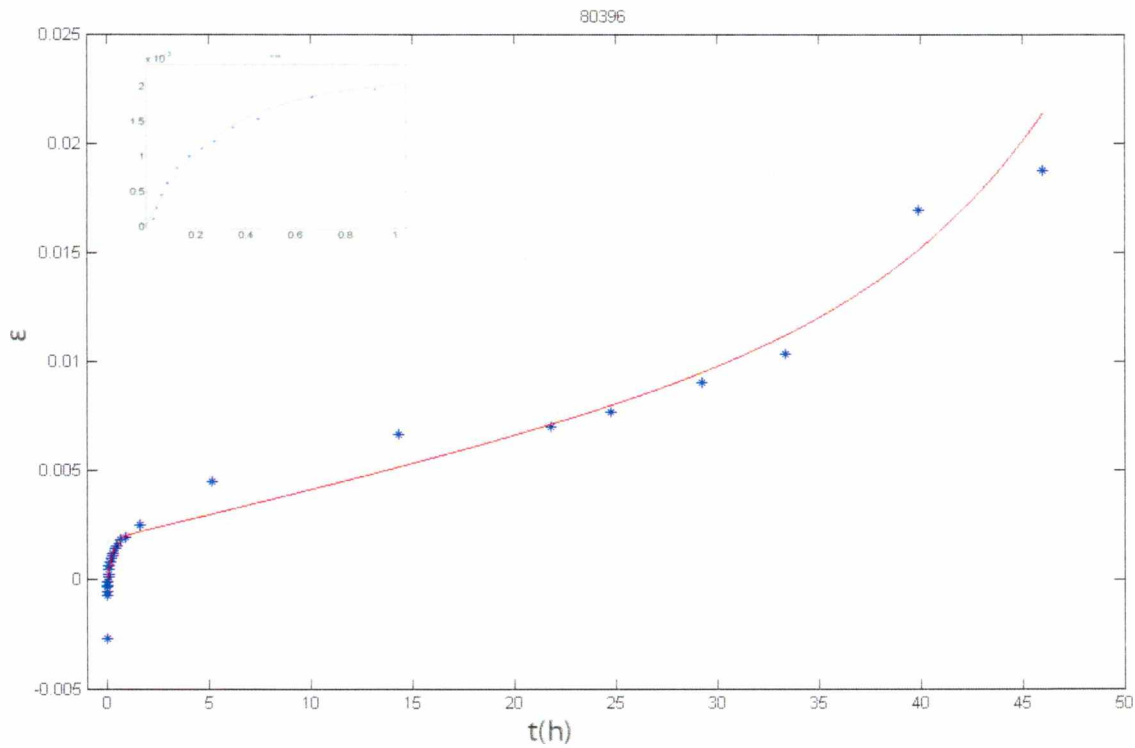
(α)



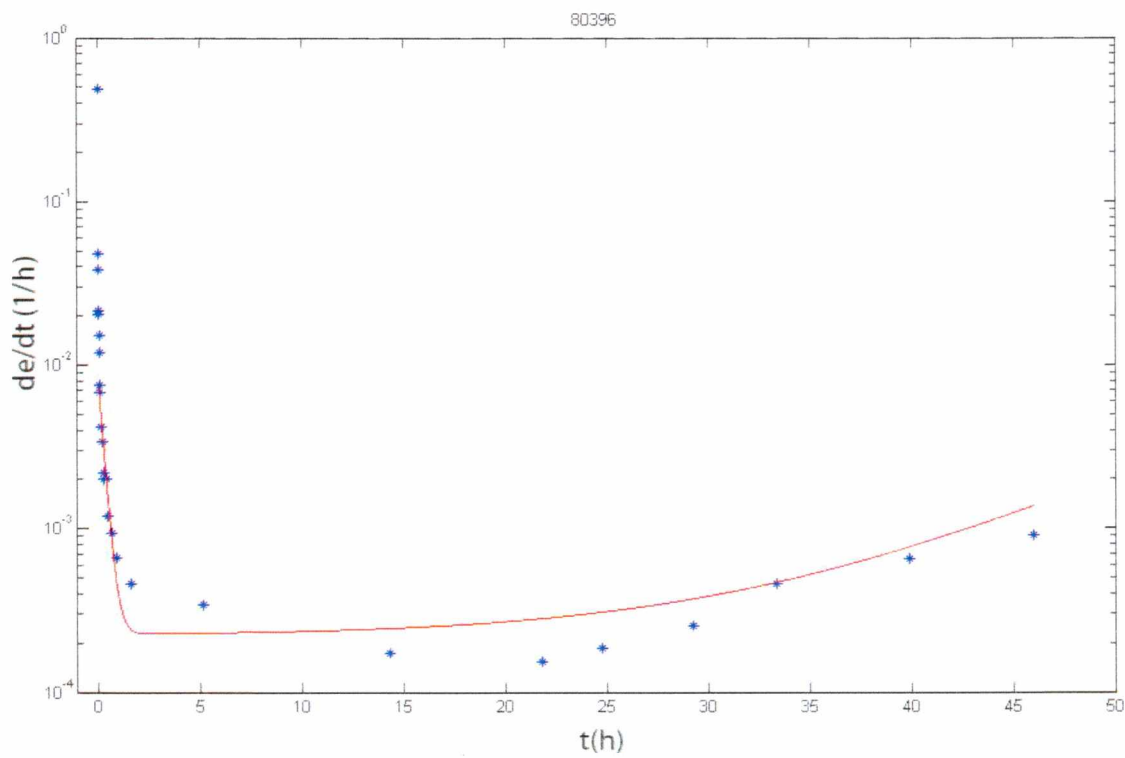
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,0123	2,11	0,000086	$1,05E-08$	0,15741

Σχ. 4.1.28 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσεως του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου



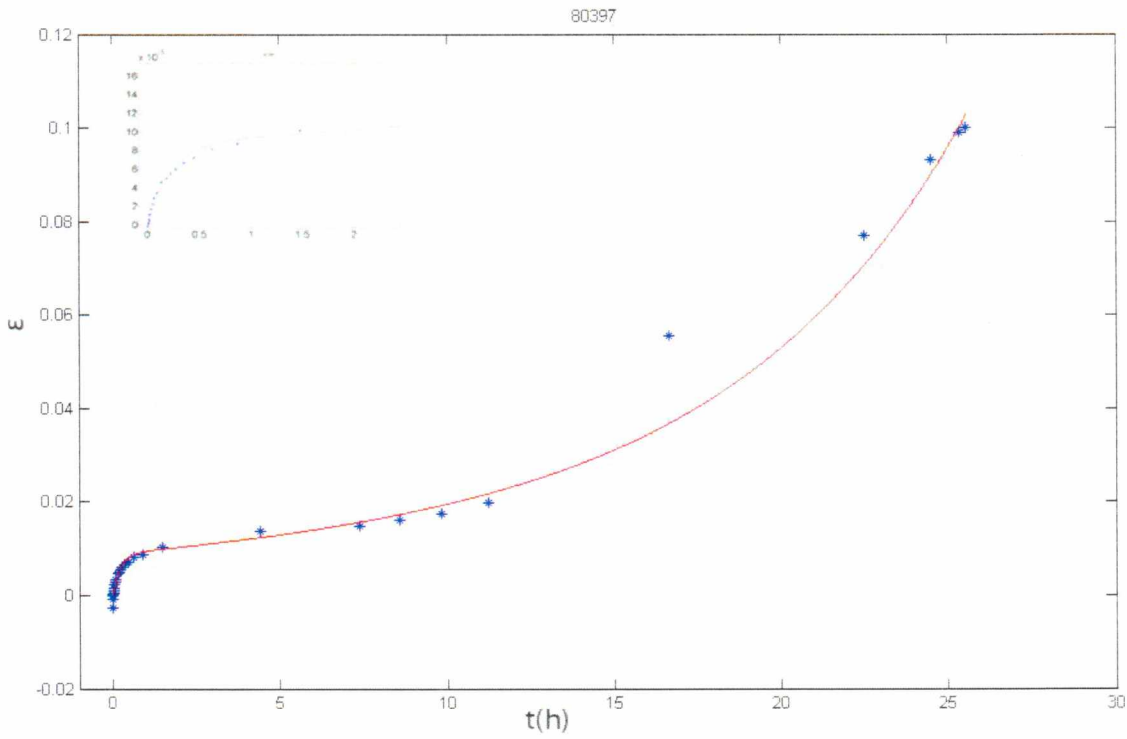
(α)



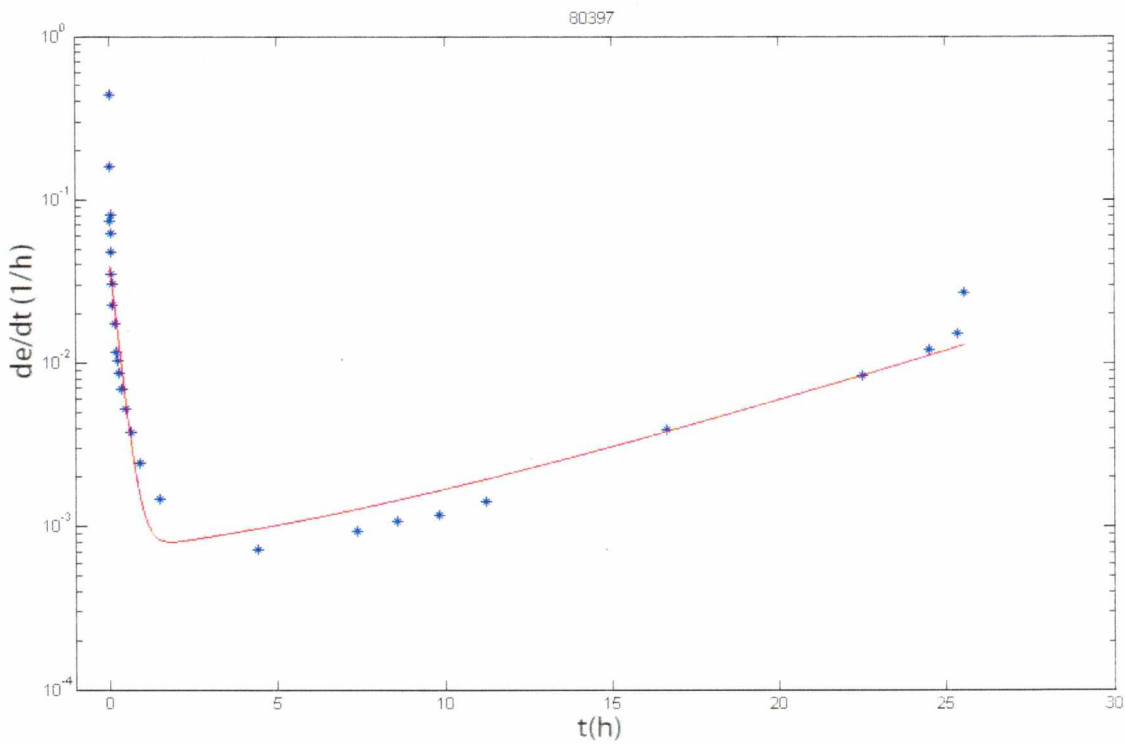
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,00784	3,93	0,000221	4,2E-06	0,122

Σχ. 4.1.29 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

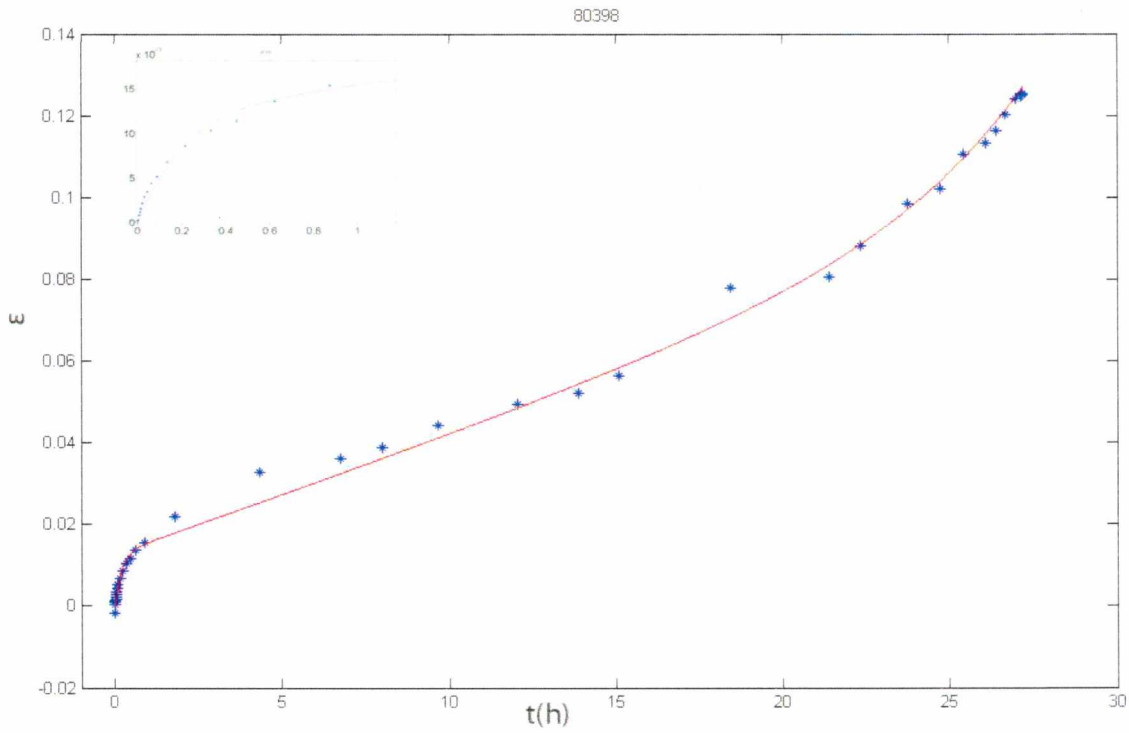


(β)

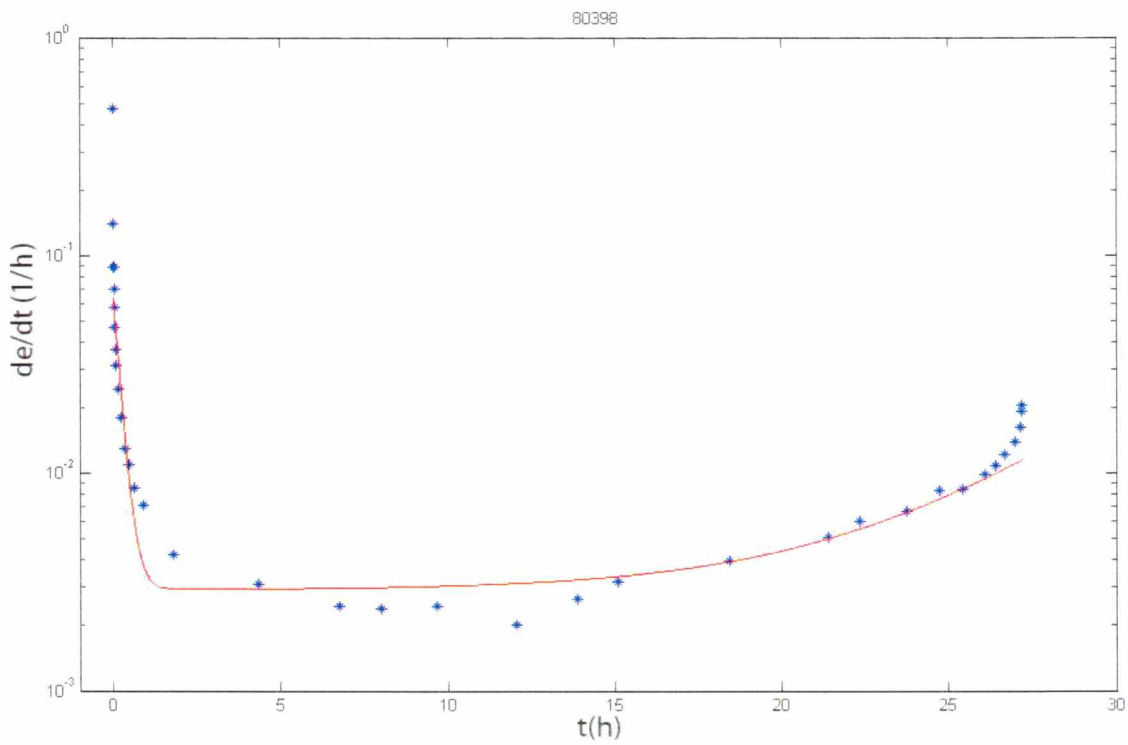
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,016758	4,389	0,000398	0,000301	0,146

Σχ. 4.1.30

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



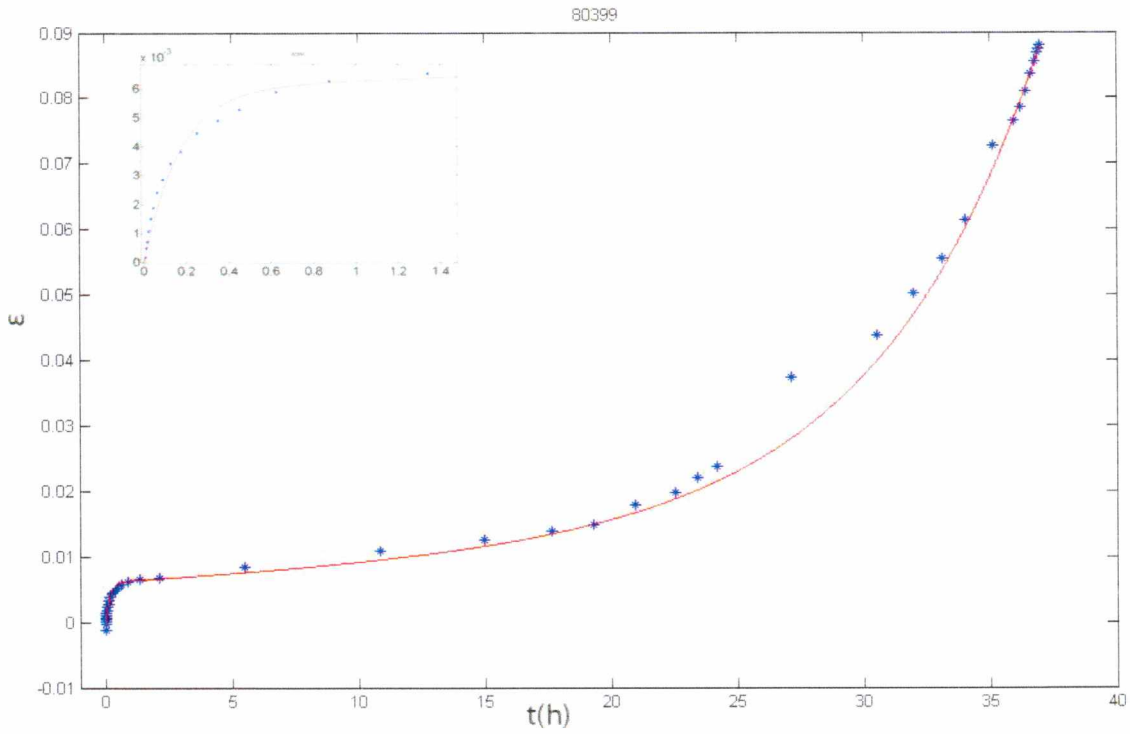
(α)



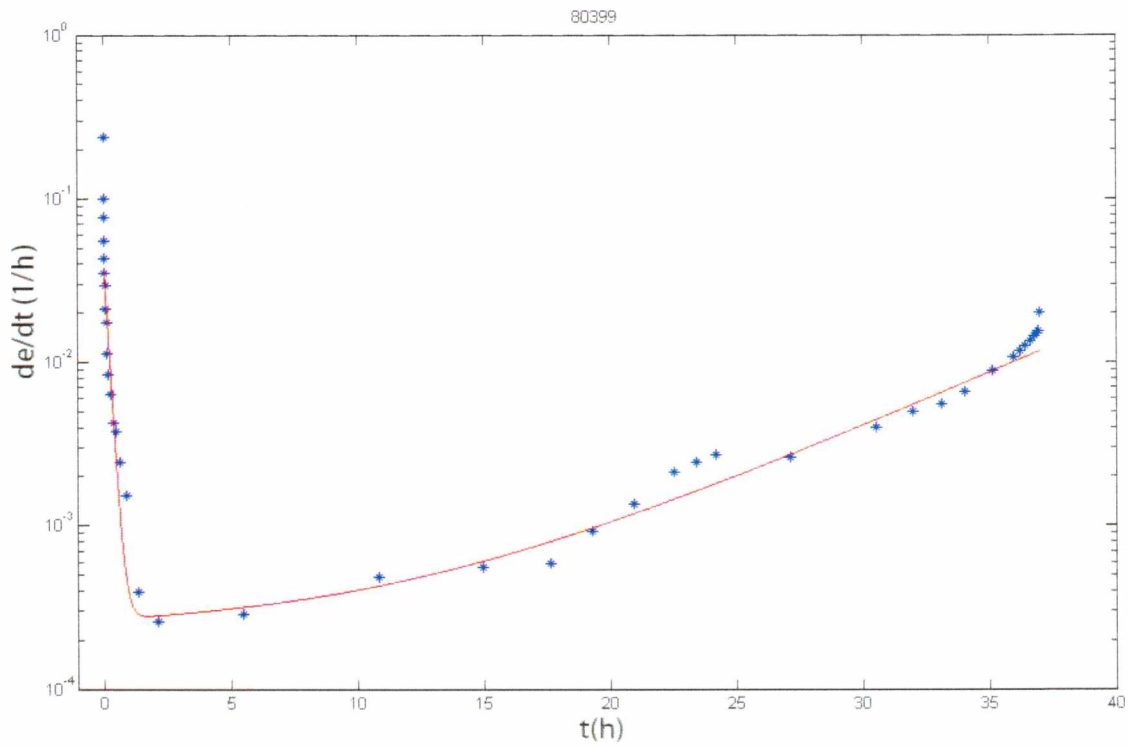
(β)

$\varepsilon_p$	$q$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_t$	$n$
0,01764	4,862	0,00291	1,16E-05	0,243

Σχ. 4.1.31 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



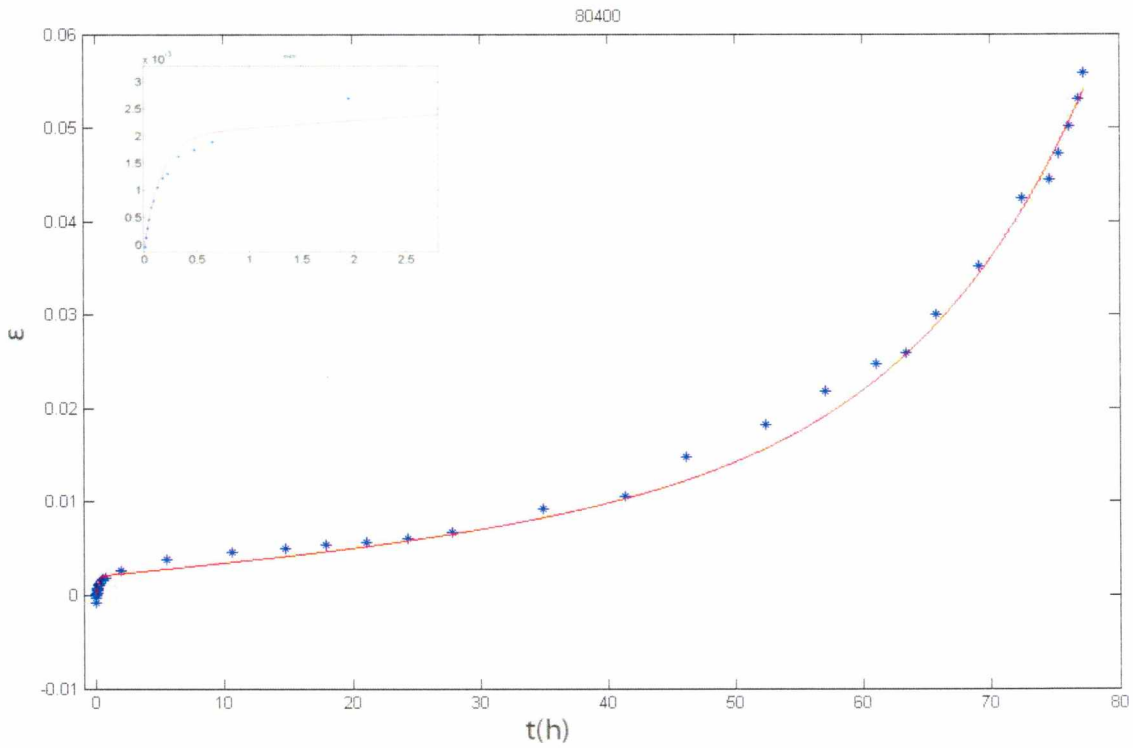
(α)



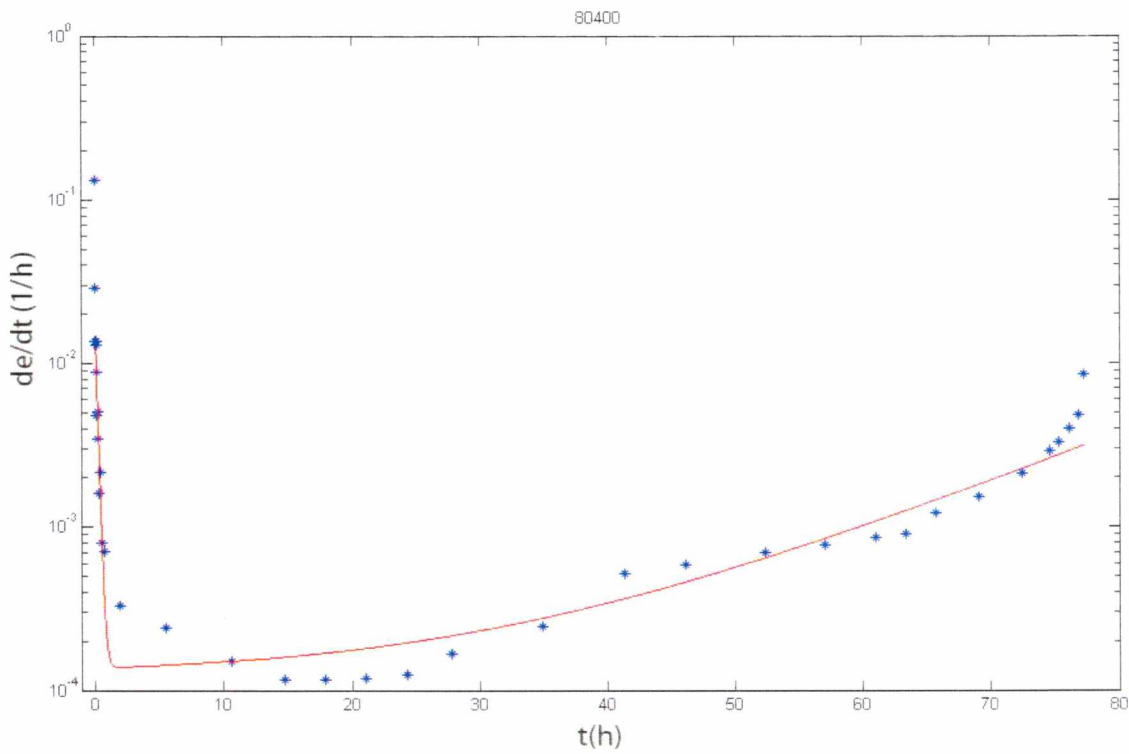
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,013	5,964	0,000229	0,000037	0,155

Σχ. 4.1.32 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 180 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

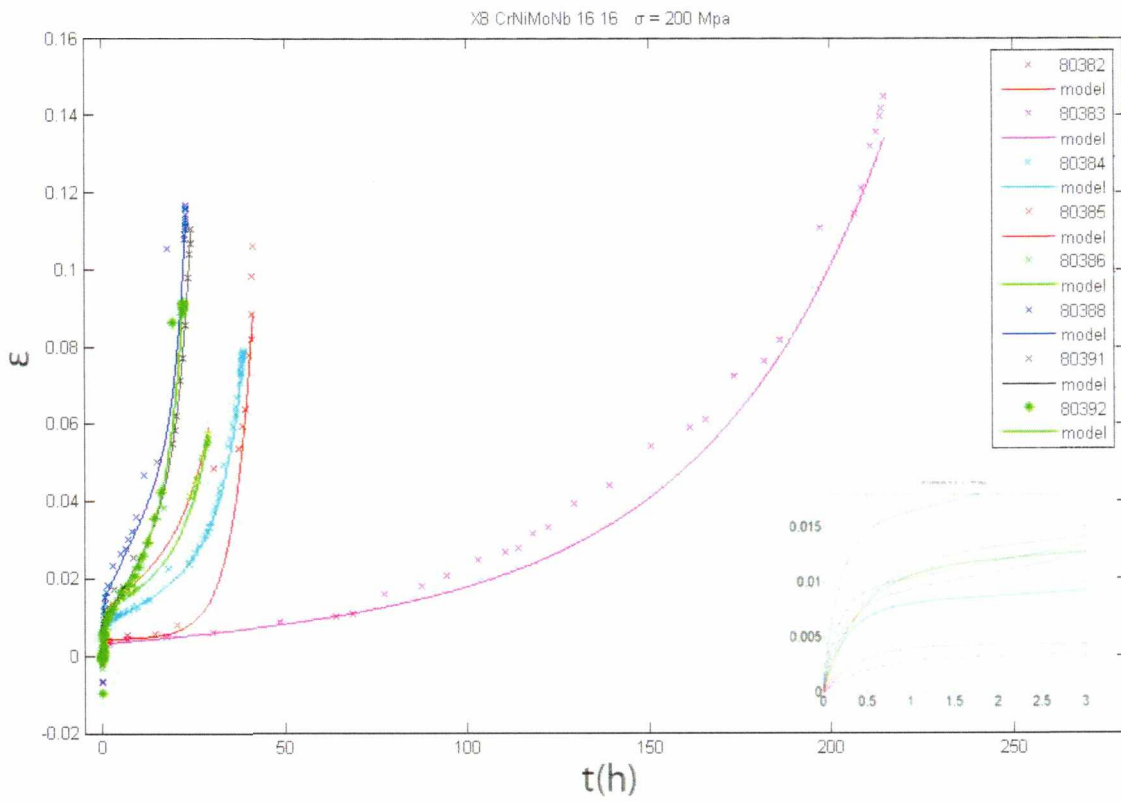


(β)

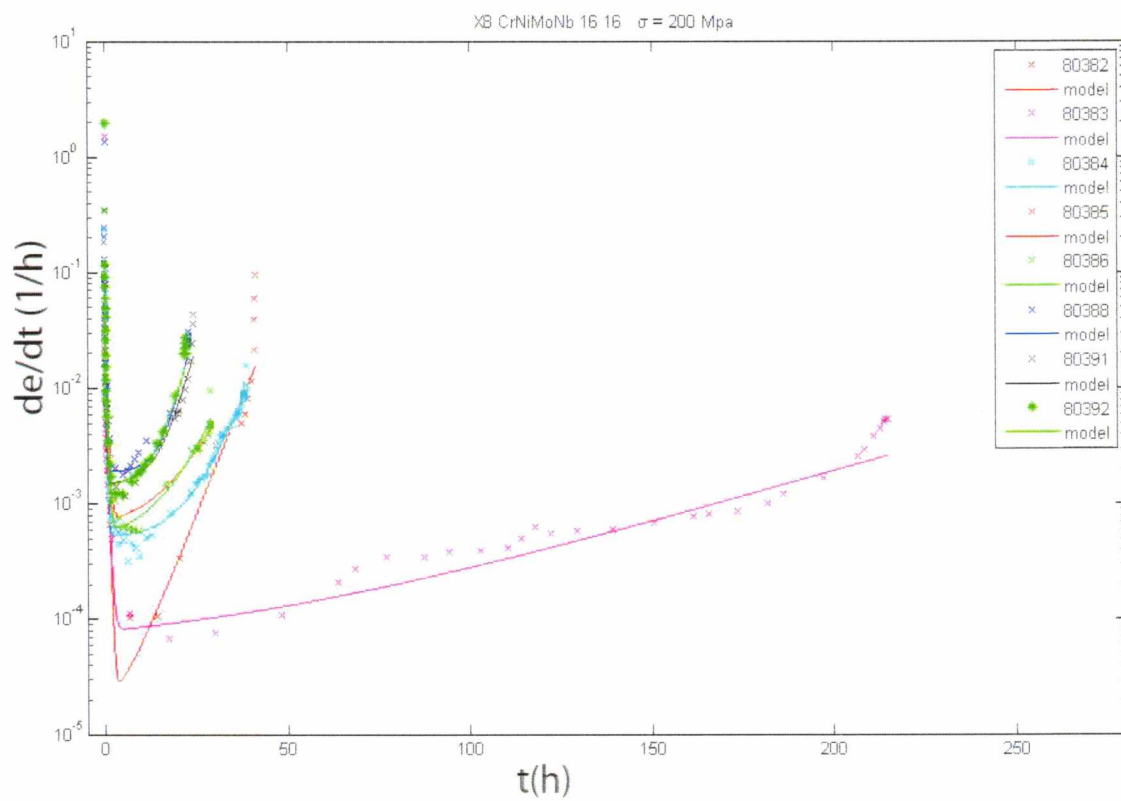
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,01001	6,16	0,000123	1,32E-05	0,070296

Σχ. 4.1.33

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσεως του χρόνου σε τάση 180 ΜΡα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου



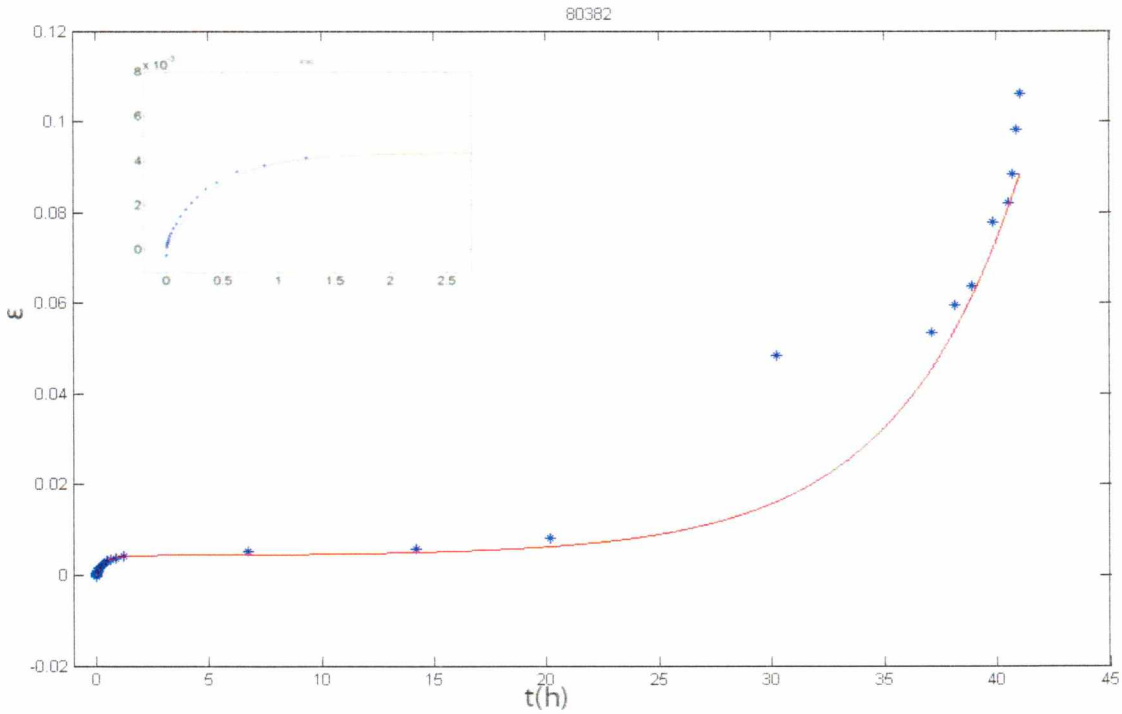
(α)



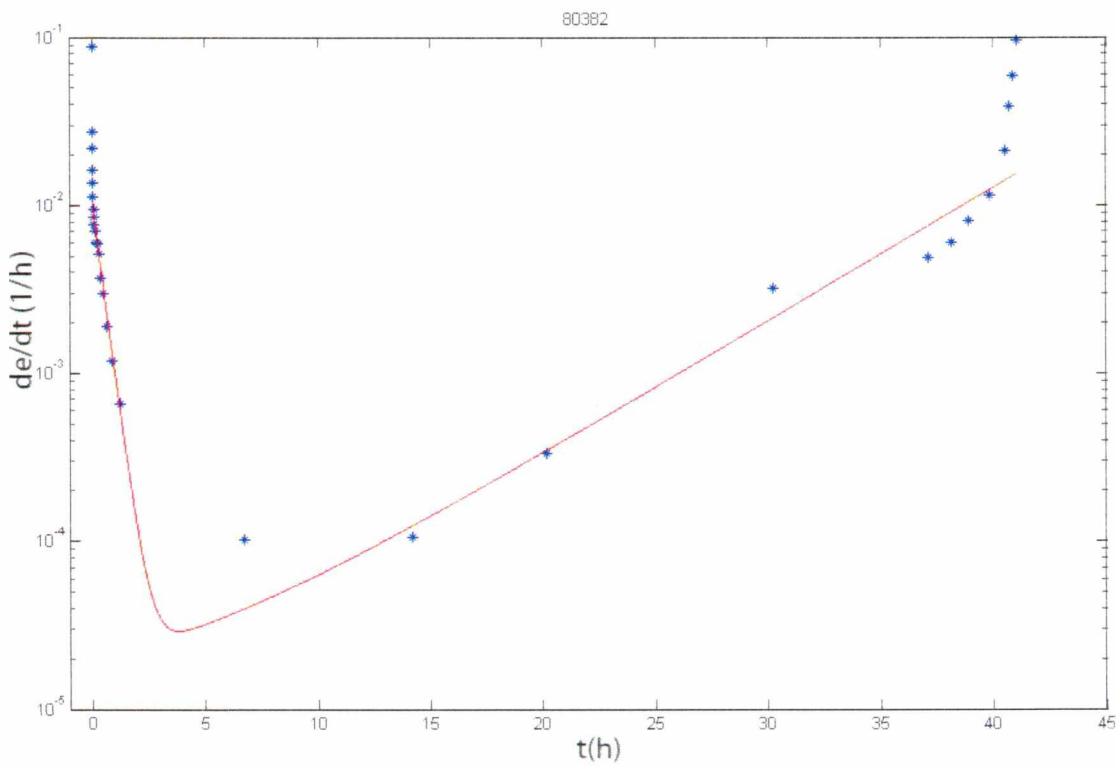
(β)

Σχ. 4.1.34 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 200 Mpa  
 β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $de/dt$ - $t$  των πειραμάτων της τάσης 200 Mpa





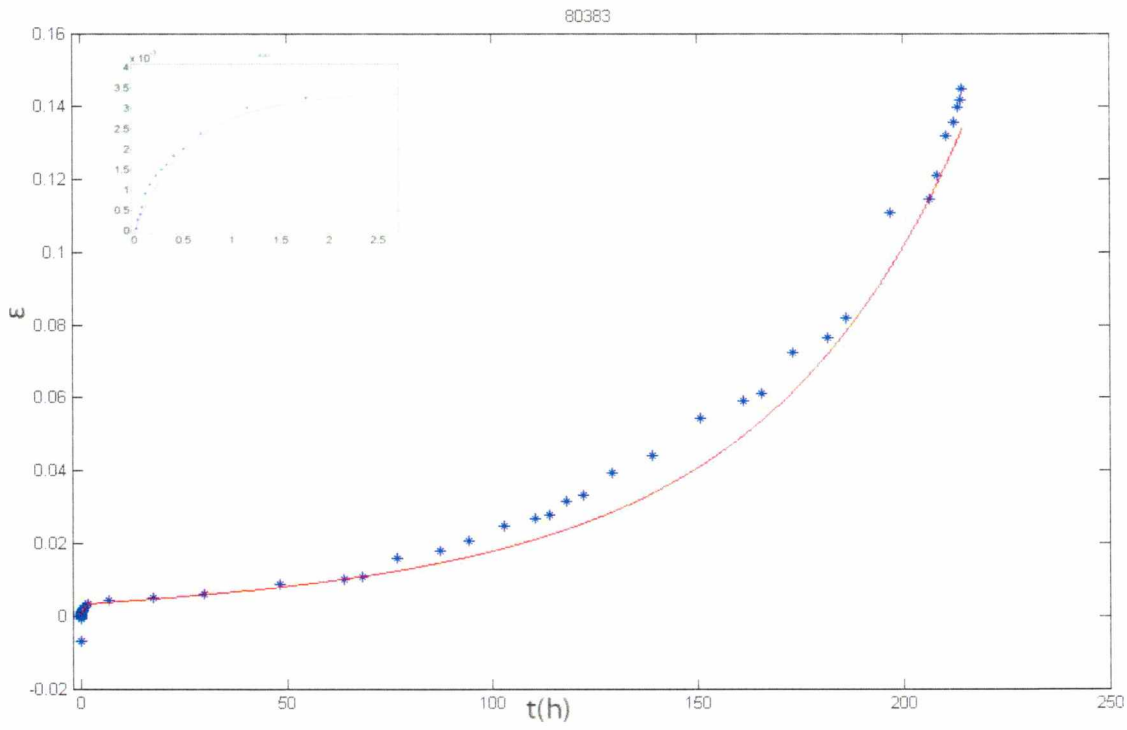
(α)



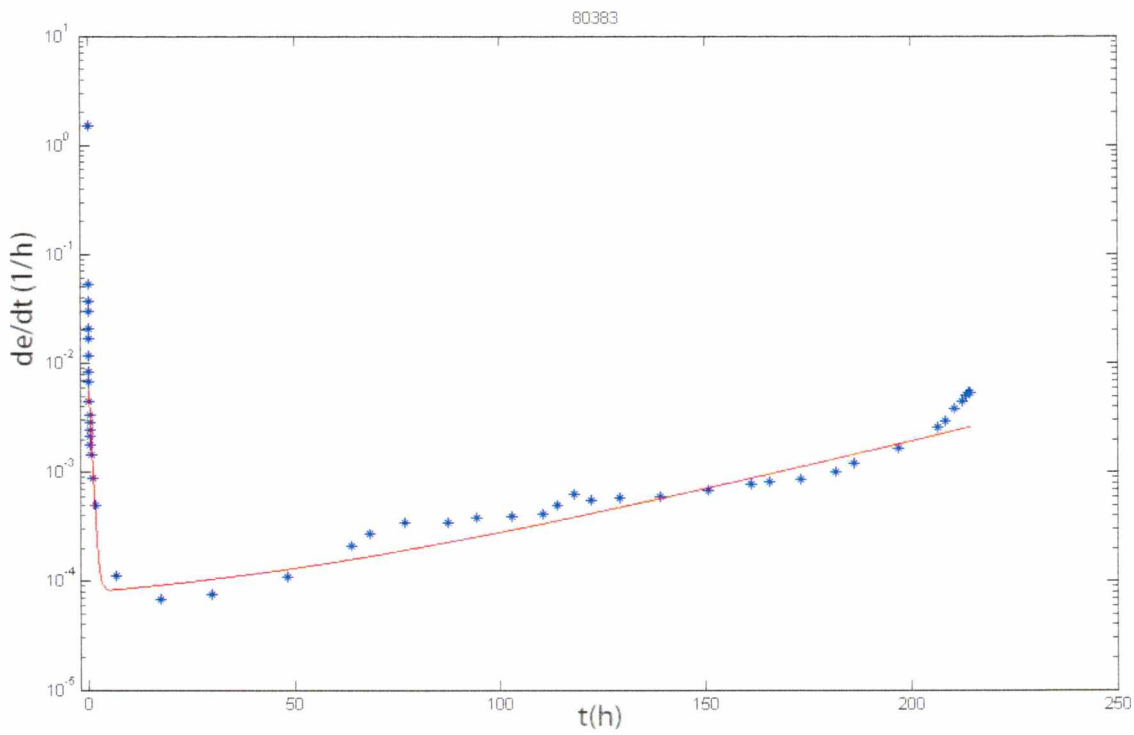
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,005795	2,336	1,09E-05	8,4E-06	0,18312

Σχ. 4.1.35 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)

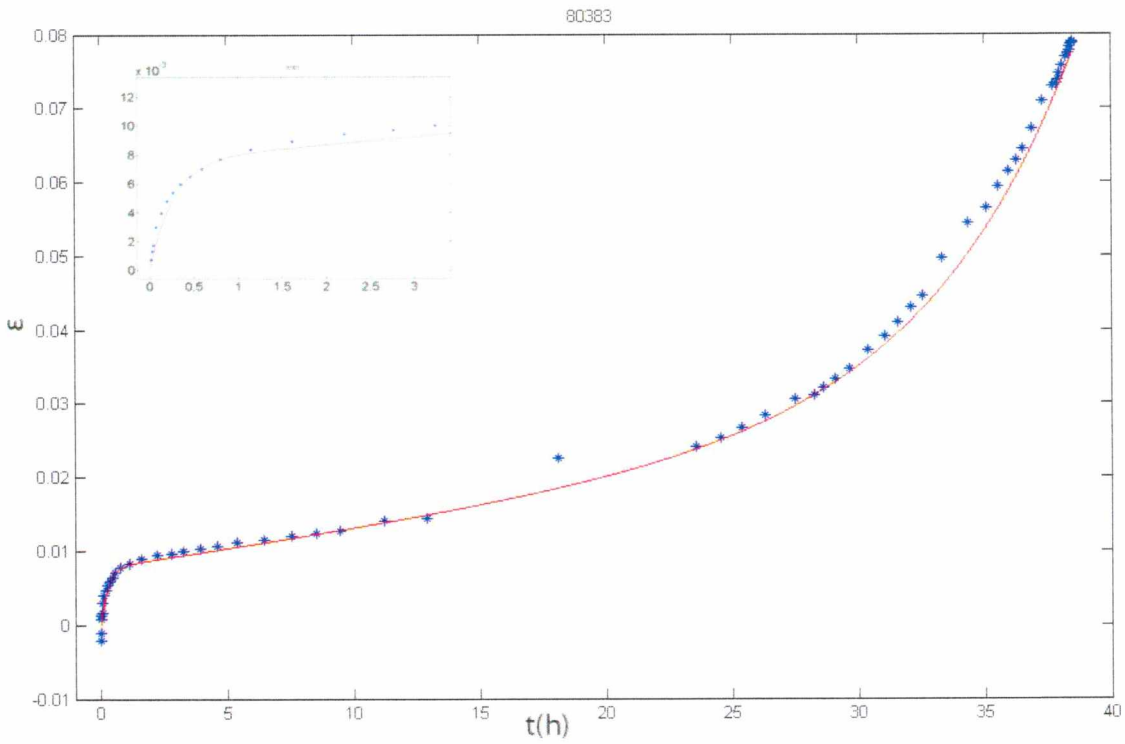


(β)

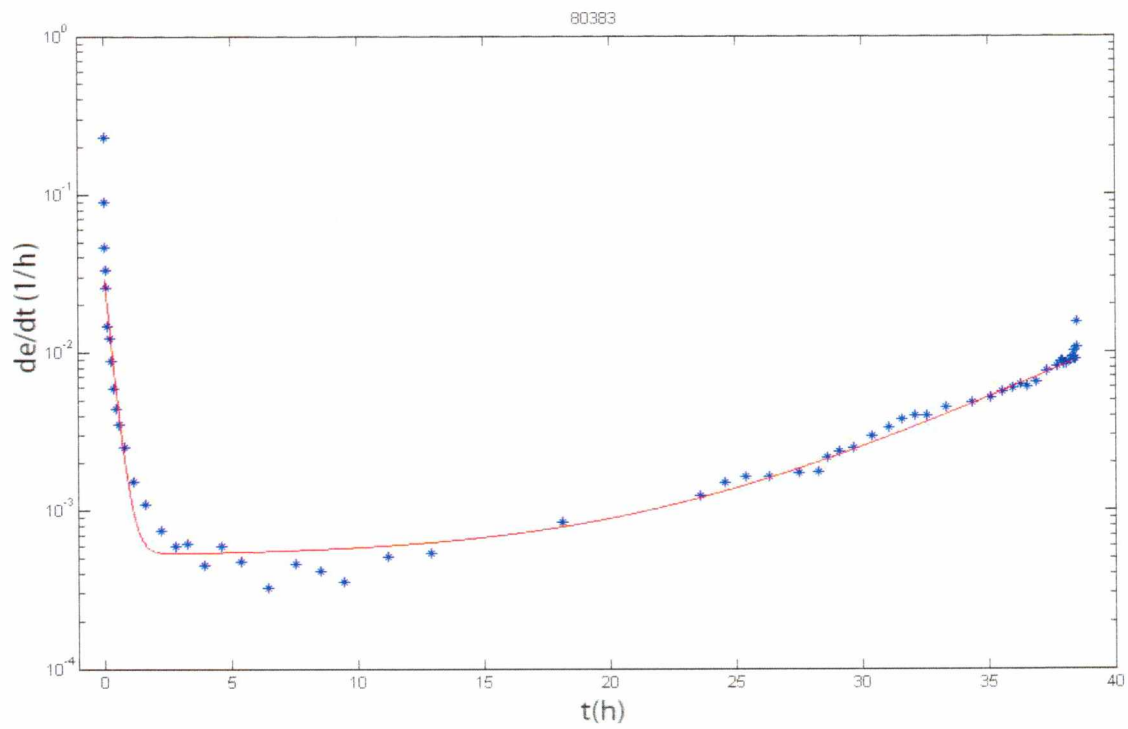
$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,01067	1,845	0,000051	2,82E-05	0,021

Σχ. 4.1.36

α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



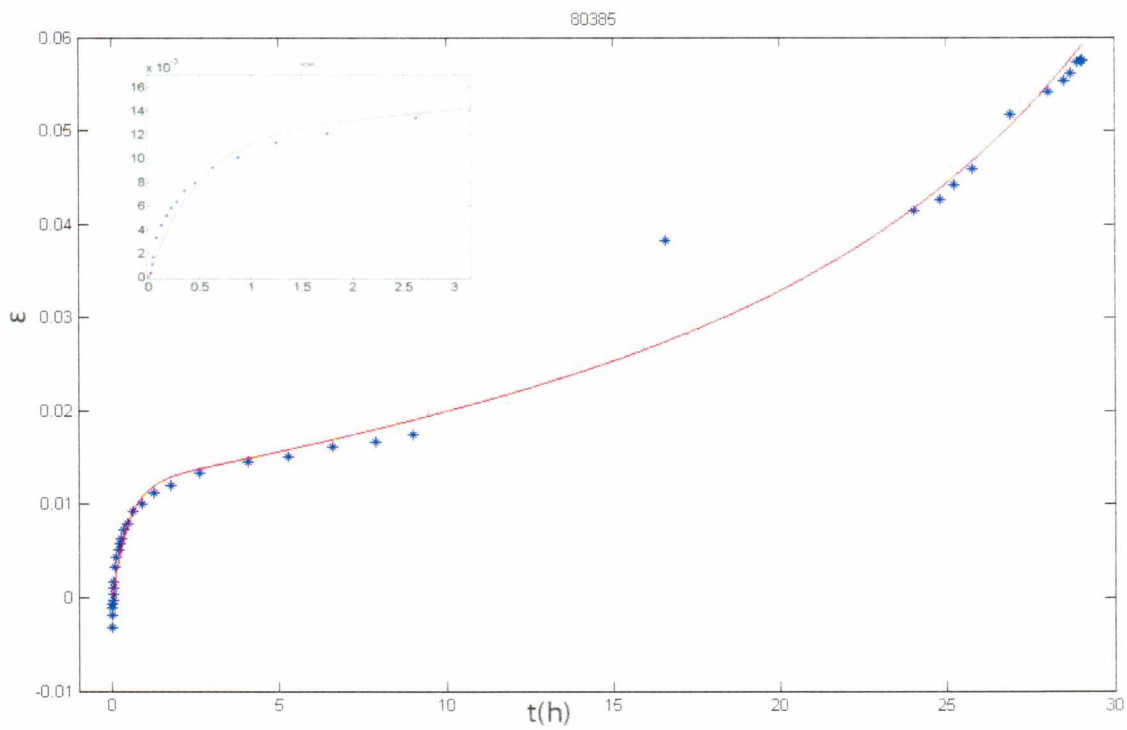
(α)



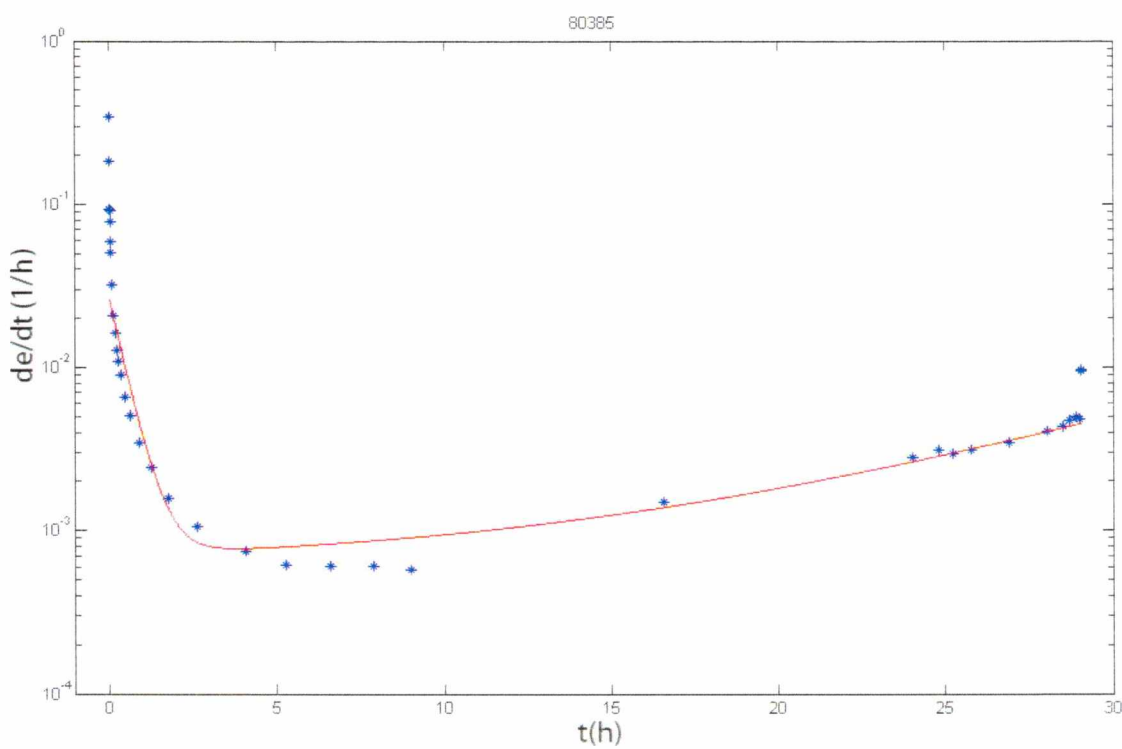
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$\eta$
0,01666	3,688	0,000513	0,000013	0,1683

Σχ. 4.1.37 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσεως του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσεως του χρόνου



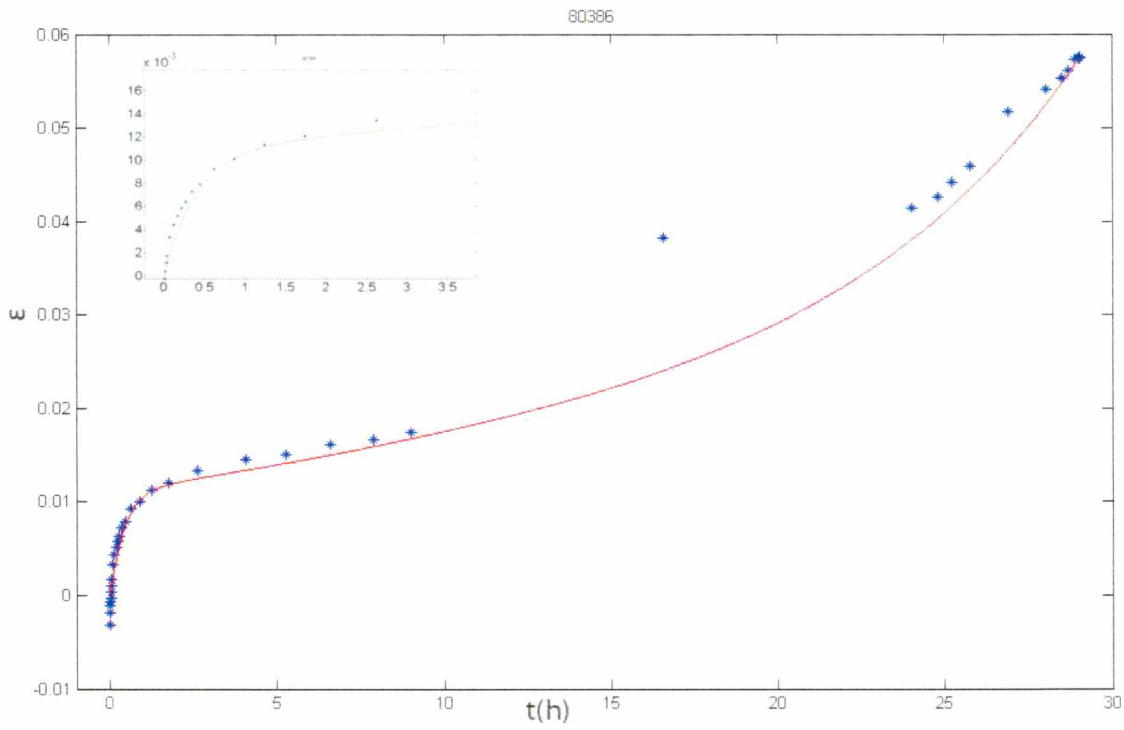
(α)



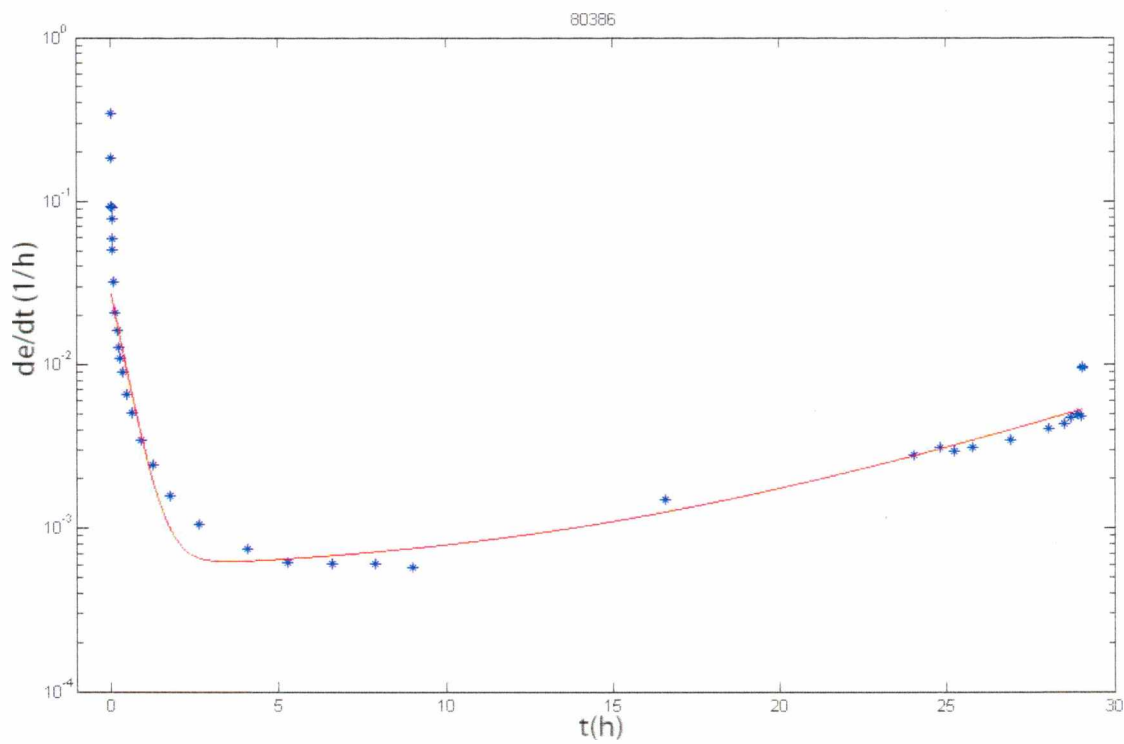
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,020907	2,13	0,000624	8,77E-05	0,13056

Σχ. 4.1.38 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



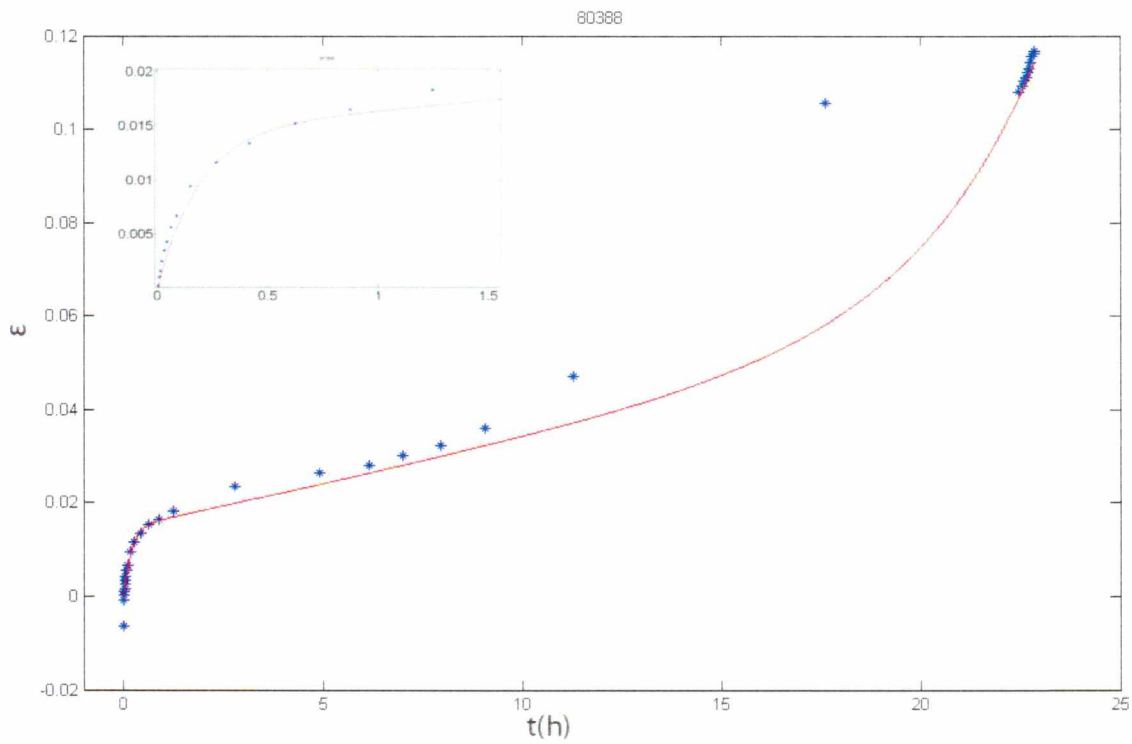
(α)



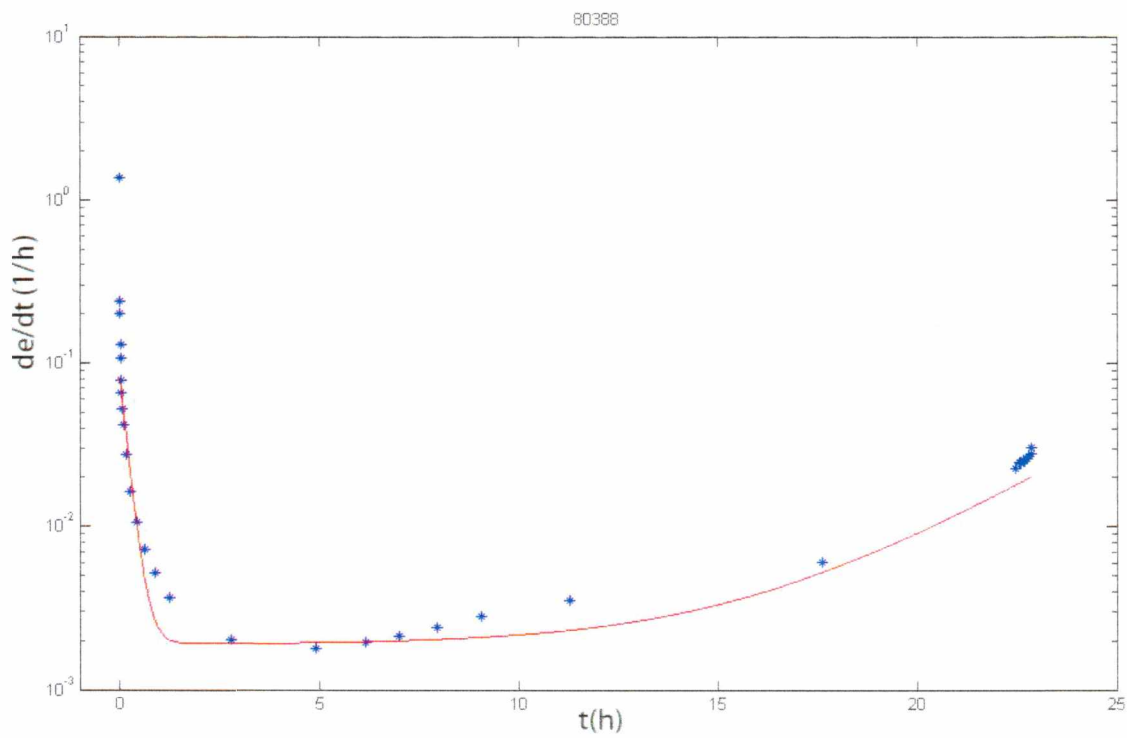
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,01995	2,412	0,000514	6,25E-05	0,14948

Σχ. 4.1.39 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



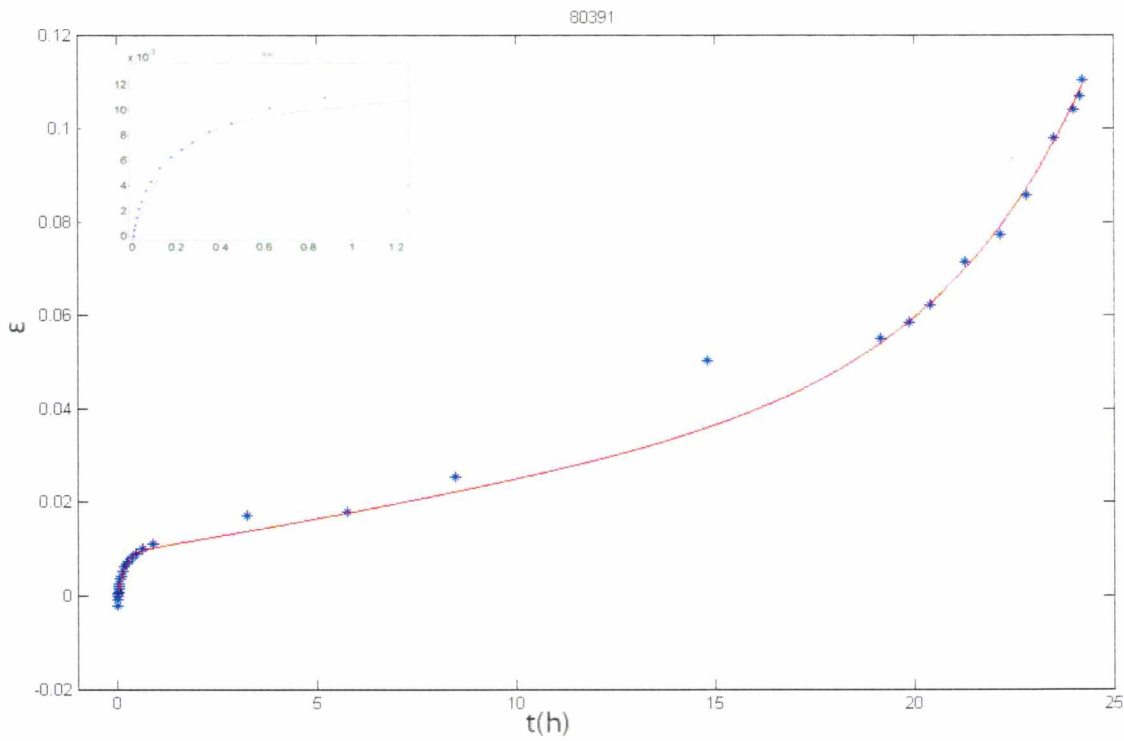
(α)



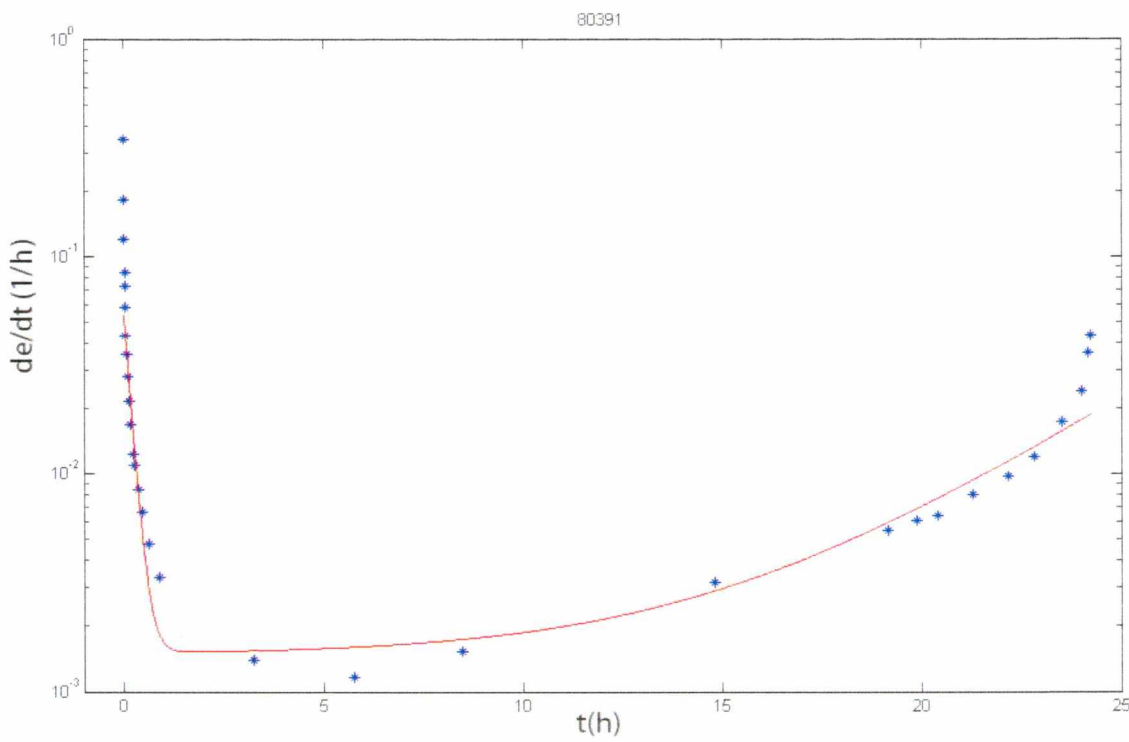
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$\eta$
0,02755	5,355	0,00189	1,11E-05	0,324

Σχ. 4.1.40 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
 β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



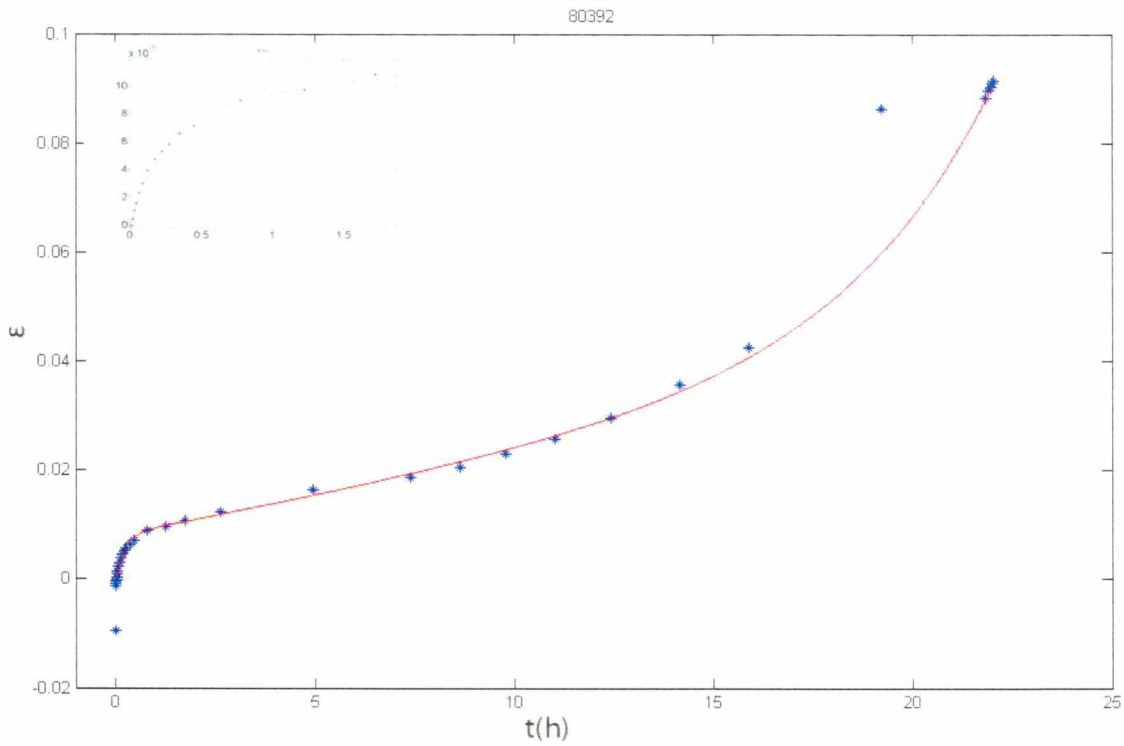
(α)



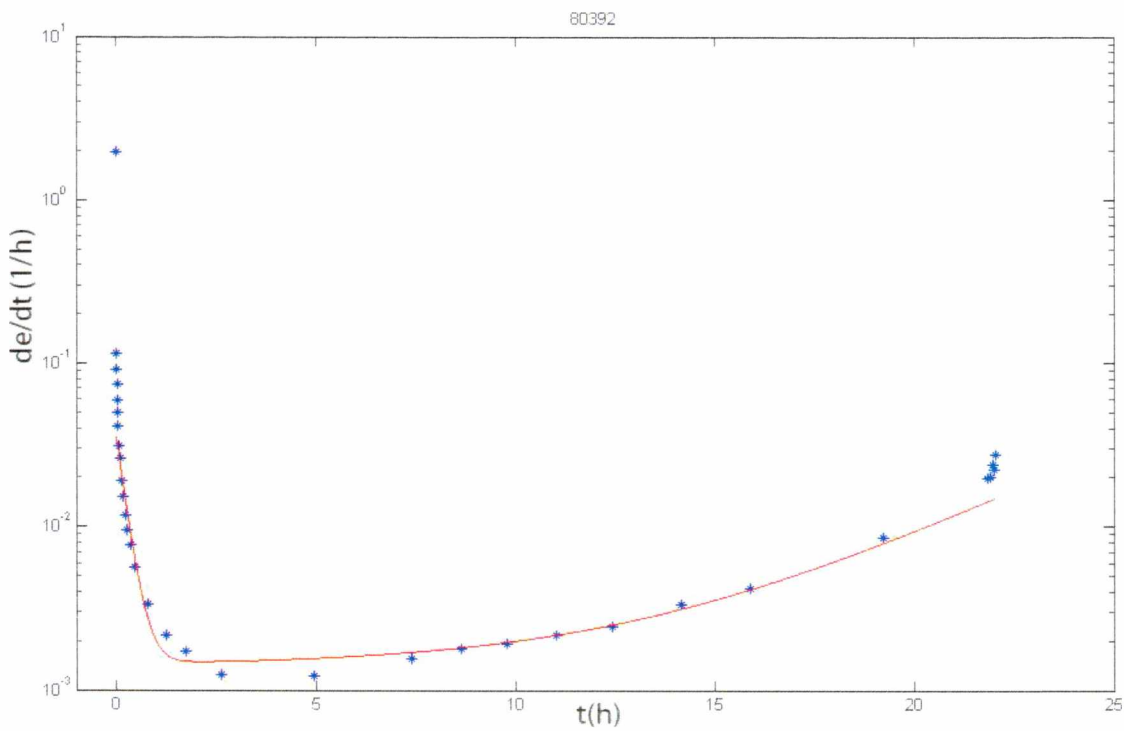
(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,01785	5,832	0,001474	2,85E-05	0,26418

Σχ. 4.1.41 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



(α)



(β)

$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
0,022	4,22	0,00141	$4,31E-05$	0,261

Σχ. 4.1.42 α) Μονοαξονική ερπυστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου σε τάση 200 Μρα  
β) Ρυθμός μεταβολής της ερπυστικής παραμόρφωσης συναρτήσει του χρόνου



## 4.2 Υπολογισμός μέσης τιμής παραμέτρων

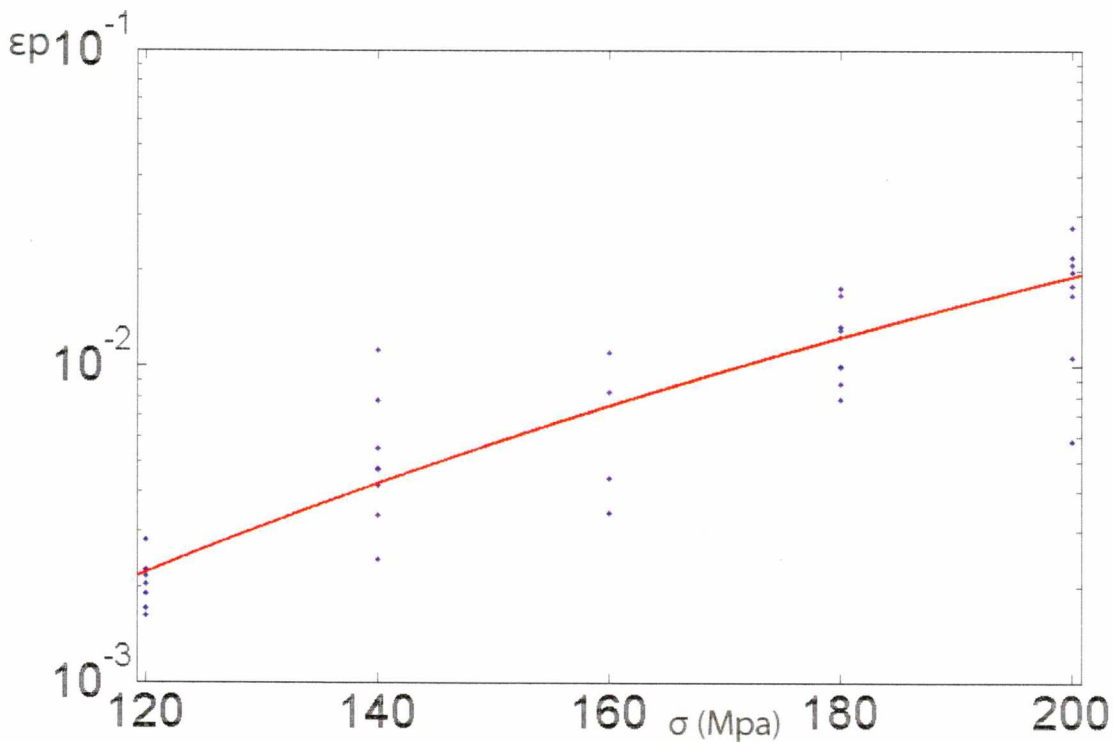
Μετά τον τελικό υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου παραστήσαμε την κάθε παράμετρο ξεχωριστά συναρτήσεως των τάσεων. Έπειτα προσαρμόσαμε με την βοήθεια των ελάχιστων τετραγώνων βαρύτητας (κεφ. 3.3.2) μία δυναμική καμπύλη της μορφής.

$$y = a \sigma^b \quad (\text{εξ. 4.1})$$

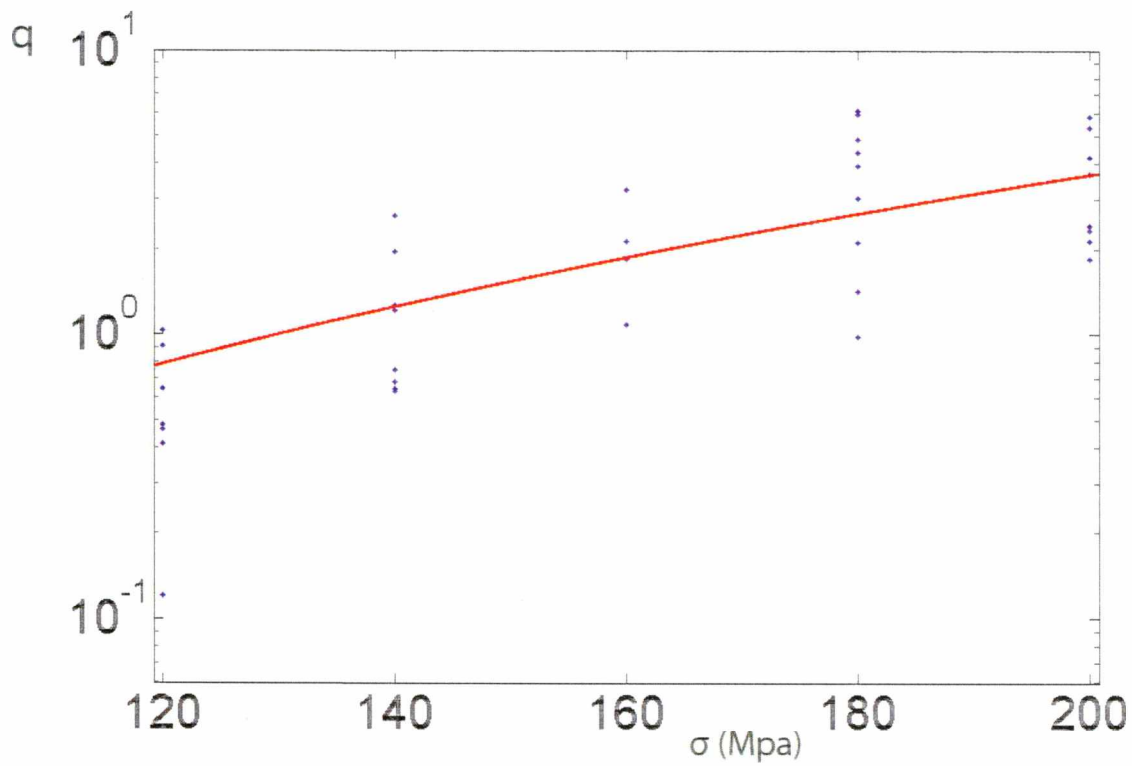
όπου  $y$  η κάθε παράμετρος και  $\sigma$  η αντίστοιχη τάση.

Το πείραμα 8067 που είναι το μόνο σε τάση 100 MPa δεν λήφθηκε υπόψη στον υπολογισμό των μέσων παραμέτρων

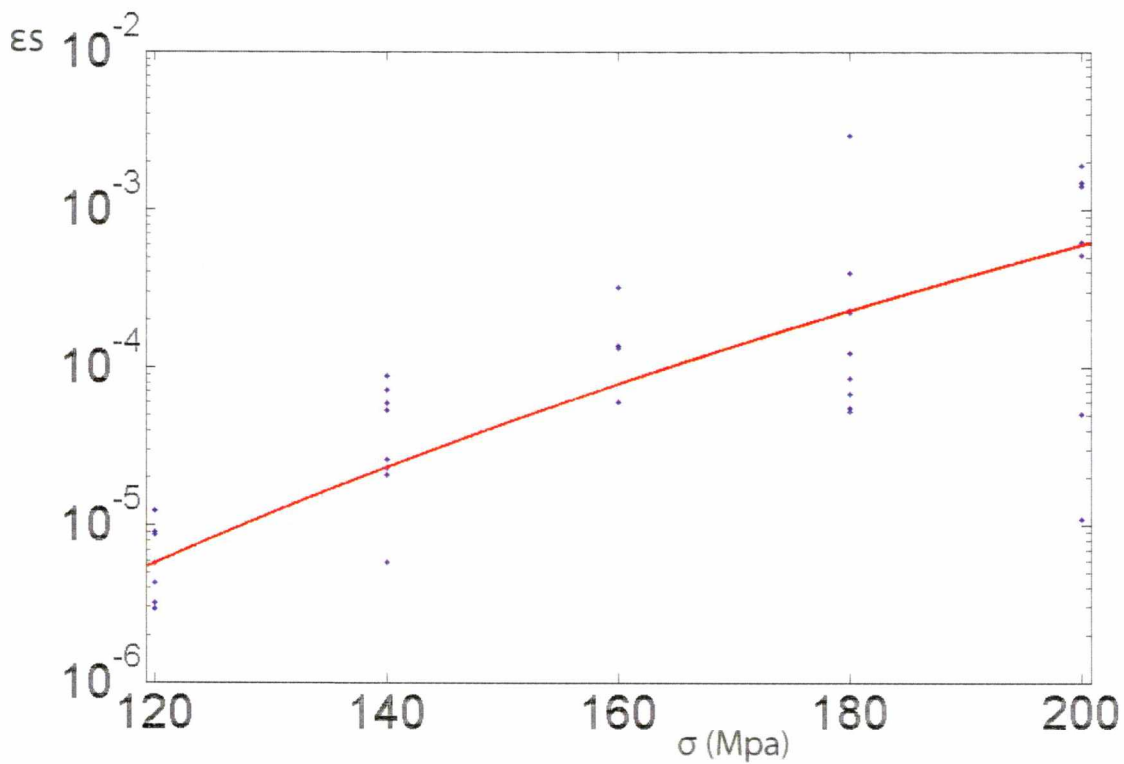
Τα αποτελέσματα της προσαρμογής αυτής φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα σε ημιλογαριθμική κλίμακα:



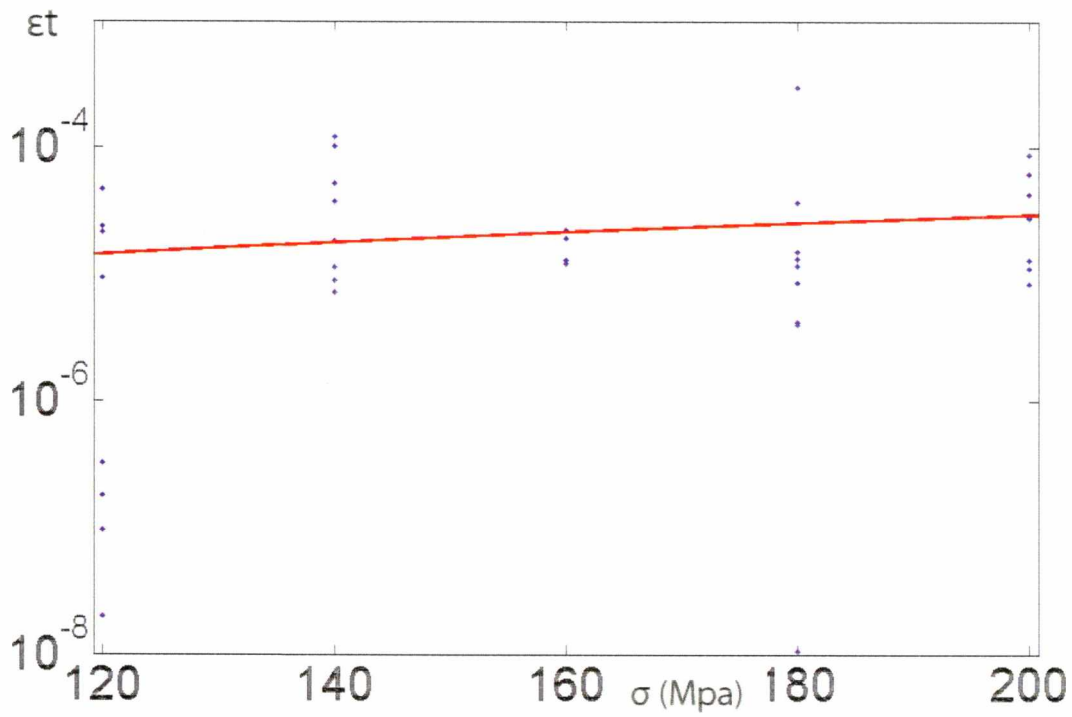
Σχ. 4.2.1 Διάγραμμα της παραμέτρου  $\epsilon_p$  με την τάση και η προσαρμογή της καμπύλης  $y = a \sigma^b$ .



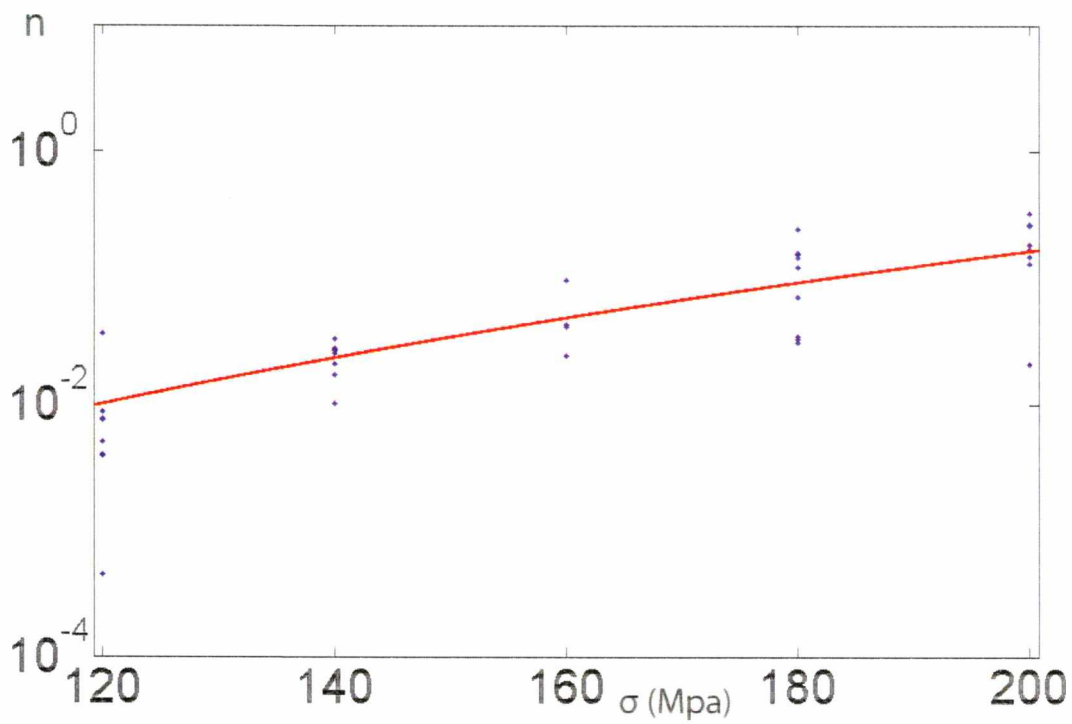
Σχ. 4.2.2 Διάγραμμα της παραμέτρου  $q$  με την τάση και η προσαρμογή της καμπύλης  $y = a \sigma^b$ .



Σχ. 4.2.3 Διάγραμμα της παραμέτρου  $\epsilon_s$  με την τάση και η προσαρμογή της καμπύλης  $y = a \sigma^b$ .



Σχ. 4.2.4 Διάγραμμα της παραμέτρου  $\epsilon_t$  με την τάση και η προσαρμογή της καμπύλης  $y = a\sigma^b$ .



Σχ. 4.2.5 Διάγραμμα της παραμέτρου  $n$  με την τάση και η προσαρμογή της καμπύλης  $y = a\sigma^b$ .

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας των σταθερών  $a$ ,  $b$  που προήλθαν από την προσαρμογή της εξίσωσης  $y = a \sigma^b$  (4.1) στον διάγραμμα παραμέτρων – τάσεων.

<b>y</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
$\epsilon_p$	3,78E-12	4,22
$q$	4,55E-07	3,01
$\epsilon_s$	7,98E-25	9,071
$\epsilon_t$	1,67E-08	1,415
$n$	4,60E-14	5,454

Πίνακας 4.3 Συντελεστές εξίσωσης υπολογισμού μέσης τιμής παραμέτρων μέσω της εξίσωσης  $y = a \sigma^b$ .

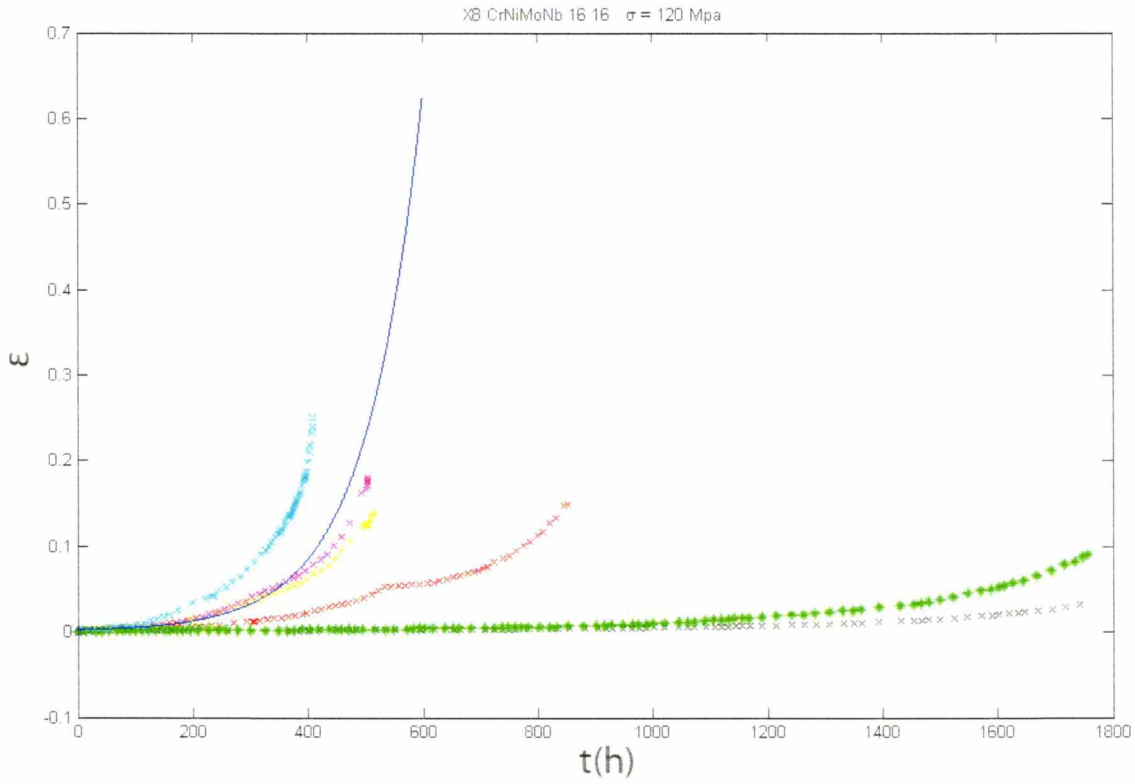
Με βάση αυτήν την προσέγγιση μπορούμε να υπολογίσουμε την «μέση τιμή» κάθε παραμέτρου ανά δεδομένη τάση, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.4.

$\sigma$	$\epsilon_p$	$q$	$\epsilon_s$	$\epsilon_t$	$n$
100	1,04E-03	0,476025	1,11E-06	1,13E-05	0,00372
120	0,002247	0,824072	5,78E-06	1,46E-05	0,010056
140	0,004307	1,310614	2,34E-05	1,82E-05	0,02331
160	0,007566	1,958983	7,86E-05	2,2E-05	0,048288
180	0,012438	2,792542	0,000229	2,6E-05	0,091796
200	0,019402	3,834685	0,000595	3,02E-05	0,163075

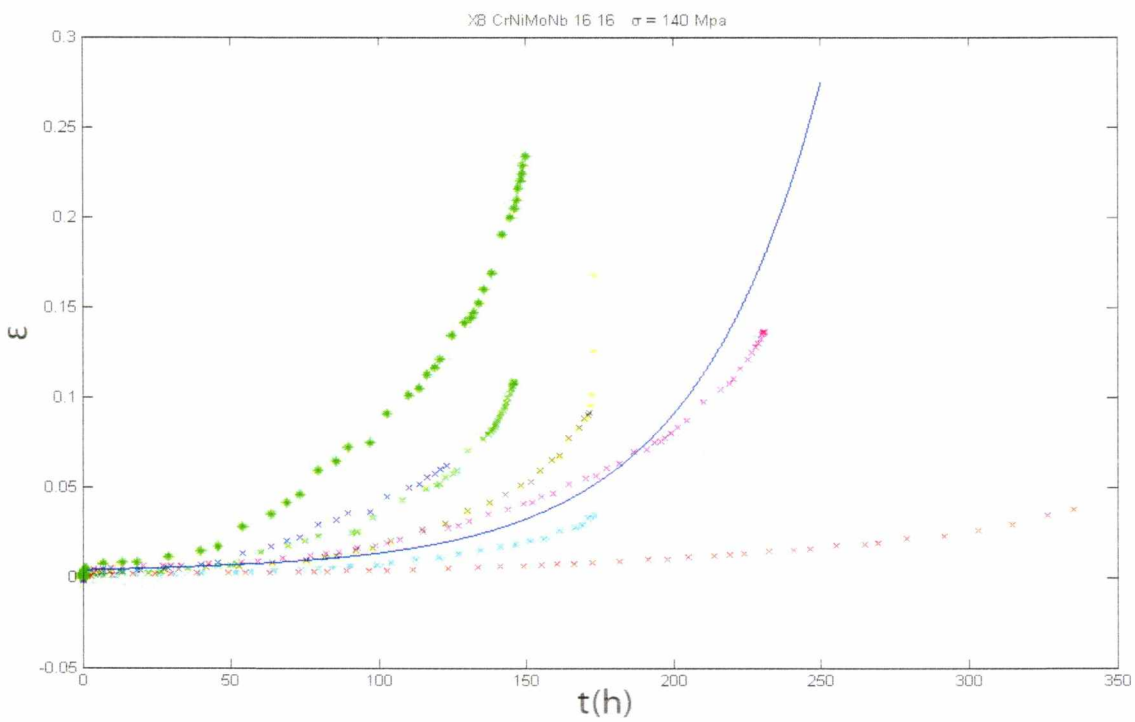
Πίνακας 4.4 Τιμές μέσων παραμέτρων για κάθε τάση.

Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να σχηματίσουν την εξίσωση παραμόρφωσης ερπυσμού με βάση την σχέση (3.10) για κάθε τάση ξεχωριστά, έτσι ώστε να συγκριθεί το αποτέλεσμα της ανάλυσης με τα πειραματικά δεδομένα κάθε τάσης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα παρακάτω.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των πειραμάτων κάθε τάσης συγκεντρωτικά μαζί με την καμπύλη που υπολογίστηκε από τις τιμές των μέσων παραμέτρων κάθε τάσης (Σχ. 4.2.6 μέχρι 4.2.10)



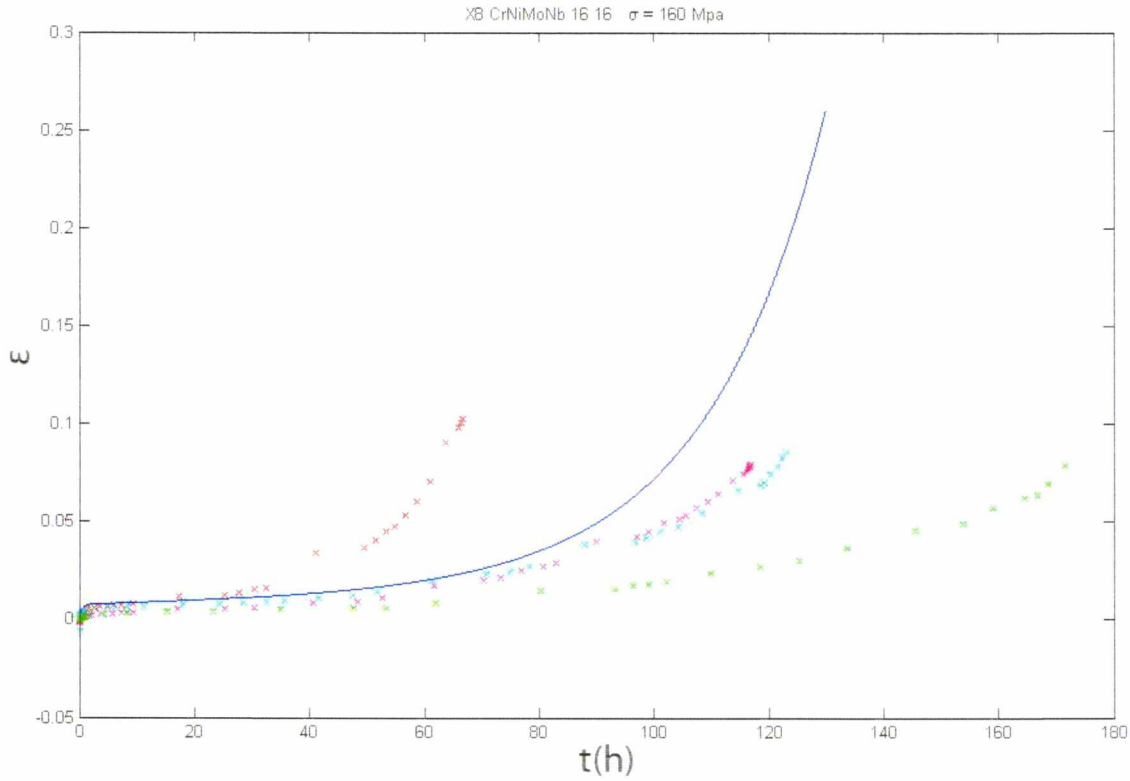
(α)



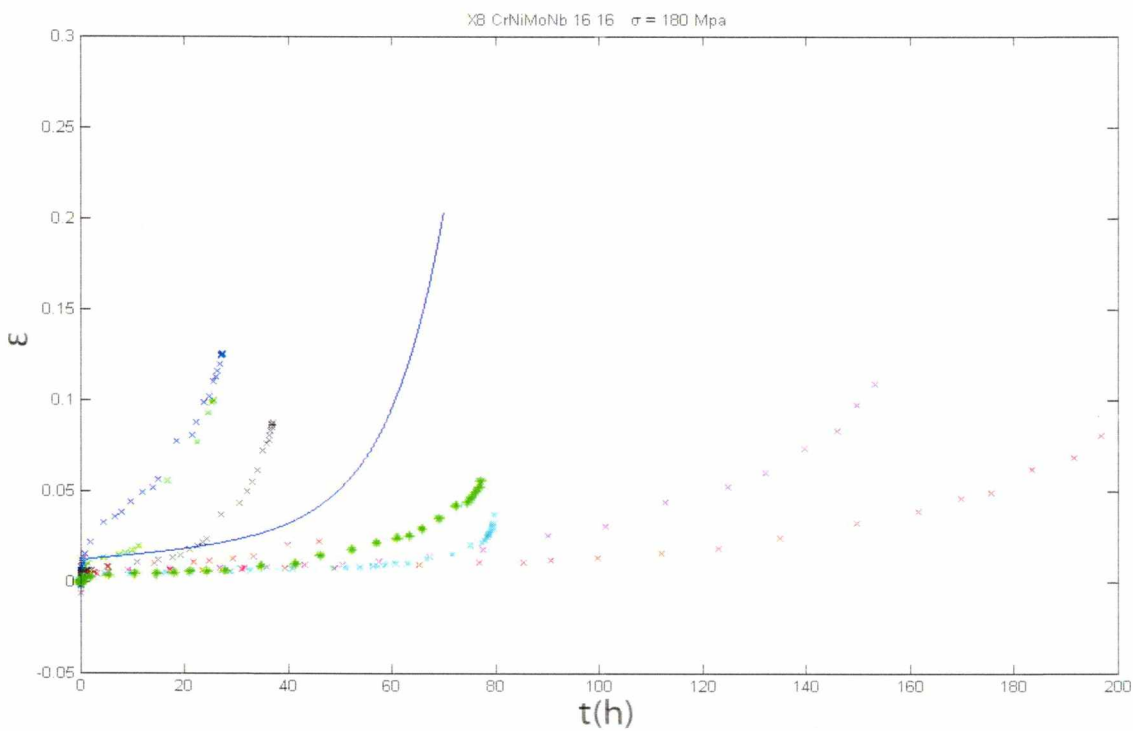
(β)

Σχ. 4.2.43 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  και η μέση καμπύλη του μοντέλου, για τα πειράματα της τάσης 120 Mpa

β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  και η μέση καμπύλη του μοντέλου για τα πειράματα της τάσης 140 Mpa



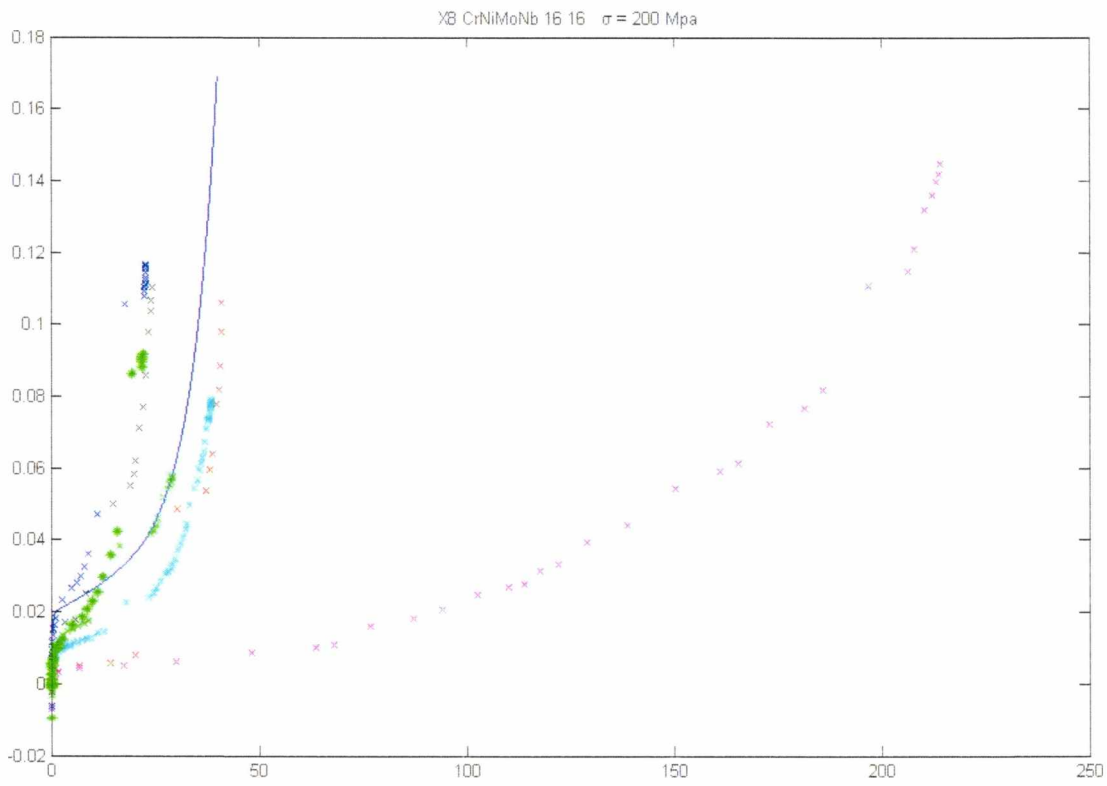
(α)



(β)

Σχ. 4.2.44 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  και η μέση καμπύλη του μοντέλου, για τα πειράματα της τάσης 160 Mpa

β) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  και η μέση καμπύλη του μοντέλου, για τα πειράματα της τάσης 180 Mpa



Σχ. 4.2.45 α) Συγκεντρωτικό διάγραμμα  $\epsilon$ - $t$  και η μέση καμπύλη του μοντέλου, για τα πειράματα της τάσης 200 Mpa

### 4.3 Παρατηρήσεις πάνω στο μοντέλο

Η καταλληλότητα του μοντέλου για την περιγραφή της συμπεριφοράς ερπυσμού ελέγχθηκε σε πειράματα ερπυσμού που παραστάθηκαν σε διαγράμματα παραμόρφωσης – χρόνου και ρυθμού παραμόρφωσης – χρόνου.

Η παρουσία Νιοβίου στη χημική σύνθεση του ωστενικού χάλυβα X 8 CrNiMoNb 16 16 είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία καρβιδίων του Νιοβίου στα όρια των κόκκων του υλικού. Η παρουσία των εν λόγω σκληρών καρβιδίων είχε ως αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης στην περιοχή αυτή. Η μείωση της ταχύτητας οδηγεί σε ελάχιστες τιμές ταχύτητας παραμόρφωσης που δεν έχουν σχέση με το ομοιόμορφο στάδιο του ερπυσμού. Στη συνέχεια οι ταχύτητες παραμόρφωσης αυξάνουν εκ νέου λόγω επανερργοποίησης των καταναγκασμών από τα καρβίδια και της ολίσθησης των κόκκων του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα οι καμπύλες του ρυθμού παραμόρφωσης με τον χρόνο να παρουσιάζουν μια ανωμαλία στην περιοχή του δευτέρου σταδίου, κάτι που φαίνεται έντονα σχεδόν σε όλα τα διαγράμματα ρυθμού παραμόρφωσης – χρόνου, όπου η προσεγγιστική καμπύλη του μοντέλου φαίνεται να υπερεκτιμά την ταχύτητα παραμόρφωσης του ερπυσμού στο δεύτερο στάδιο. [28]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη εκθετική συνάρτηση εξέλιξης του πρώτου σταδίου περιγράφει με σχετικά μεγάλη ακρίβεια τις καμπύλες ερπυσμού όταν ο λόγος του ρυθμού παραμόρφωσης εκκίνησης προς τον ρυθμό παραμόρφωσης στην σταθερή κατάσταση δεν είναι πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Αυτό έχει ως συνέπεια την σημαντική συρρίκνωση του πρώτου σταδίου, που η εξίσωση συμπεριφοράς θα μπορεί να περιγράψει, λόγω της γρήγορης μείωσης του όρου  $e^{-qt}$  και άρα την αύξηση της απόκλισης στην εκτίμηση της συμπεριφοράς. [28]

Παρόλα αυτά, στο σύνολό του η εκτίμηση της συμπεριφοράς ερπυσμού από το μοντέλο του θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

Αναλυτικότερα η προσέγγιση του μοντέλου στην τάση των 100 MPa (σχ. 4.2.1) περιγράφει πολύ καλά την καμπύλη πέρα από το δεύτερο στάδιο που όπως είπαμε είναι λογικό. Η καμπύλη μπαίνει πολύ γρήγορα στο δεύτερο στάδιο λόγω της χαμηλής τάσης. Βέβαια έχουμε μόνο ένα πείραμα σε αυτήν την τάση και ως εκ τούτου δεν είναι ασφαλές να γενικεύσουμε συμπεράσματα για την τάση των 100 MPa. Για τον λόγο αυτό δεν λήφθηκε υπόψη στον προσδιορισμό των μέσων παραμέτρων του μοντέλου.

Στην τάση των 120 MPa (Σχ. 4.2.2- 4.2.10) παρατηρούμε το πρώτο και το δεύτερο στάδιο να είναι πολύ μικρά και να περνάμε γρήγορα στο τρίτο στάδιο το οποίο μονοπωλεί το πείραμα. Επίσης πολλά διαγράμματα (Σχ. 4.2.6 , 4.2.7, 4.2.8) παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα της τάσης αυτής αλλά και με την τυπική καμπύλη ερπυσμού. Αυτές οφείλονται είτε σε σφάλμα μέτρησης της μηχανής είτε σε ελαττωματικά δοκίμια. Παρόλα αυτά η καμπύλη του μοντέλου κατάφερε να προσεγγίσει βέλτιστα τις τιμές των πειραματικών δεδομένων.



Όσο αυξάνεται η τάση, τόσο το πρώτο και δεύτερο στάδιο του ερπυσμού αρχίζουν να καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο διάγραμμα. Έτσι τα διαγράμματα της τάσης των 140 MPa (Σχ. 4.1.11- 4.1.19) έχουν πολύ ομαλή μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο και ως εκ τούτου η προσέγγισή τους είναι ακριβέστερη.

Στην τάση των 160 MPa (Σχ. 4.1.20 – 4.1.24) έχουμε λιγότερα πειράματα στα οποία όμως όλα τα στάδιά τους προσεγγίζονται τέλεια από το μοντέλο, με εξαίρεση το μικρό σφάλμα στο δεύτερο στάδιο για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Σε ακόμα μεγαλύτερες τάσεις, ο ρυθμός παραμόρφωσης στο πρώτο στάδιο είναι πολύ μεγάλος και πλέον το πρώτο και το δεύτερο στάδιο καταλαμβάνουν σχεδόν το μισό διάγραμμα και με το που εισέλθει στο τρίτο στάδιο έρχεται η θραύση με πολύ μεγάλη ταχύτητα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Έτσι στην τάση των 180 MPa (Σχ. 4.1.25 – 4.1.33) οι καμπύλες είναι πολύ ομαλές και το μοντέλο καταφέρνει πολύ ικανοποιητική προσέγγισή τους.

Τέλος στην τάση των 200 MPa (Σχ. 4.1.34 – 4.1.42) ο αρχικός ρυθμός παραμόρφωσης (πρώτο στάδιο) είναι πολύ μεγάλος ενώ το τρίτο στάδιο ενώ μόλις προλαβαίνει να μπει στο τρίτο στάδιο, επέρχεται θραύση μέσα σε λίγες ώρες. Σε σχέση με τις υπόλοιπες τάσεις οι καμπύλες αυτών των πειραμάτων είναι οι πιο κοντινές μεταξύ τους. Εξαίρεση αποτελεί το πείραμα 80392 (Σχ. 4.1.42) στο οποίο το υλικό παραμένει για μεγάλο διάστημα στο δεύτερο στάδιο (περίπου τέσσερις φορές περισσότερο από τα πειράματα της ίδιας τάσης) προτού εισέλθει στο τρίτο στάδιο και την θραύση.

Οι καμπύλες που δημιουργήθηκαν από την προτεινόμενη εξίσωση του μοντέλου (3.10) με τις μέσες σταθερές για κάθε τάση (Σχ. 4.1.43 – 4.1.47) δείχνουν πόσο καλά μπορεί να γίνει γενίκευση του μοντέλου για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του ερπυσμού και σε άλλες τάσεις.

Παρατηρούμε ότι στις μικρές τάσεις που ο το πρώτο και το δεύτερο στάδιο δεν είναι έντονα η καμπύλη δεν επιτυγχάνει να προσεγγίσει όλη την γκάμα των πειραμάτων. Αντίθετα σε μεγαλύτερες τάσεις η προσέγγιση γίνεται πολύ ικανοποιητική.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φαινόμενο του ερπυσμού είναι ένα πολύπλοκο και σύνθετο φαινόμενο που αφορά όλα τα υλικά. Στην προσπάθεια επιλογής του κατάλληλου υλικού για μια κατασκευή θα πρέπει να προβλεφθεί η συμπεριφορά του υλικού σε βάθος χρόνου για να αποφευχθούν απρόβλεπτες συνέπειες. Για τον λόγο αυτό γίνεται επιτακτική η ανάγκη αξιόπιστης προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων, και επιλογή του κατάλληλου μοντέλου που να περιγράφει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την συμπεριφορά του υλικού στον ερπυσμό.

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων για το υλικό X8 CrNiMoNb 16 16 με το παραμετρικό μοντέλο:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_p (1 - e^{-\alpha t}) + \varepsilon_s t + \varepsilon_l/n (e^{nt} - 1)$$

Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έδωσε χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την συμπεριφορά του υλικού στον ερπυσμό. Η συγκεκριμένη εξίσωση προσεγγίζει ικανοποιητικά και τα τρία στάδια του ερπυσμού, ειδικά στις μεγάλες τάσεις, με εξαίρεση τα πολύ αρχικά στάδια της πρώτης φάσης του ερπυσμού. Ο εξαιρετικά απλός προσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου σε συνάρτηση με την ακρίβεια που επιτυγχάνεται στην περιγραφή της συμπεριφοράς ερπυσμού αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του μοντέλου. Η διαπίστωση αυτή το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό, σε αντίθεση με κάποια άλλα μοντέλα τα οποία στην προσπάθεια να προσεγγίσουν το φαινόμενο ικανοποιητικά, περιπλέκουν το πρόβλημα με αποτέλεσμα η επίλυση τους να καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη.

Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί ότι η φυσική σημασία των σταθερών του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα τον ευκολότερο και πιο αξιόπιστο υπολογισμό τους και αποτελεί από μόνη της έναν ακόμη έλεγχο αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι παράμετροι του μοντέλου προκύπτουν από σχέσεις που εκφράζουν τους κυρίαρχους μηχανισμούς ερπυσμού για μια συγκεκριμένη περιοχή τάσεων, είναι δυνατή η επέκταση των προβλέψεων του μοντέλου εκτός των πειραματικά ελεγμένων ορίων, με την προϋπόθεση ότι οι μηχανισμοί που θεωρούνται κυρίαρχοι δεν αλλάζουν.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Harry Kraus, Creep Analysis, John Wiley and sons, New York, 1980
2. Γ.Δ Χρυσουλάκης Δ.Ι. Παντεκής, επιστήμη και τεχνολογία μεταλλικών υλικών, Εκδ παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996
3. Ι Πρασιανάκης, Ι. Μήλιος, Εργαστήρια πειραματικής αντοχής υλικών, Αθήνα, 1987
4. Γ. Παπαδημητρίου, Γεννική Μεταλλογνωσία 1, Αθήνα 1989
5. R.W. Evans and B. Whilshire, Introduction to Creep, The Institute of Materials, London, 1993
6. <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mats340/cpmech.pdf>
7. Y.F.Yin, R.G.Faulkner, Creep Damage and Grain Boundary Precipitation in Power Plant Metals, Material Science and Technology, 21, 2005, σ 1239-1246.
8. D. Venygopalan and J.S. Kirkaldy: Hardenability Concepts with Application to steels, eds D.V. Doane and J.S. Kirkaldy, TMS-AIME, Warrendale, Pennsylvania, USA, 1978, σ 249-267
9. F. Abe: Fourth international Conference on recrystalization and Related phenomenaEds T.Sakai and H.G Suzuki. The Japan Institute of metal, 1999, σ 289-244
- 10.M.Evans: Materials Science and Technology 15, 1999, 647-658
- 11.M. Evans and B Wilshire: Creep of Metals and Alloys. The Institute of metals, London, 1985
- 12.K. Maruyama, H Kushima and T Watanabe, Prediction of Long Term Creep Rupture Life of 2.25Cr-1Mo Steel, ISIJ International, Vol 30, 1990, σ 817-822
- 13.K. Maruyama, C. Harada and H. Oikawa, Trans, Iron Steel Inst, Japan, 1986,σ 212.
- 14.K. Maruyama and H. Oikawa, Trans ASME, J, Pressure Vessels Technology, 1986, σ 142.

- 15.D.J.C. Mackay, Bayesian Non-Linear Modelling with Neural Networks, eds H. Cerjak and H.K.D.H Bhadeshia, The Institute of Materials, London, 1997, σ 359-389
- 16.D.J.C. Mackay, Neural Computation 4, 1992, σ 415-447
17. H.K.D.H Bhadeshia and D.J.C. Mackay and L.E. Svensson, Bayesian Neural Network Modelling of Weld Toughness, Material Science and Technology, 1995
- 18.T.Cool, H.K.D.H Bhadeshia and D.J.C. Mackay, Modelling The Mechanical Properties in the Haz of Power Plant Steels 1: Bayesian Neural Network Analysis of Proof Strength, eds H. Cerjak and H.K. D.H Bhadeshia, The Institute of Materials, London, 1997, σ 966-979
- 19.H.K.D.H Bhadeshia, ISIJ International 39, 1999, σ 966-979
- 20.D.Cole, C.Martin Moran, A.G sheard, H.K.D.H Bhadeshia and D.J.C. MacKay, Modelling Creep Rupture Strength Of Ferritic Steel Welds, Science and Technlogy of Welding and Joining, Vol. 5 ,2000, No.2 σ 81-89.
- 21.H.K.D.H Bhadeshia and T.Sourmail, design of creep-resistant steels: success and failure of models, 44, 2003, 221-238
- 22.R.G. Thiessen: Mathematical modeling of Weld Phenomena 7, Austria, 2003
- 23.R.Sedlacek, W.Blum, Comput. Mater. Sci.25, 2002 σ 290
- 24.H.Mugraby, Acta Metal,. 31, 1983
- 25.N. Βασίλας, ανάπτυξη μηχανικού μοντέλου δομής μιας παραμέτρου για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ερπυσμού μεταλλικών υλικών, 1994, πανεπιστήμιο πατρών, σελ119



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000108495