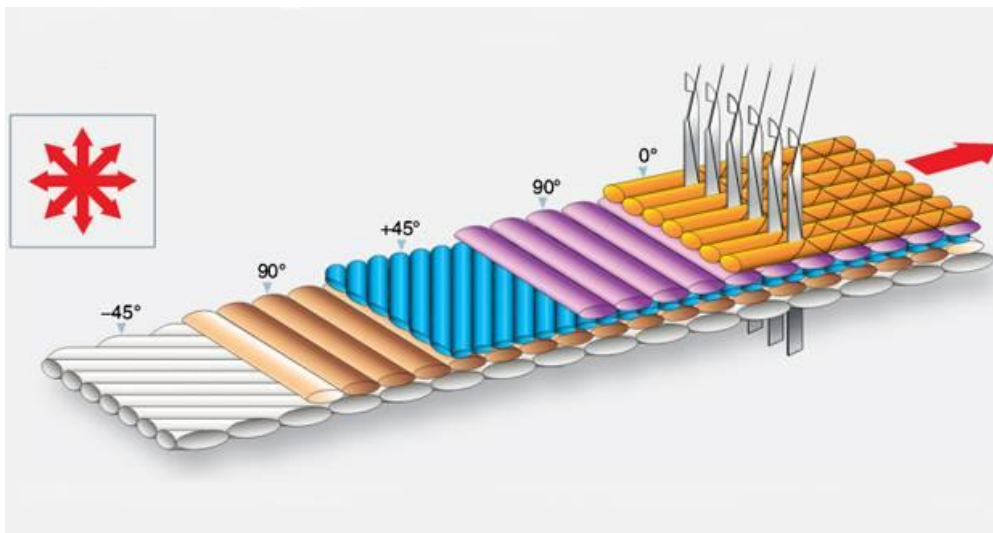


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΑΚΑΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΖΑΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Καθ. Δρ.-Μηχ. Ν. ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ

ΠΑΤΡΑ

2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επιμόρφωση του αναγνώστη σχετικά με την μελέτη της κόπωσης στα σύνθετα υλικά και στις κατασκευές σε βηματικές συνθήκες καταπόνησης (μεταβλητό πλάτος). Η μελέτη αυτή, γίνεται με την αξιοποίηση επιστημονικών δεδομένων και ανάλυσης αυτών, μέσω συγκεκριμένων μοντέλων που προσεγγίζουν καλύτερα το φαινόμενο αυτό.

Γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο φαινόμενο της κόπωσης, δίνοντας τον ορισμό της, τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση και την προσέγγιση της και των λόγων που ένα υλικό καταλήγει στο σημείο να αστοχήσει λόγω της κόπωσης.

Αναφέρεται πιο αναλυτικά, ποιοι ήταν οι πρώτοι που εντόπισαν και ασχολήθηκαν με το πρόβλημα αυτό της κόπωσης, προκειμένου να βρουν μία λύση, τις συνθήκες που οδηγούν στην εμφάνιση της κόπωσης στα μεταλλικά υλικά και αναφέρονται οι λόγοι που καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του φαινομένου αυτού. Επιπλέον, αναλύονται οι δυναμικές καταπονήσεις, οι μορφές με τις οποίες εκδηλώνονται, και περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους διεξάγεται μια δοκιμή κόπωσης και πως αυτοί οδηγούν στην δημιουργία μιας καμπύλης σ - N . Γίνεται και χρήση παραδείγματος, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει και να πάρει μια πρώτη ιδέα για τις βηματικές συνθήκες καταπόνησης, καθώς και για το πως μια μικρή αστοχία εντός του υλικού οδηγεί τελικά στο φαινόμενο της κόπωσης.

Περιγράφονται τα σύνθετα υλικά, δίνεται ο ορισμός τους, αναλύονται οι μέθοδοι που ακολουθούνται, μέσω των οποίων ένα υλικό μπορεί να ονομαστεί σύνθετο, καθώς και των τρόπων που δοκιμάζονται και ελέγχονται τα σύνθετα υλικά. Στην συνέχεια, προσδιορίζεται ακόμα καλύτερα και πιο ουσιαστικά το φαινόμενο της κόπωσης στα σύνθετα υλικά, επεξηγούνται οι λόγοι που αυτά αστοχούν, αναλύεται και παρουσιάζεται η καμπύλη Wöhler μέσω της οποίας προκύπτουν σπουδαία συμπεράσματα για την διάρκεια ζωής σε κόπωση των σύνθετων υλικών αλλά και των λόγων που οξύνουν αυτούς τους μηχανισμούς αστοχίας.

Επιπλέον, επεξηγούνται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αλλά και οι λόγοι που οδήγησαν στο να γίνει η επιλογή αυτή, των συγκεκριμένων μοντέλων για την ανάλυσή του φαινομένου της κόπωσης και της διάρκειας ζωής που απομένει σε κάποιο σύνθετο υλικό, και ποιο μοντέλο φανερώνει καλύτερα την συμπεριφορά των συνθέτων υλικών σε κόπωση (δυναμική καταπόνηση) όταν αυτά δεχθούν δύο διαφορετικές φορτίσεις. Με αυτόν τον τρόπο, γνωστοποιείται ποιο μοντέλο εκφράζει καλύτερα την εναπομένουσα ζωή του υλικού

όταν καταπονηθεί σε μεταβλητό πλάτος στην κόπωση. Αυτό παρουσιάζεται στα διαγράμματα της εργασίας αυτής με την εφαρμογή και σύγκριση διάφορων μοντέλων, όπως παραδείγματος χάρη τα μοντέλα Palmgren-Miner και Hashin and Rotem, κ.α.

Γενικά, για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής σε κόπωση απαιτείται να είναι γνωστό, το αν η καταπόνηση γίνεται σε σταθερό πλάτος ή αν το πλάτος των τάσεων είναι μεταβλητό. Για σταθερό πλάτος τάσης, που σημαίνει, ότι η μέση τάση είναι μηδέν, αλλά και για πλάτος με μεταβλητές συνθήκες, που σημαίνει ότι η μηδενική μέση τάση δεν είναι μηδέν (ούτε είναι σταθερή) αλλά ούτε και σταθερό εύρος καταπόνησης, υπολογίζεται η διάρκεια ζωής μέσω της καμπύλης Wöhler. Οι φορτίσεις της κόπωσης σε ένα διάγραμμα χωρίζονται σε διαφορετικά στάδια καταπόνησης, με κάποιες μεθόδους, όπου στα στάδια αυτά η μέση τάση γίνεται σταθερή ($\sigma_m=0$) όπως και το εύρος καταπόνησης ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_n$). Έτσι γνωστοποιείται η βλάβη που προστίθεται στο κάθε στάδιο του υλικού με αποτέλεσμα να γίνεται γνωστή και η διάρκεια ζωής του υλικού.

Ο Miner είχε διατυπώσει έναν κανόνα, ο οποίος ήταν γραμμικός και αναφέρει ότι η αστοχία του υλικού θα προκύψει όταν προσθέσουμε τις βλάβες που προκύπτουν στο κάθε στάδιο καταπόνησης και το αποτέλεσμα θα είναι ίσο με ένα. Αυτός ο κανόνας, όμως, παρουσιάζει μειονεκτήματα λόγω απουσίας διάφορων παραμέτρων, έτσι οδηγεί σε απώλειες οι οποίες πολλές φορές είναι σημαντικές γιατί δεν προσεγγίζονται τα σημεία αστοχίας του υλικού και επομένως, αυτός ο κανόνας δεν είναι ιδανικός πολλές φορές για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής των υλικών σε κόπωση. Για αυτόν τον λόγο, στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν άλλα μοντέλα, που είναι μη γραμμικά και όχι γραμμικά όπως το μοντέλο Palmgren-Miner, για να μπορέσει να υπολογιστεί η εναπομένουσα διάρκεια ζωής των υλικών και συγκεκριμένα των σύνθετων υλικών, όταν αυτά καταπονούνται σε μεταβλητό πλάτος στην κόπωση.

Τα σύνθετα υλικά, στα οποία επικεντρώθηκε η εργασία και φανέρωσε πιο μοντέλο μπορεί καλύτερα να εκφράσει καλύτερα την διάρκεια ζωής τους, είναι τα σύνθετα ινών γυαλιού/ εποξειδικής ρητίνης (glass/epoxy), σύνθετα ινών άνθρακα/ εποξειδικής ρητίνης (carbon/epoxy) και σύνθετα ινών γραφίτη/ εποξειδικής ρητίνης (graphite/epoxy), υλικά που ξεχωρίζουν λόγω της “υψηλής τεχνολογίας τους”, τα οποία χρησιμοποιούνται στις μέρες μας συνεχώς λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών αντοχής και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους σε σχέση με τα απλά υλικά.

Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα με τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή, που δείχνουν την προσέγγιση του κάθε μοντέλου. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται ξεχωριστά, ανάλογα με το υλικό που εξετάζετε και στο τέλος κάθε υλικού παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα με τα οποία φαίνεται ποιος ή ποιοι κανόνες σε μερικές περιπτώσεις προσεγγίζουν καλύτερα την διάρκεια ζωής σε κόπωση. Στην συνέχεια ακολουθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν, ώστε να βρεθεί αυτό το μοντέλο με την βοήθεια του οποίου, θα γίνει καλύτερη και πιο σωστή η προσέγγιση, η μελέτη και η ανάλυση για την διάρκεια ζωής σε κόπωση των συνθέτων υλικών.

Η πτυχιακή εργασία έγινε στο εργαστήριο Μηχανικής Υλικών Μηχανών (ΜΥΜ) υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικολάου Μπατσούλα, τον οποίο ευχαριστούμε πολύ για την μεγάλη βοήθεια που μας παρείχε και τον άφθονο χρόνο που μας διέθεσε σε εβδομαδιαία βάση, ώστε να γίνει εφικτή η εκπόνηση αυτής της εργασίας στην μορφή που την παρουσιάζουμε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ	1
2. ΚΟΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	7
2.1 Ιστορία της κόπωσης.....	7
2.2 Ορισμός της κόπωσης.....	11
2.3 Παράγοντες εμφάνισης της κόπωσης.....	12
2.4 Μεταβλητές που επηρεάζουν την κόπωση.....	12
2.4.1 Το επίπεδο της μέσης τάσης	13
2.4.2 Επιφανειακά φαινόμενα	13
2.4.3 Παράγοντες Σχεδίασης.....	13
2.4.4 Επιφανειακές Κατεργασίες.....	14
2.4.5 Περιβαλλοντικές επιδράσεις.....	15
2.5 Κατηγορίες του φαινομένου της κόπωσης.....	16
2.6 Συμπεριφορά υλικών σε καταπονήσεις.....	17
2.7 Περιπτώσεις αστοχιών λόγω κόπωσης.....	18
2.8 Κυκλικές τάσεις.....	20
2.8.1 Η αναστρεφόμενη κυκλική τάση.....	20
2.8.2 Η επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση	21
2.8.3 Ο τυχαίος κύκλος τάσης.....	22
2.8.4 Παράμετροι των κυμαινόμενων κύκλων τάσης	22
2.9 Η καμπύλη σ-N.....	24
2.9.1 Περιοχή κόπωσης χαμηλού αριθμού κύκλων.....	28
2.9.2 Περιοχή κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων	28
2.10 Κόπωση σε βηματικές συνθήκες καταπόνησης (μεταβλητό πλάτος)	29
2.11 Έναρξη και διάδοση των ρωγμών	34
3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	40
3.1 Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	42
3.2 Ίνες στα σύνθετα υλικά	44
3.2.1 Ίνες άνθρακα	45
3.2.2 Ίνες αραμίδιο (Kevlar).....	46
3.2.3 Ίνες γυαλιού	46
3.3 Προσανατολισμός ινών	47
3.4 Βλάβες στα σύνθετα υλικά.....	49
3.5 Καταστροφικές μέθοδοι συνθέτων υλικών	49
3.5.1 Τεχνική διάλυση της μήτρας.....	49
3.5.2 DSC-DMA	50
3.5.3 Τεχνική διαχωρισμού.....	51
3.5.4 TGA	51
3.5.5 Μηχανικές δοκιμές.....	52
4. ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	53
4.1 Αστοχία στα σύνθετα υλικά	54
4.2 Αποκόλληση στρώσεων	55
4.2.1 Ρηγμάτωση της μήτρας.....	57
4.2.2 Θραύση ινών και μήτρας.....	57

4.3 Μείωση αντοχής και δυσκαμψίας των συνθέτων υλικών	58
4.4 Ανάλυση της κόπωσης στα σύνθετα υλικά	58
4.4.1 Διακύμανση τάσεων και μέση τάση.....	66
4.4.2 Επίδραση οπών	66
4.4.3 Επίδραση συχνότητας.....	67
4.4.4 Περιβαλλοντικές επιδράσεις.....	67
4.4.5 Συγκέντρωση τάσεων	69
5. ΚΟΠΩΣΗ ΣΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ.....	70
5.1 Γραμμικά μοντέλα – Το μοντέλο Palmgren και Miner	71
5.2 Μη γραμμικά μοντέλα.....	73
5.2.1 Το μοντέλο Hashin και Rotem	73
5.2.2 Το μοντέλο Manson και Halford	74
5.2.3 Το μοντέλο Subramanian	74
5.2.4 Το μοντέλο New Model	74
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	75
6.1 Περιγραφή του πειράματος	75
6.2 Πειραματικές μετρήσεις	76
6.3 Καμπύλες Wöhler για τα υλικά.....	86
6.3.1 Η καμπύλη Wöhler για glass/epoxy (GRP)	86
6.3.2 Η καμπύλη Wöhler για Carbon/Epoxy T300/914.....	88
6.3.3 Η καμπύλη Wöhler για 5208/T300 Graphite/Epoxy [$\pm 45^\circ$] _{2s}	90
6.3.4 Η καμπύλη Wöhler για Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/ ± 45] _{2s}	91
6.3.5 Η καμπύλη Wöhler για graphite/epoxy [(Q-1115)[$45^\circ/-452^\circ/45^\circ$]	92
6.3.6 Οι καμπύλες Wohler για AS-4PEEK ([0/90] _{4s} , [0/45/90/-45] _{2s} , [± 45] _{4s})	93
6.3.7 Οι καμπύλες Wohler για [02/902] _S HTA/6376C Carbon/Epoxy.....	96
7. ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΣΕ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ	97
7.1 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό glass/epoxy (GRP)	98
7.1.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό glass/epoxy (GRP).....	98
7.1.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό glass/epoxy (GRP).....	102
7.1.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό glass/epoxy (GRP).....	106
7.1.4 Κανόνας New Model για το υλικό glass/epoxy (GRP).....	110
7.2 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914).....	115
7.2.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914).....	115
7.2.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914).....	117
7.2.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914).....	119
7.2.4 Κανόνας New Model για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914).....	121
7.3 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$] _{2s}	124
7.3.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$] _{2s}	124
7.3.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$] _{2s}	126
7.3.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$] _{2s}	128
7.3.4 Κανόνας New Model για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$] _{2s}	130
.....	132
7.4 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] _{2s} ..	133
7.4.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] _{2s}	133
7.4.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/ $\pm 45^\circ$] _{2s}	135

7.4.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	137
7.4.4 Κανόνας New Model για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^{\circ}/90^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	139
7.5 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^{\circ}/-45_2^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	142
7.5.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^{\circ}/-45_2^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	142
7.5.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^{\circ}/-45_2^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	144
7.5.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^{\circ}/-45_2^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	146
7.5.4 Κανόνας New Model για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^{\circ}/-45_2^{\circ}/\pm 45^{\circ}]_{2s}$	148
7.6 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό AS-4PEEK $([0/90]_4s, [0/45/90/-45]_2s, [\pm 45]_4s)$	151
7.6.1 Κανόνας Hashin και Rotem AS-4PEEK $([0/90]_4s, [0/45/90/-45]_2s, [\pm 45]_4s)$	151
7.6.2 Κανόνας Manson και Halford AS-4PEEK $([0/90]_4s, [0/45/90/-45]_2s, [\pm 45]_4s)$	153
7.6.3 Κανόνας Subramanian AS-4PEEK $([0/90]_4s, [0/45/90/-45]_2s, [\pm 45]_4s)$	155
7.6.4 Κανόνας New Model AS-4PEEK $([0/90]_4s, [0/45/90/-45]_2s, [\pm 45]_4s)$	157
7.7 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό $[0_2/90_2]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy	160
7.7.1 Κανόνας Hashin και Rotem $[0_2/90_2]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy	160
7.7.2 Κανόνας Manson και Halford $[0_2/90_2]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy	162
7.7.3 Κανόνας Subramanian $[0_2/90_2]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy	164
7.7.4 Κανόνας New Model $[0_2/90_2]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy	166
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	169
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	171

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ

Η κόπωση στις μέρες μας, θεωρείται ότι είναι μια διαδικασία, η οποία προκαλεί πρόωρη αστοχία ή βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Είναι μια περίπλοκη μεταλλουργική διαδικασία, που είναι δύσκολο να περιγραφεί με ακρίβεια και να μοντελοποιηθεί σε μικροσκοπικό επίπεδο. Παρόλο αυτές τις πολυπλοκότητες, η εκτίμηση της ζημιάς λόγω κόπωσης για τον σχεδιασμό των δομικών στοιχείων πρέπει να γίνει.

Κατόπιν, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ανάλυσης και προσέγγισης της κόπωσης. Πολύ γενικά και περιληπτικά, καθώς γίνεται πιο λεπτομερής ανάλυση της κόπωσης σε επόμενο κεφάλαιο, θα αναφέρουμε τρεις βασικές μεθόδους. Αυτές είναι η προσέγγιση της τάσης-διάρκεια ζωής, η προσέγγιση της παραμόρφωσης-διάρκεια ζωής και η προσέγγιση της μηχανικής θραύσης. Αυτές οι μέθοδοι έχουν την δική τους περιοχή εφαρμογής με κάποιο βαθμό αλληλοεπικάλυψης μεταξύ τους. Η κατανόηση κάθε μίας από αυτές τις μεθόδους, παρέχει μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελεστεί μία ανάλυση κόπωσης. Ωστόσο, είναι οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την κατανόηση και των τριών αυτών μεθόδων, που επιτρέπουν στον μηχανικό να διαλέξει την μέθοδο ή τις μεθόδους που είναι οι πλέον κατάλληλες για κάποιο ορισμένο πρόβλημα.

Ιστορικά, δύο κύριες σκέψεις έχουν προωθήσει την ανάπτυξη των μεθόδων ανάλυσης της κόπωσης. Η πρώτη σκέψη ήταν η ανάγκη παροχής στους σχεδιαστές και στους μηχανικούς μεθόδων, που είναι πρακτικές, που να εφαρμόζονται εύκολα και να είναι οικονομικά αποδοτικές. Η δεύτερη σκέψη ήταν η ανάγκη να συνδυαστούν αυτές οι αναλυτικές προσεγγίσεις με τις φυσικές παρατηρήσεις. Μία από τις πιο σημαντικές φυσικές παρατηρήσεις, είναι ότι η διαδικασία της κόπωσης μπορεί γενικά να σπάσει σε δύο ξεχωριστά στάδια, την διάρκεια της έναρξης και την διάρκεια διάδοσης της ρωγμής.

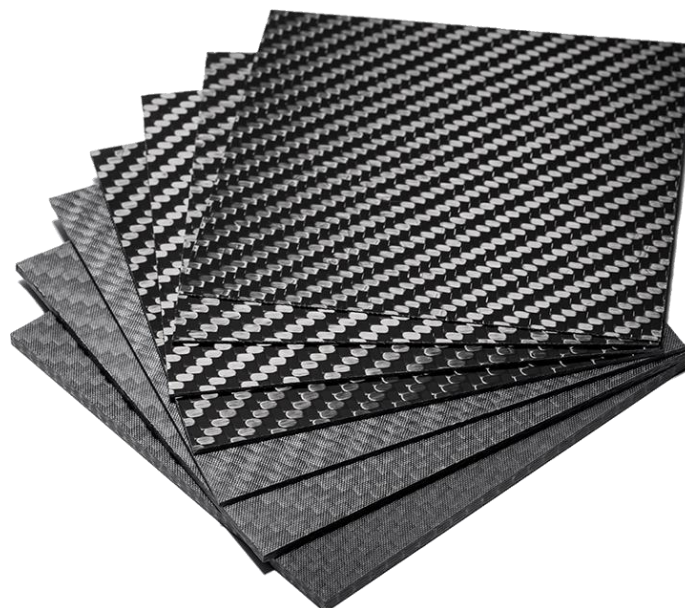
Η διάρκεια της έναρξης περιλαμβάνει την ανάπτυξη και την πρόωμη ανάπτυξη μιας μικρής ρωγμής. Η διάρκεια της διάδοσης είναι το κομμάτι της συνολικής ζωής που ξοδεύεται αναπτύσσοντας μια ρωγμή σε αστοχία. Ωστόσο, είναι συχνά πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να γίνει ο καθορισμός της μετάβασης από την έναρξη στην διάδοση των ρωγμών. Αυτή η διαφορά εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους των εξαρτημάτων, του υλικού, και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για να εντοπιστεί η ρωγμή. Αυτές οι μεταβλητές είναι μόνο μερικές από την πληθώρα των μεταβλητών που υπάρχουν στην πραγματικότητα. Η έναρξη της ρωγμής θεωρείται ότι είναι το τμήμα της ζωής που δαπανάται

αναπτύσσοντας μια μηχανικού μεγέθους ρωγμή. Συχνά, μια μηχανικού μεγέθους ρωγμή για μικρότερα εξαρτήματα, θεωρείται ότι είναι της τάξης των 2.54mm. Η διάρκεια της διάδοσης θεωρείται ότι είναι το υπόλοιπο της διάρκειας ζωής σε κόπωση.

Καθώς περνούσαν τα χρόνια και η τεχνολογία εξελισσόταν, ξεκίνησαν σιγά σιγά όλοι να μελετάνε την διάρκεια ζωής στα σύνθετα υλικά. Αυτό έγινε γιατί τα σύνθετα υλικά, παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά στην αντοχή και στην διάρκεια ζωής στην κόπωση από τα μεταλλικά. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά είναι η τελευταία λέξη της τεχνολογίας.

Ο βασικότερος λόγος, για τον οποίο αστοχεί ένα υλικό ή κάποια κατασκευή που δέχεται επαναλαμβανόμενες φορτίσεις είναι η κόπωση (fatigue). Το φαινόμενο της κόπωσης έχει μια μέγιστη τάση η οποία όμως είναι μικρότερη της στατικής αντοχής ενός υλικού σε θραύση ή ακόμα μπορεί να είναι μικρότερη από την τάση στο σημείο διαρροής του υλικού, το οποίο σημαίνει ότι το υλικό αρχίζει να μειώνει την στατική του αντοχή λόγω κόπωσης, δηλαδή όταν δέχεται επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Από αυτό προκύπτει, ότι αργά η γρήγορα το υλικό θα οδηγηθεί σε αστοχία. Αυτό που χαρακτηρίζει, λοιπόν, την κόπωση (fatigue) είναι ότι, χρειάζεται κάποια χρονική περίοδος όπου θα χρησιμοποιείται το υλικό, άρα θα δέχεται δυναμικές καταπονήσεις, για να παρουσιαστεί. Η αστοχία λόγω κόπωσης στις μέρες μας, εξαιτίας της εξέλιξης της τεχνολογίας, όπου η χρήση νέων υλικών σε διάφορες κατασκευές (π.χ. αυτοκίνητα, κινητήρες κλπ.) συναντάται συχνά, και έχουμε κατά κύριο λόγο δυναμικές καταπονήσεις, το φαινόμενο της κόπωσης είναι ο κύριος λόγος αυτής της αστοχίας.

Σχ. 1.1: Ίνες άνθρακα/εποξειδική ρητίνη (Πλέξεις άνθρακα)

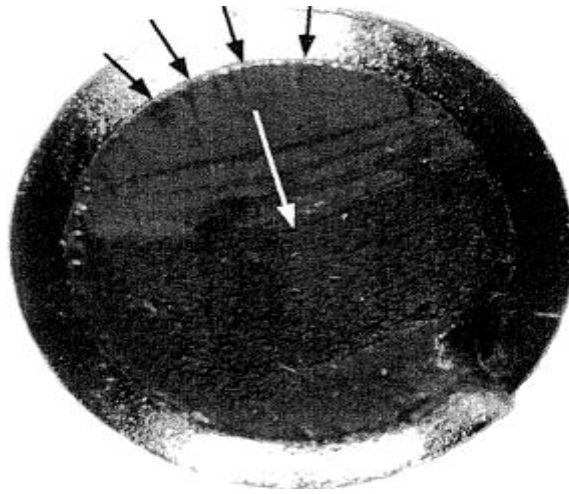


Έχουν γίνει κατά καιρούς, πάρα πολλές έρευνες για να εξετάσουν και να κατανοήσουν το φαινόμενο της κόπωσης, και γενικά την συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση. Κάποιες από τις έρευνες χρησιμοποιούνται και αναλύονται στην παρούσα εργασία, αλλά αυτό που προκύπτει λόγω των διαγραμμάτων των υλικών και των δεδομένων τους όπου έχουν μεγάλη διασπορά, η διάρκεια ζωής των υλικών και των κατασκευών σε κόπωση μπορεί να οριστεί σε στατιστική ανάλυση.

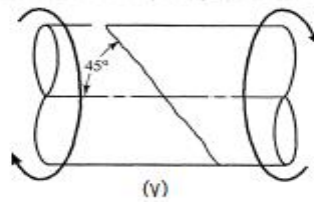
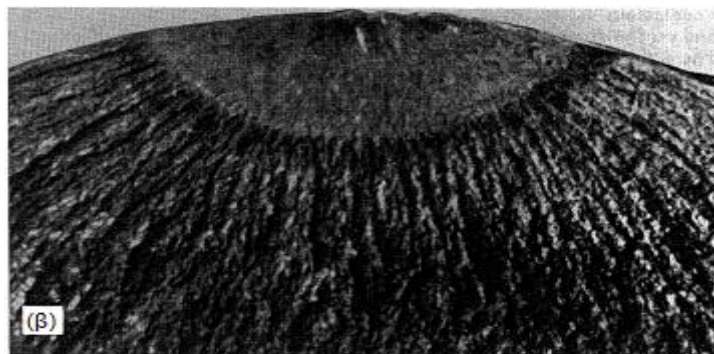
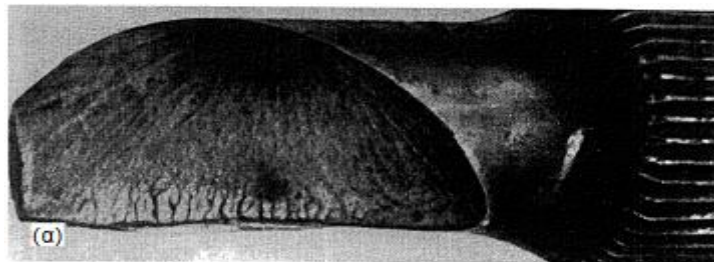
Συνήθως, μία αστοχία εξαιτίας της κόπωσης αναγνωρίζεται μετά την εκδήλωση της λόγω κάποιων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει η επιφάνεια θραύσης. Κάποιες επιφάνειες θραύσης λόγω κόπωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2, Σχήμα 1.3 και Σχήμα 1.4. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θραύσης παρουσιάζει λεία εμφάνιση, η οποία υπάρχει εξαιτίας της τριβής των δύο επιφανειών που δημιουργούνται με την εμφάνιση ρωγμής, η οποία εμφανίζεται λόγω κόπωσης στο υλικό. Επίσης, υπάρχει και ένα άλλο τμήμα με ανώμαλη επιφάνεια που ουσιαστικά αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης και προκύπτει, από γρήγορη ανάπτυξη της ρωγμής με όλκιμο τρόπο στο εσωτερικό του υλικού, αφού η διατομή του υλικού έχει μειωθεί σημαντικά και δεν είναι δυνατό πλέον να υποστεί τα φορτία που του επιβάλλονταν.



Σχ. 1.2: Επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης σε σπείρωμα [1]



Σχ. 1.3: Επιφάνεια θραύσης σε μπουλόνι [1]



Σχ. 1.4: Επιφάνεια θραύσης σε περιστρεφόμενο άξονα. (α) Συνολική επιφάνεια θραύσης. (β) Κωνικό πλάνο. (γ) Εξιδανικευμένη μορφή [1]

Ακόμη, μια εμφάνιση επιφάνειας που δείχνει ότι το υλικό αστόχησε από κόπωση είναι οι γραμμώσεις που παρουσιάζει μετά την αστοχία. Από τις γραμμώσεις αυτές, μπορεί να φανεί από που ξεκίνησε η ρωγμή στο υλικό και από την απόσταση που έχουν μεταξύ τους μπορεί να προσεγγιστεί η ταχύτητα όπου διαδόθηκαν οι ρωγμές στο ρήγμα. Τέτοιες γραμμές απεικονίζονται στο Σχήμα 1.5.



Σχ. 1.5 : Επιφάνεια θραύσης με γραμμώσεις κόπωσης [1]

Λόγοι τώρα που χρειάζονται για να αστοχήσει ένα υλικό ή κατασκευή από κόπωση είναι:

1. *Υψηλή εφελκυστική τάση*
2. *Μεγάλος κύκλος φορτίσεων*
3. *Μεγάλη διακύμανση της τάσης όπου εφαρμόζεται στο υλικό.*

Υπάρχουν βέβαια και άλλοι λόγοι, οι οποίοι παίζουν ρόλο στην αστοχία από κόπωση σε ένα υλικό όπως είναι το περιβάλλον(διαβρωτικό), η δομή του υλικού, η θερμοκρασία καθώς και τυχόν παραμένουσες τάσεις στο εσωτερικό του υλικού κλπ. Γι' αυτό, δεν μπορεί εύκολα να εξηγηθεί απόλυτα η κόπωση στα υλικά ακόμα και στα σύνθετα υλικά ή και στις κατασκευές θεωρητικά, αλλά κυρίως αναλύεται από πειράματα που γίνονται και από τα συμπεράσματα που προκύπτουν (πειραματικά και εμπειρικά).

2. ΚΟΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Ιστορία της κόπωσης

Η κόπωση των μετάλλων έχει γίνει αντικείμενο μελέτης και ερευνών από τους επιστήμονες για πάνω από 150 χρόνια. Ο August Wohler, μπορεί να μην είναι από τους πρώτους που ασχολήθηκαν και μελέτησαν το φαινόμενο της κόπωσης, είναι όμως από τους πιο διάσημους ερευνητές πρόωρης κόπωσης.

Κατά την διάρκεια της περιόδου 1850 έως 1875, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων που είχαν ως σκοπό να καθορίσουν μια ασφαλή εναλλασσόμενη τάση, κάτω από την οποία δεν θα λαμβάνει χώρα η αστοχία του υλικού. Άξονες πλήρους κλίμακας, καθώς και μικρότερα εργαστηριακά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για να καθορίσουν την έννοια του ορίου κόπωσης για τον σχεδιασμό. Έχουν διεξαχθεί σχεδόν εκατό χρόνια έρευνας για την εκπόνηση πειραματικών αποτελεσμάτων των ποικίλων μεταβλητών, που επηρεάζουν την διάρκεια ζωής των υλικών λόγω μακρόχρονης κόπωσης.

Ο Bauschinger ανέπτυξε έναν επιμηκυνσιομετρικό καθρέφτη με την ευαισθησία να μετράει μία μικροκαταπόνηση και μελέτησε για πολλά χρόνια την σχέση μεταξύ πλαστικών παραμορφώσεων και επιτρεπόμενων τάσεων στην κόπωση. Πίστευε στην ύπαρξη ενός φυσικού ορίου διαρροής, που το μέτρησε μέσω τεστ κυκλικών φορτίσεων, και που κάτω από αυτό το όριο η κόπωση παύει να υφίσταται. Ένα μη καταπονημένο υλικό παρουσίασε ένα πρωταρχικό όριο ελαστικότητας, το οποίο δεν ήταν ίσο με το φυσικό όριο ελαστικότητας. Αυτό το φαινόμενο είναι σήμερα πλέον αναγνωρισμένο, ως η διαφορά μεταξύ του μονοτονικού και του κυκλικού ορίου θραύσης του υλικού. Το 1903 ο Humphrey και ο Ewing, υποκινούμενοι από τις εργασίες του Bauschinger και του August Wohler, δημοσίευσαν έναν κλασσικό άρθρο το οποίο είχε τον τίτλο “Η θραύση των Μετάλλων κάτω από επαναλαμβανόμενες Μεταβολές της Τάσης.” Επίπεδα δοκίμια κόπωσης φτιαγμένα από υψηλής ποιότητας Σουηδικό χάλυβα δοκιμάστηκε στην κατάσταση ανόπτησης. Χρησιμοποιήθηκε οπτική μικροσκοπία για να εξετασθεί η ίδια περιοχή του δείγματος, κάτω από διάφορα στάδια της διάρκειας ζωής του μέχρι τελικά να υποστεί κόπωση.

Στην συνέχεια, ο Humphrey και ο Ewing δήλωσαν ότι: “Η πορεία της βλάβης ήταν ως εξής: Η πρώτη εξέταση, μετά από μερικές εναλλασσόμενες καταπονήσεις, έδειξε γραμμές

ολίσθησης σε μερικούς από τους κρυστάλλους. Αυτές οι γραμμές ολίσθησης είχαν παρόμοια εμφάνιση με εκείνες που παρατηρούνται όταν εφαρμόζεται μία απλή εφελκυστική τάση που υπερβαίνει το όριο ελαστικότητας. Μετά από αρκετές εναλλαγές, αυτές άλλαξαν σε σχετικά ευρείες ζώνες με αρκετά θολά καθορισμένες άκρες. Καθώς, ο αριθμός των εναλλαγών αυξήθηκε, αυτή η διαδικασία της διεύρυνσης συνεχίστηκε, και μερικά από τα τμήματα της επιφάνειας σχεδόν καλύφθηκαν με μαύρα σημάδια. Όταν έφτασε αυτό το στάδιο, ανακαλύφθηκε ότι μερικοί από τους κρυστάλλους είχαν ραγίσει. Οι ρωγμές εμφανίστηκαν κατά μήκος διευρυσμένων γραμμών ολίσθησης.” Σε μερικές περιπτώσεις, αυτές παρατηρήθηκαν αρχικά σε μονοκρύσταλλο, αλλά σύντομα ενώθηκαν από κρύσταλλο σε κρύσταλλο, μέχρι τελικά να δημιουργηθεί μία μεγάλη συνεχής ρωγμή, η οποία διασχίζει την επιφάνεια του δοκιμίου.

Επίσης, αυτοί παρατήρησαν ότι μόλις η αρχική ρωγμή ξεκινήσει να σχηματίζεται σε ένα συγκεκριμένο σύνολο κρυστάλλων, η επίδραση των περαιτέρω εναλλαγών τάσεων περιορίζεται κυρίως στην γειτονιά της ρωγμής. Με αυτόν τον τρόπο, στην αλλαγή του αιώνα, η πέρα-δώθε ολίσθηση είχε καθιερωθεί ως η αίτια που προκαλεί την κόπωση των υλικών. Έρευνες που έγιναν αργότερα, και στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικά μικροσκόπια, ακτίνες X και διάφορα άλλα ισχυρά εργαλεία, παρείχαν περισσότερη πληθώρα αποδείξεων ότι η βασική αιτία του σχηματισμού των πυρήνων των ρωγμών κόπωσης είναι το αποτέλεσμα των εναλλασσόμενων διατμητικών τάσεων και καταπονήσεων.

Το 1923, ο Jenkin χρησιμοποίησε αυτό που πρέπει να είναι το πρώτο μοντέλο ελατηρίου-ολίσθησης, για να μελετήσει και να προσομοιώσει την συμπεριφοράς των καταπονήσεων που προκαλούν οι τάσεις στα μέταλλα. Χρησιμοποιώντας μερικά όμοια κομμάτια, ο Jenkin ήταν ικανός να προσομοιώσει πολλούς από τους σύνθετους βρόγχους υστέρησης. Οι βρόγχοι αυτοί, είχαν προηγουμένως αναφερθεί στην βιβλιογραφία από τους Smith και Wedgwood. Η σπουδαιότητα της κυκλικής παραμόρφωσης καθιερώθηκε εμφανώς το 1923 αλλά αγνοήθηκε σε μεγάλο βαθμό μέχρι σαράντα χρόνια αργότερα.

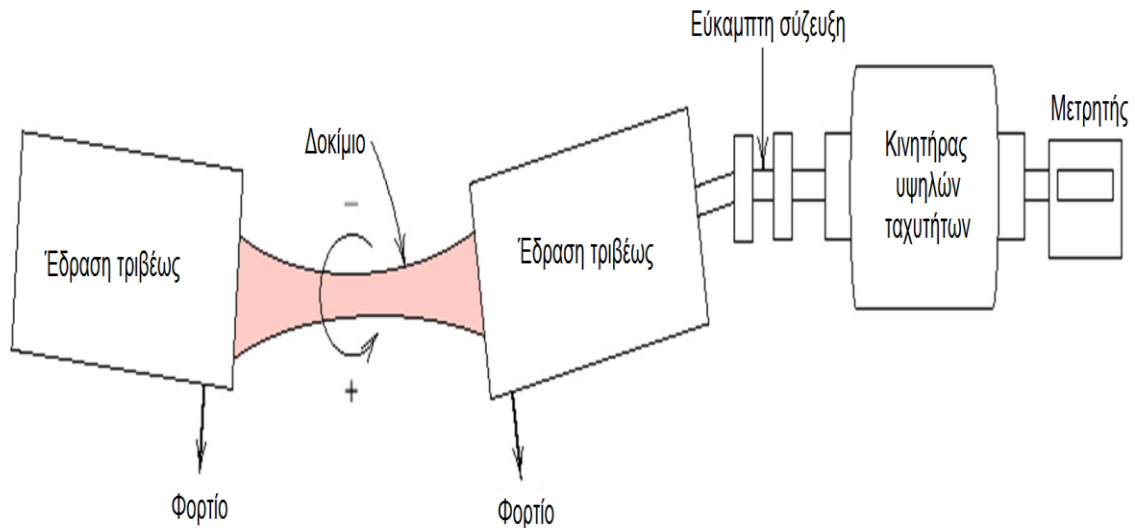
Την εποχή εκείνη ο Griffith δημοσίευσε το κλασικό του άρθρο σχετικά με την θραύση. Δεν αναγνωρίζεται ευρέως ότι ο Griffith υποκινήθηκε στις σπουδές του από το πρόβλημα της κόπωσης. Αναγνωρίζεται πως ο καθηγητής Jenkin, ήταν αυτός που μέσω αιτήματος του, ξεκίνησε να ασχολείται με αυτό το πρόβλημα ο Griffith. Η εργασία του Griffith έδειξε ότι ο τελευταίος κύκλος φόρτισης στην κόπωση δεν ήταν τίποτα περισσότερο από ψαθυρή θραύση,

που προκλήθηκε από κυκλική ανάπτυξη των ρωγμών κόπωσης σε ένα ασταθές μήκος του σώματος.

Λίγα πάντως ήταν γνωστά ή γραμμένα, για τους τρόπους με τους οποίους η πυροδοτημένη ρωγμή κόπωσης αυξήθηκε σε καταστροφικές διαστάσεις. Στην ουσία, όμως, δεν έγινε τίποτα ποσοτικό στο πρόβλημα της διάδοσης των ρωγμών μέχρι να ασχοληθεί ο Paris με αυτό το πρόβλημα, σαράντα χρόνια αργότερα.

Το 1927, δημοσιεύτηκε το βιβλίο “Η κόπωση των μετάλλων”, από τους Moore και Kommers. Ο H. F. Moore εργάστηκε και ασχολήθηκε για πολλά χρόνια με έναν μεγάλο αριθμό πρακτικών προβλημάτων που προκαλεί η κόπωση, ειδικά με προβλήματα που σχετίζονται και εμφανίζονται στην σιδηροδρομική βιομηχανία. Αυτό το βιβλίο αλλά και η εργασία του Moore και των συνεργατών του, είχαν τεράστια επίδραση στον σχεδιασμό της κόπωσης, στις δοκιμές κλπ., στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Ο Moore ήταν υπεύθυνος για την διοργάνωση της επιτροπής ASTM (American Society for Testing and Material) για την έρευνα σχετικά με την κόπωση.

Η επιτροπή SAE για τον σχεδιασμό και την εκτίμηση της κόπωσης έχει την προέλευσή της σε μία “ αντίθετη πορεία” των μηχανικών, οι οποίοι ήθελαν μία ομάδα, που θα ήταν πιο πρακτική πάνω στην κόπωση από την επιτροπή ASTM. Οι έρευνες για την κόπωση, κατά την διάρκεια του 1930 και του 1940 ήταν σε μεγάλο βαθμό αφοσιωμένες, στο να αποδείξουν πειραματικά τα αποτελέσματα των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν την μεγάλη διάρκεια ζωής της αντοχής σε κόπωση. Συνήθως, τα τεστ διεξάγονταν σε μηχανή περιστροφικής κάμψης, όπως φαίνεται στην *Σχήμα 2.1*, και το εύρος ζωής που ενδιέφερε τους επιστήμονες ήταν περίπου 10^6 κύκλοι ζωής και περισσότεροι.



Σχήμα 2.1 : Σχηματικό διάγραμμα διατάξεως δοκιμής κόπωσης με περιστροφική κάμψη.

Οι Coffin και Manson, ξεκίνησαν την εργασία τους κατά την διάρκεια του 1950, και διαπίστωσαν ποσοτικές σχέσεις μεταξύ πλαστικής παραμόρφωσης και ορίου ζωής σε κόπωση. Οι δυο τους, υποκινήθηκαν από τα προβλήματα της κόπωσης των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου η ανελαστική παραμόρφωση δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Το 1960 ήταν η χρονιά που έλαβαν χώρα πολλές σημαντικές συνεισφορές πάνω στο πρόβλημα της κόπωσης. Ο Irwin και άλλοι, πρωτοπόρησαν στην ανάπτυξη της μηχανικής θραύσης ως πρακτικό εργαλείο μηχανικής. Αναπτύχθηκαν ομαλές προσομοιώσεις αντικειμένων με εγκοπές και μέθοδοι μέτρησης κύκλων για μεταβλητά εύρη φορτίσεων. Αρκετή από αυτήν την εργασία, κατέστη δυνατή με την εισαγωγή των συστημάτων για την δοκιμή υλικών κλειστού βρόγχου και την εισαγωγή του ψηφιακού υπολογιστή, την επίλυση αρκετών προβλημάτων της μηχανικής.

Από το 1970 η ανάλυση της κόπωσης έγινε ένα καθιερωμένο μηχανικό εργαλείο για αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Παρότι υπάρχει όλη αυτή η γνώση αναφορικά με την κόπωση, ακούσιες αστοχίες λόγω κόπωσης εξακολουθούν να υφίστανται. Περαιτέρω έρευνα δεν πρόκειται να λύσει τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα, αλλά αυτό που θα βοηθήσει στην λύση των περισσότερων προβλημάτων που δημιουργεί η κόπωση είναι η εκπαίδευση. Οι πιο πολλές από τις αστοχίες είναι αποτέλεσμα τεχνολογικής κόπωσης που βρίσκεται στα χέρια

των “εμπειρογνομόνων”, και σπανιότερα στους ανθρώπους που σχεδιάζουν και φτιάχνουν κατασκευές και εξαρτήματα.

2.2 Ορισμός της κόπωσης

Ως κόπωση, μπορεί να ορισθεί η προοδευτική και δομική αλλοίωση που παρουσιάζεται σε ένα υλικό, όταν ασκείται σε αυτό περιοδικά επαναλαμβανόμενη ή δυναμικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, και η οποία μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υποβολής της, είναι πιθανόν να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού. Οι τάσεις που εμφανίζονται λέγονται τάσεις κοπώσεως.

Το όριο διαρροής είναι μέτρο της λεγόμενης στατικής αντοχής του υλικού. Στην περίπτωση τώρα της κόπωσης, το αντίστοιχο όριο είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στην δυναμική αντοχή του υλικού.

Η κόπωση στα μεταλλικά υλικά, εμφανίζεται ξαφνικά χωρίς να υπάρχουν προειδοποιητικές ενδείξεις, αρκεί αυτά να υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις και αποφορτίσεις. Αν τα φορτία ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο, τότε μικροσκοπικές ρωγμές θα αρχίσουν να κάνουν την εμφάνισή τους σε σημεία όπου έχουμε υψηλότερη συγκέντρωση τάσης, όπως η επιφάνεια. Στην συνέχεια, υπάρχει προοδευτική εξάπλωση αυτών των ρωγμών στο εσωτερικό του υλικού, έως ότου μια ρωγμή θα φτάσει σε ένα τέτοιο κρίσιμο μέγεθος, ώσπου το υλικό το οποίο απομένει και στο οποίο δεν έχει ακόμα εξαπλωθεί η ρωγμή, δεν θα μπορέσει να αντέξει τα φορτία, με αποτέλεσμα να σπάσει. Έτσι, είναι προφανές, ότι η αναγνώριση μιας αστοχίας λόγω της κόπωσης γίνεται μόνο όταν αυτή εκδηλωθεί. Και η αναγνώρισή της, γίνεται από ορισμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης.

Στην πράξη, είναι σχετικά δύσκολος ο υπολογισμός κατασκευών που καταπονούνται σε δυναμικά φορτία, γιατί υπάρχουν ατέλειες στο εσωτερικό των υλικών, όπως πόροι, ρωγμές κ.α. Το αποτέλεσμα αυτών των ατελειών, είναι ότι δημιουργούν κρίσιμες καταστάσεις για την αντοχή του υλικού. Εφόσον, οι εσωτερικές ατέλειες δεν μπορούν να καθιστούν γνωστές εκ των προτέρων και επιπλέον, διαφέρουν από σημείο σε σημείο εντός του υλικού, είναι εφικτό να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην αντοχή των τεμαχίων, τα οποία κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό.

Επομένως, αφού δεν μπορεί να γίνει με ακρίβεια ο θεωρητικός υπολογισμός της κόπωσης, υπάρχουν πειραματικές διαδικασίες που εφαρμόζονται, έτσι ώστε με την βοήθεια αυτών να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός της αντοχής σε κόπωση του εκάστοτε τεμαχίου. Υπάρχουν, πολλών διαφορετικών ειδών πειραματικές διατάξεις στην πράξη για διάφορους τύπους υλικών, καθώς και διαφορετικές προσεγγίσεις σε θεωρητικό επίπεδο για τον υπολογισμό των οριακών τάσεων αντοχής σε κόπωση των υλικών.

Η κόπωση, λοιπόν, είναι μία σημαντική παράμετρος, καθώς αποτελεί από μόνη της τον μεγαλύτερο λόγο αστοχίας στα μέταλλα. Υπολογίζεται ότι συμμετέχει στο 90% των αστοχιών που εμφανίζονται στα μέταλλα. Εκτός, όμως, από τα μέταλλα, τα πολυμερή και τα κεραμικά υλικά, είναι επίσης επιδεκτικά αυτού του τύπου αστοχίας.

2.3 Παράγοντες εμφάνισης της κόπωσης

Οι παράγοντες που απαιτούνται και οι οποίοι είναι βασικοί, για να εμφανιστεί αστοχία από κόπωση είναι τρεις:

1. ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης,
2. μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική ή θλιπτική τάση και
3. μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία.

2.4 Μεταβλητές που επηρεάζουν την κόπωση

Η συμπεριφορά σε κόπωση των υλικών, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μία σειρά από μεταβλητές. Ανάμεσα σε αυτές τις μεταβλητές περιλαμβάνονται:

- Το μέσο επίπεδο της τάσης
- Επιφανειακά φαινόμενα
- Ο γεωμετρικός σχεδιασμός
- Μεταλλουργικές μεταβλητές
- Το περιβάλλον.

2.4.1 Το επίπεδο της μέσης τάσης

Η εξάρτηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση από το πλάτος της τάσης αναπαρίσταται στα διαγράμματα σ-N, τα οποία αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε περίπτωση όμως, μια αύξηση του επιπέδου της μέσης τάσης οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση.

2.4.2 Επιφανειακά φαινόμενα

Σε πολλές συνθήκες φόρτισης, η μέγιστη τάση στο εσωτερικό μιας κατασκευής ή ενός εξαρτήματος εμφανίζεται στην επιφάνειά του. Κατά συνέπεια, οι περισσότερες ρωγμές που οδηγούν σε αστοχία από κόπωση πρωτοδημιουργούνται σε σημεία στην επιφάνεια, συγκεκριμένα σε θέσεις ενίσχυσης της τάσης.

Έχει παρατηρηθεί, ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις συνθήκες και στην διαμόρφωση της επιφάνειας των εξαρτημάτων. Πολυάριθμοι παράγοντες επηρεάζουν την αντίσταση στην κόπωση, η κατάλληλη διαχείριση των οποίων καταλήγει στη βελτίωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται σχεδιαστικά κριτήρια καθώς και διάφορες επιφανειακές κατεργασίες.

2.4.3 Παράγοντες Σχεδίασης

Ο σχεδιασμός ενός εξαρτήματος μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά του σε κόπωση. Κάθε εγκοπή ή γεωμετρική ασυνέχεια μπορεί να δράσει ως ανυψωτής τάσεων και θέση σχηματισμού ρωγμής από κόπωση. Σε αυτά τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται αυλακώσεις, οπές, χαραγές, νήματα και ούτω καθ' εξής. Όσο πιο οξεία είναι η ασυνέχεια (δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας) τόσο πιο μεγάλη θα είναι η συγκέντρωση τάσεων. Η πιθανότητα αστοχίας σε κόπωση μπορεί να μειωθεί αποφεύγοντας, όσο είναι δυνατόν, αυτές τις δομικές ανωμαλίες, ή κάνοντας σχεδιαστικές τροποποιήσεις έτσι ώστε να απαλείφονται απότομες αλλαγές στο περίγραμμα που οδηγούν σε

οξείες γωνίες. Για παράδειγμα η απαίτηση για στρογγυλεμένα επίπεδα μεταλλικά φύλλα με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο όπου υφίσταται αλλαγή στην διάμετρο ενός περιστρεφόμενου άξονα.

2.4.4 Επιφανειακές Κατεργασίες

Κατά τη διάρκεια επεξεργασίας στο μηχανουργείο, η δράση του εργαλείου κοπής εισάγει πάντοτε στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου αντικειμένου μικρές αμυχές και αυλακώσεις. Τα επιφανειακά αυτά σημάδια μπορούν να περιορίσουν την διάρκεια ζωής σε κόπωση. Έχει παρατηρηθεί ότι η καλύτερευση των επιφανειακών με λείανση αυξάνει σημαντικά την διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους βελτίωσης της συμπεριφοράς σε κόπωση επιτυγχάνεται με την επιβολή υπολειπόμενων θλιπτικών τάσεων εντός ενός λεπτού εξωτερικού επιφανειακού στρώματος. Με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση εξωτερικής επιφανειακής τάσης θα ακυρωνόταν κατά ένα μέρος και θα μειωνόταν σε μέγεθος λόγω των υπολειπόμενων θλιπτικών τάσεων. Το καθαρό φαινόμενο έγκειται στο ότι η πιθανότητα σχηματισμού ρωγμής και ως εκ τούτου αστοχίας σε κόπωση θα μειωνόταν.

Οι υπολειπόμενες θλιπτικές τάσεις εισάγονται, συνήθως, σε όλκιμα μέταλλα μηχανικά προκαλώντας τοπική πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της εξωτερικής επιφάνειας. Εμπορικά αυτό επιτυγχάνεται συνήθως, με μια διαδικασία που ονομάζεται σφαιροβολή (shot peening). Μικρά, σκληρά σωματίδια με διαμέτρους μεταξύ 0.1 και 1.0 mm βάλονται με μεγάλες ταχύτητες πάνω στην υπό κατεργασία επιφάνεια. Η προκύπτουσα παραμόρφωση επιφέρει θλιπτικές τάσεις σε βάθος που κυμαίνεται μεταξύ του ενός τετάρτου και του μισού της διαμέτρου του σωματιδίου.[2]

Η επιφανειακή σκλήρυνση είναι μία τεχνική με την οποία βελτιώνονται τόσο η επιφανειακή σκληρότητα όσο και η διάρκεια ζωής σε κόπωση των κραμάτων χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται με διαδικασία ενανθράκωσης ή εναζώτωσης, εκθέτοντας το εξάρτημα σε ανθρακούχα ή αζωτούχα ατμόσφαιρα σε υψηλή θερμοκρασία. Ένα περίβλημα πλούσιο σε άνθρακα ή άζωτο εισάγεται στην εξωτερική επιφάνεια από την ατομική διάχυση από την αέρια φάση. Το περίβλημα είναι συνήθως της τάξης του 1 mm σε βάθος και είναι σκληρότερο από τον εσωτερικό πυρήνα του υλικού.

Η βελτίωση των ιδιοτήτων σε κόπωση προκύπτει από την αυξημένη σκληρότητα στο περίβλημα, καθώς επίσης από τις επιθυμητές υπολειπόμενες θλιπτικές τάσεις, ο σχηματισμός των οποίων συνοδεύει την διαδικασία ενανθράκωσης ή εναζώτωσης.

2.4.5 Περιβαλλοντικές επιδράσεις

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη συμπεριφορά σε κόπωση των υλικών. Υπάρχουν δύο τύποι αστοχιών σε κόπωση λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος: η θερμική κόπωση και η κόπωση από διάβρωση.

Η θερμική κόπωση συνήθως εισάγεται σε υψηλές θερμοκρασίες από κυμαινόμενες θερμικές τάσεις, ενώ δεν απαιτείται να είναι παρούσες μηχανικές τάσεις από εξωτερική πηγή. Η αφετηρία των θερμικών τάσεων βρίσκεται στον περιορισμό της διαστολής των διαστάσεων ή και στην συστολή που φυσιολογικά εμφανίζεται σε ένα δομικό στοιχείο λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας. Το μέγεθος της αναπτυσσόμενης τάσης από μία μεταβολή της θερμότητας κατά ΔT εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής α_1 και το μέτρο ελαστικότητας E σύμφωνα με την σχέση:

$$\sigma = \alpha_1 \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Φυσικά, θερμικές τάσεις δεν θα ανακύψουν εάν αυτός ο μηχανικός περιορισμός είναι απών. Έτσι, ένας προφανής τρόπος αποτροπής αυτού του τύπου κόπωσης είναι η απαλοιφή ή τουλάχιστον η μείωση, της αιτίας του περιορισμού, επιτρέποντας ανεμπόδιστες μεταβολές διαστάσεων με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ή επιλογή υλικών με τις κατάλληλες φυσικές ιδιότητες.

Η αστοχία που εμφανίζεται με την ταυτόχρονη δράση κυκλικής τάσης και χημικής προσβολής αποκαλείται κόπωση από διάβρωση. Διαβρωτικά περιβάλλοντα έχουν επιβλαβή επίδραση και παράγουν μικρότερες διάρκειες ζωής σε κόπωση. Ακόμη και η συνηθισμένη ατμόσφαιρα περιβάλλοντος θα επηρεάσει τη συμπεριφορά σε κόπωση ορισμένων υλικών. Μικρές οπές μπορεί να σχηματισθούν ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων μεταξύ του περιβάλλοντος και του υλικού, που στη συνέχεια λειτουργούν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων και συνεπώς ως θέσεις έναρξης ρωγμών. Επιπροσθέτως, ο ρυθμός διάδοσης των ρωγμών εντείνεται ως αποτέλεσμα του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η φύση της κυκλικής τάσης θα επιδράσει στην συμπεριφορά σε κόπωση. Για παράδειγμα, μείωση της συχνότητας

εφαρμογής φορτίου οδηγεί σε μακρύτερες περιόδους κατά την διάρκεια των οποίων η ανοικτή ρωγμή είναι σε επαφή με το περιβάλλον και σε ελάττωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση.

Για την παρεμπόδιση της κόπωσης από διάβρωση υφίστανται διάφορες προσεγγίσεις. Από την μία μεριά, μπορούμε να πάρουμε μέτρα για την μείωση του ρυθμού διάβρωσης, όπως για παράδειγμα, να εφαρμόσουμε μία προστατευτική επιφανειακή επικάλυψη, να επιλέξουμε ένα υλικό περισσότερο ανθεκτικό στη διάβρωση, και να ελαττώσουμε τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος.

2.5 Κατηγορίες του φαινομένου της κόπωσης

Ανάλογα με το είδος των τάσεων και με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης των καταπονήσεων που υφίστανται ένα υλικό, το φαινόμενο της κόπωσης μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, την **Πολυκυκλική** και την **Ολιγοκυκλική** κόπωση.

Στην **πολυκυκλική** κόπωση, το υλικό υποβάλλεται σε έναν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία του ($N > 10^4$). Καθώς οι τιμές των τάσεων που ασκούνται είναι ελαστικές, το υλικό δεν υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις.

Τέτοιου είδους κόπωση, μπορεί να κάνει την εμφάνισή της σε περιστρεφόμενους άξονες κατά την διάρκεια λειτουργία τους, ή στα φτερά των αεροπλάνων.

Στην **Ολιγοκυκλική** κόπωση, το υλικό δέχεται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής του, με συνέπεια το υλικό να υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης σε κάθε κύκλο φόρτισης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την μείωση κατά πολύ του αριθμού των κύκλων φόρτισης του υλικού μέχρι την αστοχία του ($N < 10^4$).

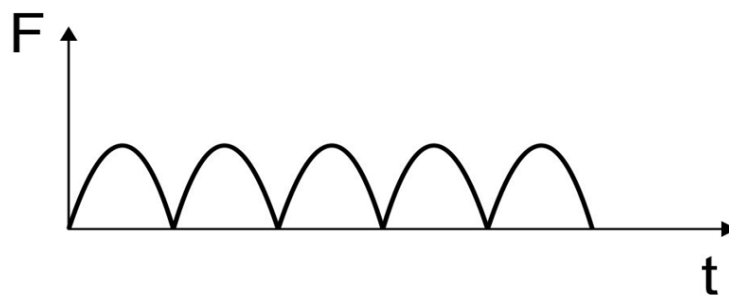
Ένα παράδειγμα ολιγοκυκλικής κόπωσης, είναι η καταπόνηση που δέχεται ο σπλισμός ενός κτιρίου, κατά την διάρκεια σεισμού.

2.6 Συμπεριφορά υλικών σε καταπονήσεις

Οι καταπονήσεις που δέχονται τα υλικά σώματα, παίρνουν τον χαρακτηρισμό δυναμικών καταπονήσεων, όταν τα φορτία ασκούνται συναρτήσει του χρόνου. Διαφορετικά, αυτά τα φορτία που δεν εξαρτώνται από τον χρόνο ονομάζονται στατικά.

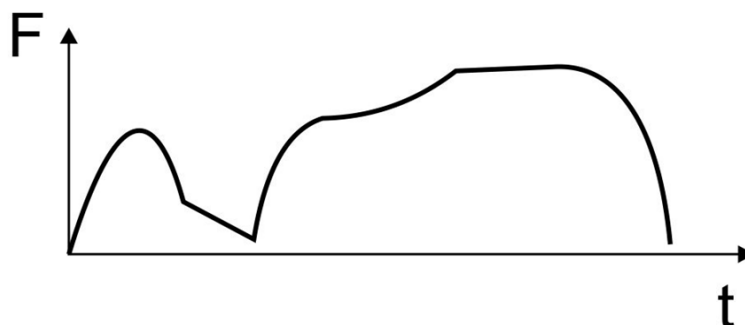
Υπάρχουν δύο κατηγορίες στις οποίες μπορούν να διακριθούν οι δυναμικές καταπονήσεις :

1. Στις εναλλασσόμενες καταπονήσεις, όταν αυτές επαναλαμβάνονται περιοδικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, όπου παρουσιάζεται η γραφική παράσταση μιας καταπόνησης (F) συναρτήσει του χρόνου (t).



Σχ. 2.2: Εναλλασσόμενες καταπονήσεις

2. Στις τυχαίες καταπονήσεις, όταν είναι τυχαία η εφαρμογή τους σε σχέση με τον χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

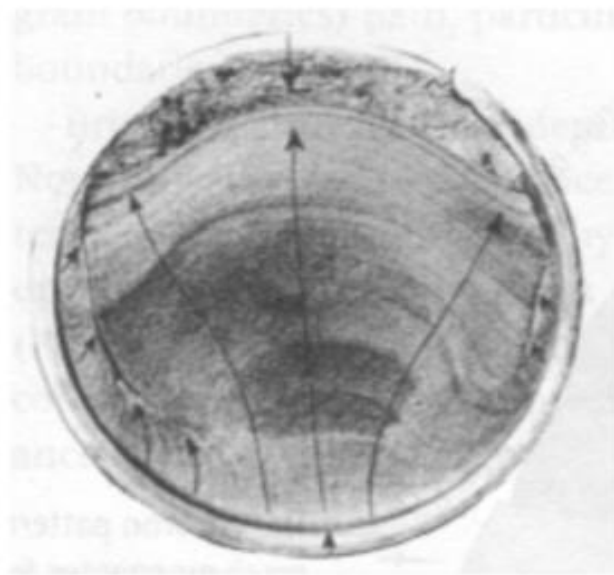


Σχ. 2.3: Τυχαίες καταπονήσεις

Στην πράξη, η επίδραση ενός χρονικά σταθερού φορτίου, δεν υφίσταται στις περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές. Τις περισσότερες φορές έχουμε μεταβολή στην τιμή και στον τύπο του φορτίου συναρτήσει του χρόνου. Επομένως, πολλά τεχνικά υλικά, βρίσκονται κάτω από την επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων ή τάσεων στις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται ως λειτουργικά εξαρτήματα. Οι τάσεις αυτές, καταπονούν τις περισσότερες φορές το υλικό σε εφελκυσμό και σε θλίψη και η μέγιστη τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Αρκετά μεταλλικά εξαρτήματα, όπως τα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης και τα πτερύγια των αεροσκαφών, είναι μερικά παραδείγματα που υφίστανται τέτοιες δυναμικές καταπονήσεις. Όταν, αυτή η επίδραση των δυναμικών καταπονήσεων στα υλικά οδηγεί σε αστοχία του υλικού, τότε έχουμε το φαινόμενο της κόπωσης.

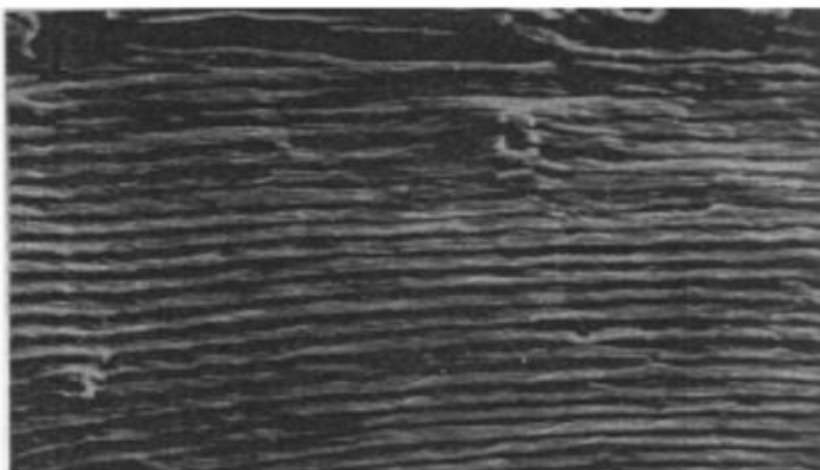
2.7 Περιπτώσεις αστοχιών λόγω κόπωσης

Η αναγνώριση μιας αστοχίας λόγω κόπωσης που μπορεί να παρουσιάσει ένα υλικό, μπορεί να γίνει αν παρατηρήσουμε την επιφάνεια θραύσης του υλικού. Στην *Σχήμα 2.4*, παρουσιάζεται μια θραύση από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα. Πιο συγκεκριμένα, ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της θραύσης έχει λεία εμφάνιση, η οποία οφείλεται στην τριβή των επιφανειών του ρήγματος μεταξύ τους, καθώς αυτό προωθείται σταδιακά κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Αντίθετα, ένα μικρότερο τμήμα της επιφάνειας, το οποίο αντιστοιχεί στο τελικό στάδιο της θραύσης, έχει ανώμαλη εμφάνιση και οφείλεται στην γρήγορη τελική προώθηση του ρήγματος με όλκιμο τρόπο μέσα στο υλικό, καθώς η μειωμένη διατομή του υλικού που έχει απομείνει δεν μπορεί να αντέξει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία.



Σχ. 2.4 : Θραύση από κόπωση σε περιστρεφόμενο άξονα

Στο Σχήμα 2.5, παρουσιάζονται γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης ενός υλικού. Πιο συγκεκριμένα, οι γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους, το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το ρήγμα. Η απόσταση της μίας γράμμωσης από την άλλη δίνει μια καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό.



Σχ. 2.5 : Γραμμώσεις κόπωσης σε επιφάνεια θραύσης υλικού

2.8 Κυκλικές τάσεις

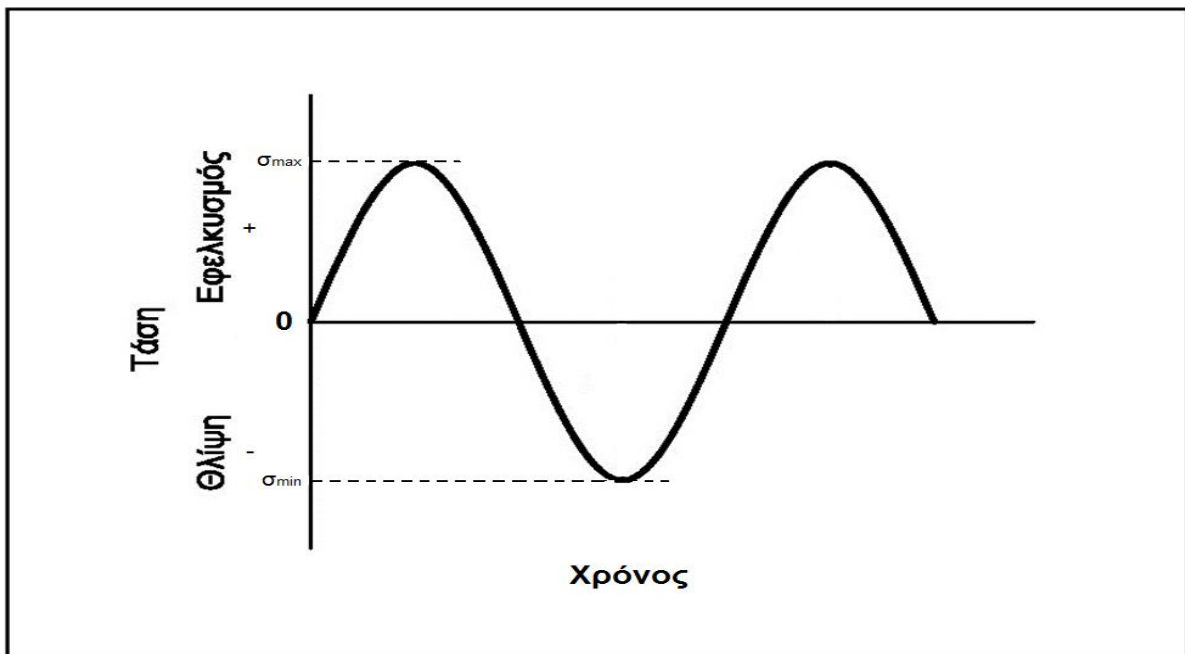
Η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι αξονικής (εφελκυσμός – θλίψη), καμπτικής (λυγισμός), ή στρεπτικής (συστροφή) φύσης. Γενικά, υπάρχουν τρεις δυνατοί τύποι χρονικά κυμαινόμενης τάσης :

- ◆ Η αναστρεφόμενη κυκλική τάση
- ◆ Η επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση
- ◆ Ο τυχαίος κύκλος τάσης

2.8.1 Η αναστρεφόμενη κυκλική τάση

Στην αναστρεφόμενη κυκλική τάση, η τάση εναλλάσσεται από μία μέγιστη εφελκυστική τάση (σ_{\max}) σε μία μέγιστη θλιπτική τάση (σ_{\min}) ίσου μεγέθους, όπου $\sigma_{\max} > 0$ και $\sigma_{\min} < 0$.

Στο Σχήμα 2.6, απεικονίζεται η περίπτωση της αναστρεφόμενης κυκλικής τάσης.



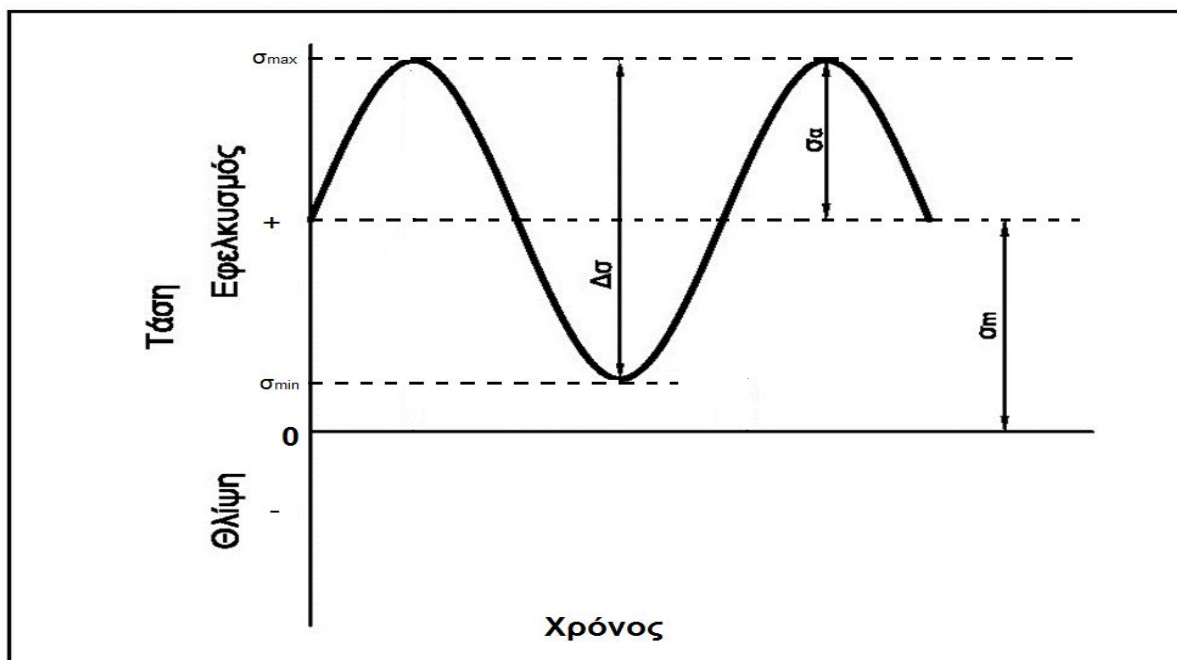
Σχ. 2.6 : Αναστρεφόμενη κυκλική τάση

2.8.2 Η επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τάσης είναι μη συμμετρικές ως προς το επίπεδο της μηδενικής τάσης, έχουμε δηλαδή $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$.

Στην επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση, οι τιμές των σ_{\max} και σ_{\min} θα μπορούσαν να είναι θετικές, δηλαδή να είναι και οι δύο τάσεις εφελκυστικές, να είναι αρνητικές, δηλαδή και οι δύο τάσεις να είναι θλιπτικές, ή ακόμα θα μπορούσαν να είναι $\sigma_{\max} > 0$ και $\sigma_{\min} < 0$, δηλαδή η σ_{\max} εφελκυστική και η σ_{\min} θλιπτική.

Στο Σχήμα 2.7, απεικονίζεται η περίπτωση της επαναλαμβανόμενης κυκλικής τάσης.



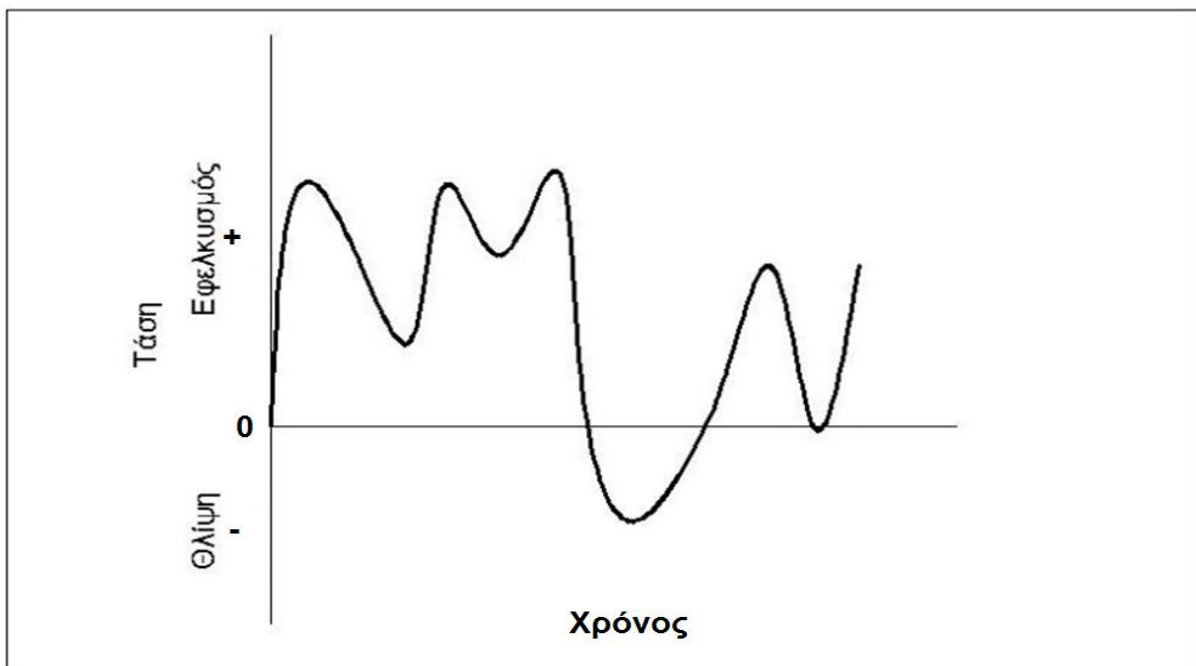
Σχ. 2.7 : Επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

2.8.3 Ο τυχαίος κύκλος τάσης

Ο τυχαίος κύκλος τάσης, είναι το είδος τάσεων όπου συναντάται πιο συχνά στην πράξη.

Στην περίπτωση του τυχαίου κύκλου τάσης, το επίπεδο της τάσης μπορεί να μεταβάλλεται τυχαία ως προς το πλάτος και τη συχνότητα.

Στο Σχήμα 2.8, απεικονίζεται η περίπτωση του τυχαίου κύκλου τάσης.



Σχ. 2.8: Ο τυχαίος κύκλος τάσης

2.8.4 Παράμετροι των κυμαινόμενων κύκλων τάσης

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των κυμαινόμενων κύκλων τάσης είναι οι εξής:

- Η μέγιστη τιμή της τάσης σ_{\max}

- Η ελάχιστη τιμή της τάσης σ_{\min}

- Το εύρος της τάσης Δ_{σ} , το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των τιμών σ_{\max} και σ_{\min} , και δίνεται από την σχέση:

$$\Delta_{\sigma} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.2)$$

- Η μέση τάση σ_m , που ορίζεται ως η μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

- Το πλάτος τάσης σ_{α} , το οποίο ισούται με το μισό του εύρους της τάσης Δ_{σ} :

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\Delta_{\sigma}}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.4)$$

- Ο λόγος τάσεων R , ο οποίος ισούται με τον λόγο της ελάχιστης προς την μέγιστη τάση:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.5)$$

- Η αναλογία εύρους τάσεων A , που ισούται με τον λόγο της μεταβαλλόμενης προς την μέση τάση:

$$A = \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (2.6)$$

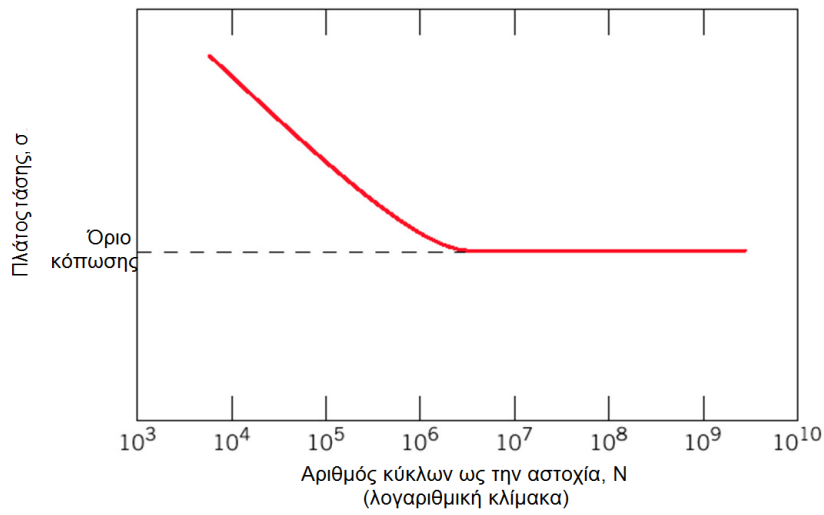
2.9 Η καμπύλη σ - N

Όπως και με τα άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες της κόπωσης των υλικών μπορούν να προσδιοριστούν με εργαστηριακές δοκιμές προσομοίωσης. Η διάταξη δοκιμής κόπωσης πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να αναπαράγει όσον το δυνατόν πιστότερα τις συνθήκες λειτουργίας της τάσης (επίπεδο τάσης, χρόνος, συχνότητα, τύπος τάσης, κτλ.). Στο *Διάγραμμα 2.6*, φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα διάταξης δοκιμής με περιστροφική κάμψη, που χρησιμοποιείται συνήθως για δοκιμές κόπωσης. Οι θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις επιβάλλονται στο δοκίμιο καθώς ταυτόχρονα κάμπτεται και περιστρέφεται. Δοκιμές διεξάγονται συχνά χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενο μονοαξονικό κύκλο φόρτισης εφελκυσμού-θλίψης.

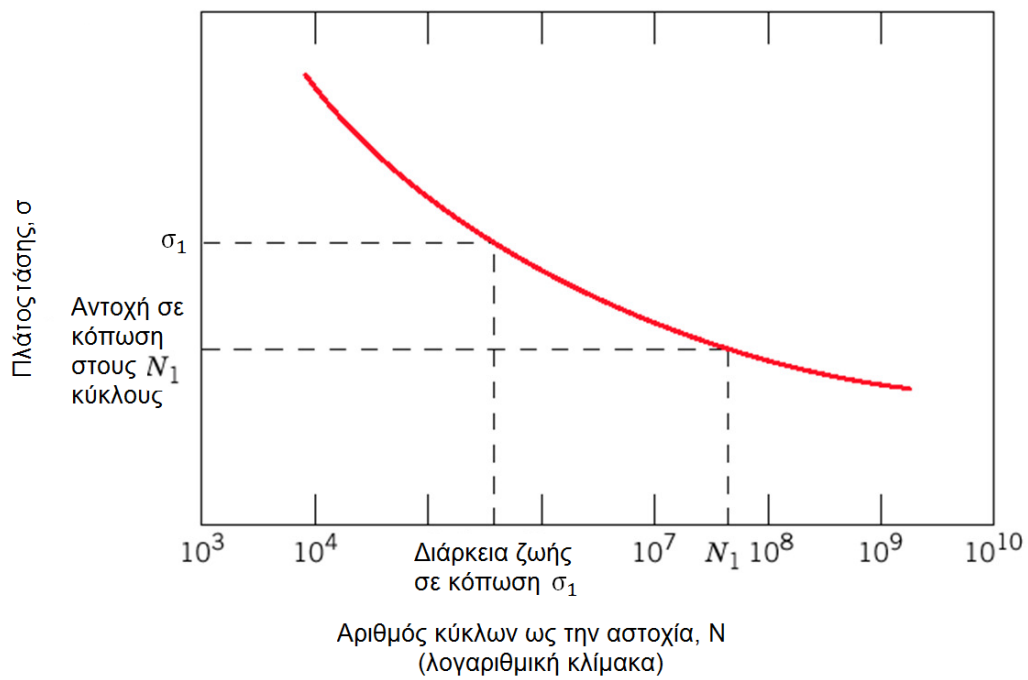
Μια σειρά δοκιμών αρχίζει υποβάλλοντας το δοκίμιο στην κυκλική τάση σε σχετικά υψηλή τιμή του μέγιστου πλάτους τάσης (σ_{\max}), συνήθως της τάξης των δύο τρίτων της στατικής τιμής της αντοχής σε εφελκυσμό. Στα πειράματα αυτά καταγράφεται ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων κύκλων μέχρι την αστοχία.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε άλλα δοκίμια μειώνοντας προοδευτικά το πλάτος της μέγιστης τάσης. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε διάγραμμα τάσης σ συναρτήσεως του λογαρίθμου του αριθμού των κύκλων φόρτισης N μέχρι την αστοχία, για κάθε ένα από τα δοκίμια. Οι τιμές του σ συνήθως θεωρούνται ως τα πλάτη της τάσης (σ_a), ενώ κατά περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των σ_{\max} ή σ_{\min} .

Δύο διακριτοί τύποι συμπεριφοράς παρατηρούνται στις καμπύλες σ - N , που αναπαριστώνται στο *Σχήμα 2.9* και στο *Σχήμα 2.10*.



Σχ. 2.9: Το πλάτος τάσης (σ) συναρτῆσει του λογαρίθμου του αριθμού των κύκλων ως την αστοχία από κόπωση (N) για υλικό που παρουσιάζει όριο κόπωσης.[2]



Σχ. 2.10: Το πλάτος τάσης (σ) συναρτῆσει του λογαρίθμου του αριθμού των κύκλων ως την αστοχία από κόπωση (N) για υλικό που δεν παρουσιάζει όριο κόπωσης.[2]

Όπως υποδεικνύουν τα διαγράμματα, όσο υψηλότερο είναι το μέγεθος της τάσης, τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των κύκλων που είναι ικανό το υλικό να αντέξει πριν την αστοχία. Σε ορισμένα κράματα σιδήρου (όπου ο σίδηρος είναι το βασικό συστατικό) και τιτανίου, η καμπύλη σ - N (Σχήμα 2.9) γίνεται οριζόντια σε μεγαλύτερες τιμές του N , ή υπάρχει ένα οριακό επίπεδο τάσης, που αποκαλείται **όριο κόπωσης ή όριο αντοχής**, κάτω από το οποίο αστοχία λόγω κόπωσης δεν θα εμφανισθεί. Το όριο κόπωσης αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη τιμή της κυμαινόμενης τάσης που δεν θα προκαλέσει αστοχία για έναν ουσιαστικά άπειρο αριθμό κύκλων. Σε πολλούς χάλυβες τα όρια κόπωσης κυμαίνονται μεταξύ του 35 και 60% της αντοχής σε εφελκυσμό.

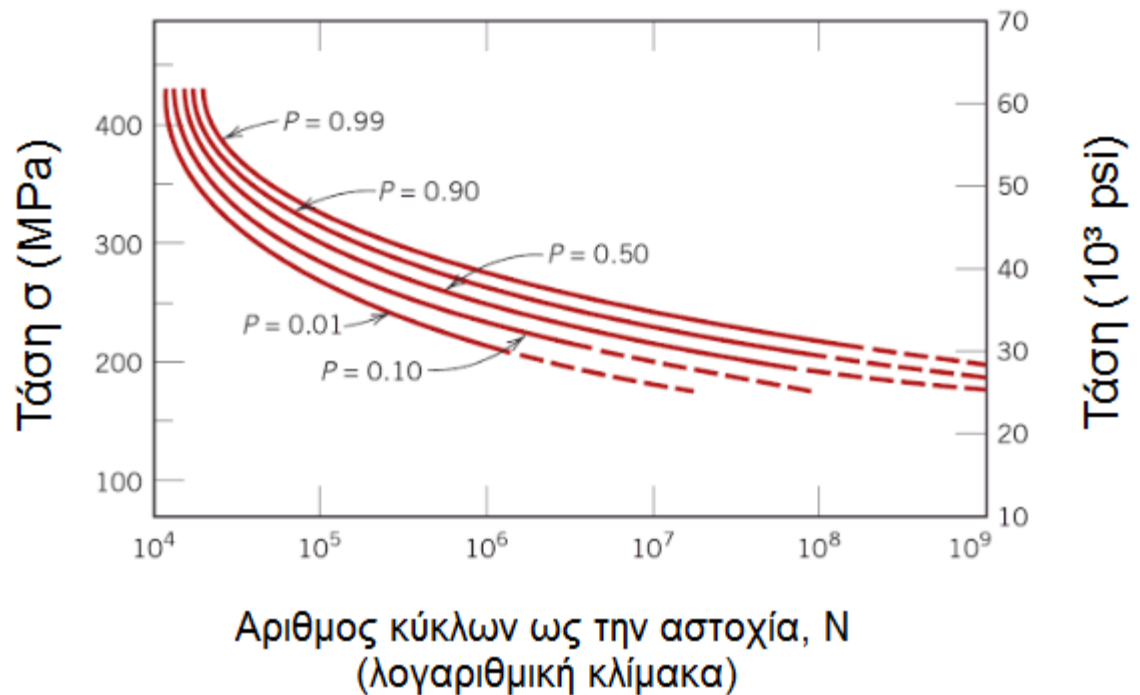
Τα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα (π.χ. αλουμινίου, χαλκού, μαγνησίου) δεν επιδεικνύουν όριο κόπωσης και με αυτήν την έννοια η καμπύλη σ - N συνεχίζει την πτωτική της τάση καθώς αυξάνονται οι τιμές του N (Σχήμα 2.10). Με αυτόν τον τρόπο, η κόπωση θα εμφανισθεί τελικά ανεξάρτητα από το μέγεθος της τάσης. Στα υλικά αυτά, η απόκριση σε κόπωση αναφέρεται ως **αντοχή σε κόπωση**, που ορίζεται ως το επίπεδο της τάσης στο οποίο δεν εμφανίζεται αστοχία για κάποιον συγκεκριμένο αριθμό κύκλων (π.χ. 10^7 κύκλοι). Ο προσδιορισμός της αντοχής σε κόπωση παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 2.10. [2]

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος που καθορίζει την συμπεριφορά των υλικών σε κόπωση είναι η **διάρκεια ζωής σε κόπωση N** , που είναι ο αριθμός των κύκλων που προκαλεί αστοχία σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, όπως προκύπτει από το Σχήμα 2.10. Δυστυχώς, υφίσταται πάντα μία σημαντική διασπορά των δεδομένων της κόπωσης, δηλαδή μία διακύμανση της μετρούμενης τιμής του N , για έναν αριθμό δοκιμών που εξετάστηκαν στο ίδιο επίπεδο τάσης. [2]

Το γεγονός αυτό οδηγεί σε σημαντικές σχεδιαστικές αβεβαιότητες, όταν η διάρκεια ζωής σε κόπωση ή και το όριο κόπωσης (ή αντοχή) βρίσκονται υπό μελέτη. Η διασπορά στα αποτελέσματα είναι συνέπεια της ευαισθησίας της κόπωσης σε μία σειρά παραμέτρων της δοκιμής και του υλικού που είναι αδύνατον να ελεγχθούν με ακρίβεια. Στις παραμέτρους αυτές περιλαμβάνονται η κατασκευή του δοκιμίου, η προετοιμασία της επιφάνειας, οι μεταλλουργικές μεταβλητές, η ευθυγράμμιση του δοκιμίου στην πειραματική διάταξη, η μέση τάση, και η συχνότητα.

Καμπύλες κόπωσης σ - N παρόμοιες με αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 2.9 και στο Σχήμα 2.10 αναπαριστούν τις καμπύλες "βέλτιστης προσαρμογής" που έχουν χαραχθεί μέσω πειραματικών σημείων που είναι μέσες τιμές.

Διάφορες τεχνικές της στατιστικής έχουν αναπτυχθεί για να προσδιορίζουν την διάρκεια ζωής σε κόπωση και το όριο κόπωσης με όρους πιθανοτήτων. Ένας συμβατικός τρόπος για την αναπαράσταση δεδομένων που έχουν επεξεργασθεί με αυτόν τον τρόπο είναι μέσω καμπυλών σταθερής πιθανότητας, μερικές των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.11.



Σχ. 2.11: Καμπύλες σ -N της πιθανότητας αστοχίας σε κόπωση για το 7075-T6 κράμα αλουμινίου. [2]

Η τιμή P που σχετίζεται με κάθε μία καμπύλη αναπαριστά την πιθανότητα αστοχίας. Για παράδειγμα, σε τάση 200 MPa (30000 psi) αναμένουμε να αστοχήσει το 1% ($P=0.01$) των δοκιμίων κοντά στους 10^6 κύκλους και το 50% ($P=0.50$) κοντά στους 10^7 κύκλους και ούτω καθ' εξής.[2]

Η γνώση των δεδομένων των καμπυλών σ -N για την πιθανότητα αστοχίας σε κόπωση ενός υλικού, μας επιτρέπει να κάνουμε με μεγαλύτερη αξιοπιστία τις επιλογές μας ανάλογα με τις ανάγκες μιας κατασκευής. Για παράδειγμα, σε μία κρίσιμη κατασκευή, που η αποφυγή της αστοχίας σε κόπωση είναι πάρα πολύ σημαντικός παράγοντας, πρέπει οπωσδήποτε να λάβουμε υπόψη τα δεδομένα της καμπύλης $P=0.01$, αφού αυτή η καμπύλη

αναφέρεται στην δυσμενέστερη περίπτωση αντοχής σε κόπωση, με πιθανότητα 1%, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανότητα το υλικό μας να αστοχήσει.

Για να παραχθούν τέτοιου είδους διαγράμματα, απαιτείται ένα τεράστιο πλήθος δοκιμών, που συνήθως μπορεί να φτάσει ή ακόμα και να ξεπεράσει συνολικά τα 1000 δοκίμια, καθώς και η πραγματοποίηση του αντίστοιχου αριθμού δοκιμών κόπωσης. Από αυτό προκύπτει, ότι το κόστος για την κατασκευή τέτοιων διαγραμμάτων είναι αρκετά μεγάλο. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχουν στην πραγματικότητα, ελάχιστα τέτοιου είδους πλήρη διαγράμματα και όσα υπάρχουν αφορούν υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολύ κρίσιμες εφαρμογές.

Οι συμπεριφορές κόπωσης που αναπαριστώνται σε μία καμπύλη αντοχής σε κόπωση (καμπύλη σ-N), μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο περιοχές ή ζώνες.

2.9.1 Περιοχή κόπωσης χαμηλού αριθμού κύκλων

Στην περιοχή κόπωσης χαμηλού αριθμού κύκλων, έχουμε υψηλά φορτία που επιφέρουν όχι μόνο ελαστική παραμόρφωση αλλά επίσης και κάποια πλαστική παραμόρφωση κατά την διάρκεια κάθε κύκλου. Κατά συνέπεια, οι διάρκειες σε ζωής σε κόπωση είναι σχετικά σύντομες. Η κόπωση χαμηλού αριθμού κύκλων εμφανίζεται σε λιγότερους από 10^4 μέχρι 10^5 κύκλους.

2.9.2 Περιοχή κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων

Η περιοχή κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων, περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό κύκλων ($N > 10^5$ κύκλους), και οι παραμορφώσεις σε αυτήν την περιοχή είναι πλήρως ελαστικές. Οι δοκιμές υψηλών κύκλων κόπωσης, συνήθως διεξάγονται για 10^7 κύκλους και μερικές φορές για 5×10^8 κύκλους για μη σιδηρούχα μέταλλα. Αν και η εφαρμοζόμενη τάση είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να είναι ελαστική, μπορεί να λάβει χώρα πλαστική παραμόρφωση στην αιχμή της ρωγμής.

Τα δεδομένα της κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων φόρτισης συνήθως παρουσιάζονται σε γραφική παράσταση της τάσης σ , συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ως την αστοχία N . Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα για τον αριθμό των κύκλων ως την αστοχία. Η τιμή της τάσης, σ , μπορεί να είναι η μέγιστη τιμή της τάσης, σ_{\max} , η ελάχιστη τιμή της τάσης, σ_{\min} , ή η μεταβαλλόμενη τάση, σ_a . Η σχέση σ - N , συνήθως προσδιορίζεται για μία συγκεκριμένη τιμή της μέσης τάσης, σ_m , ή για μία από τις δύο αναλογίες, R ή A .

2.10 Κόπωση σε βηματικές συνθήκες καταπόνησης (μεταβλητό πλάτος)

Όπως γνωρίζουμε, μέσα από ένα διάγραμμα Wöhler μπορούμε να υπολογίσουμε την διάρκεια ζωής ενός υλικού που καταπονείται σε κόπωση με σταθερό πλάτος τάσης για μέση τάση ίση με το μηδέν. Ο πιο απλός κανόνας όπου χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση του φαινομένου της κόπωσης είναι ο γραμμικός νόμος συσσώρευσης της βλάβης που διατύπωσε ο Miner όπου είναι της μορφής:

$$D = \frac{n}{N} \quad (2.7)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των επιβαλλομένων κύκλων κόπωσης για σταθερές συνθήκες σ_m , σ_a και N είναι ο αριθμός των επιβαλλομένων κύκλων κόπωσης για σταθερές συνθήκες καταπόνησης σ_m , σ_a . Αστοχία επομένως, του υλικού θα υπάρξει όταν το άθροισμα των επιμέρους βλαβών που ασκούνται στο υλικό ισούνται με την μονάδα.

Για την περιγραφή της καμπύλης σ - N (Καμπύλη Wöhler) χρησιμοποιείται η σχέση του Basquin :

$$\sigma_a * N^a = C \quad (2.8)$$

όπου το a και C είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό και η σταθερά a λαμβάνει τις τιμές 0.125 έως 0.066 για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά. Ο νόμος του Basquin, ισχύει για περιπτώσεις που το υλικό φορτίζεται στην πολυκυκλική περιοχή της καμπύλης wöhler και η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού.

Ο παραπάνω νόμος του Basquin ισχύει για συμμετρική αντιστρεπτή φόρτιση για $\sigma_m=0$ και περιγράφει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα ενός υλικού για την θραύση του

λόγω της κόπωσης έχοντας ως δεδομένα τις σταθερές a και C . Σε περίπτωση όπου η εφαρμοζόμενη μέση τάση είναι διαφορετική από το μηδέν, δηλαδή $\sigma_m \neq 0$, τότε είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ένα ανάλογο πλάτος τάσης που θα έχει τους ίδιους κύκλους κόπωσης για την αστοχία με την πραγματική καταπόνηση με μέση τάση σ_m και πλάτος τάσης σ_a . Για αυτόν τον σκοπό, για να υπολογίσουμε αυτό το ανάλογο πλάτος τάσης σ_f , χρησιμοποιείται ο κανόνας του Goodman, ο οποίος είναι :

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{f'}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_B} = 1 \quad (2.9)$$

όπου σ_a είναι το πραγματικό πλάτος τάσης, σ_m η πραγματική μέση τάση, $\sigma_{f'}$ το ισοδύναμο πλάτος τάσης που επιφέρει τους ίδιους κύκλους αστοχίας μέχρι την θραύση και σ_B είναι το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό. Οι κανόνες αυτοί είναι εμπειρικοί και δεν εφαρμόζονται με επιτυχία σε όλες τις περιπτώσεις για κόπωση σε βηματικές συνθήκες κατεύθυνσης (μεταβλητό πλάτος) και για αυτό σε επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούμε διαφορετικούς κανόνες-μοντέλα για να καταφέρουμε να αναλύσουμε και να προσεγγίσουμε καλύτερα την διάρκεια ζωής του υλικού όταν αυτό καταπονηθεί σε κόπωση και στην συνέχεια συγκρίνουμε ποιος από αυτούς τους κανόνες εξυπηρετεί πιο ορθά την εξαγωγή συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων, με αποτέλεσμα να πετύχουμε τον σκοπό αυτό.

Η διαφορά του μεταβλητού με το σταθερό πλάτος κόπωσης, είναι ότι στο μεταβλητό πλάτος επιδρούν τάσεις με διαφορετικές τιμές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, λόγω των μεταβαλλόμενων φορτίων που ασκούνται στο δοκίμιο που εξετάζεται, να δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση. Έτσι, το δοκίμιο αυτό, θα έχει μικρότερη διάρκεια ζωής σε κόπωση, από ότι αν επιβάλλονταν σε αυτό τάσεις με σταθερό πλάτος .

Με το παράδειγμα που ακολουθεί, μπορούμε να κατανοήσουμε την λειτουργία της κόπωσης με μεταβλητό πλάτος στα μεταλλικά υλικά. Για δοκίμιο από χάλυβα AISI 4340 το οποίο υποβάλλεται με δύο φορτία, το ένα (1) και δύο (2) του πίνακα, θέλουμε να υπολογίσουμε τους κύκλους καταπόνησης του δοκιμίου αυτού με τους οποίους θέλει ακόμα για να αστοχήσει, επιβάλλοντας ένα ακόμα τρίτο (3) φορτίο , και μέσω της εξίσωσης του Basquin για $a=0.07$ και $C=650$ Mpa και $\sigma_B=500$ Mpa, έχουμε τα εξής δεδομένα:

Καταπονήσεις	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	n
1	150	110	4000000
2	110	130	70000
3	175	105	n_3

Εδώ ισχύει ο γραμμικός κανόνας του Miner :

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1 \quad (1)$$

και για τα τρία στάδια καταπόνησης, όπου n_1, n_2, n_3 είναι οι κύκλοι καταπόνησης σε κόπωση του υλικού για τα αντίστοιχα στάδια καταπόνησης και τα N_1, N_2, N_3 είναι οι κύκλοι αστοχίας για αυτά τα στάδια καταπόνησης. Επειδή όμως τα τρία στάδια, αυτά, καταπόνησης έχουν διαφορετική μέση τάση κόπωσης πρέπει να γίνει αλλαγή ώστε να έχουν και τα τρία αυτά στάδια την ίδια μέση τάση σ_m . Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τον κανόνα του Miner, μετατρέπουμε τις τρεις διαφορετικές καταπονήσεις με την ίδια μέση τάση $\sigma_m=0$ και διαφορετικό ισοδύναμο πλάτος καταπόνησης σ_f , μέσω της εξίσωσης του Goodman:

$$\frac{\sigma_\alpha}{\sigma_{f1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_B} = 1 \quad (2)$$

$$\Rightarrow \sigma_f = \frac{\sigma_\alpha}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)} \quad (3)$$

Οι κύκλοι αστοχίας για αυτές τις καταπονήσεις μπορούν να υπολογιστούν μέσω της εξίσωσης του Basquin, και που ισχύει μόνο για $\sigma_m=0$. Άρα, έχουμε:

$$\sigma_\alpha * N = C \Rightarrow N = \left(\frac{C}{\sigma_\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

1° Στάδιο Καταπόνησης

Μέσω της εξίσωσης (3) υπολογίζουμε το ισοδύναμο πλάτος τάσης:

$$\sigma_{f1} = \frac{110}{\left(1 - \frac{150}{500}\right)} \Rightarrow$$

$$\sigma_{f1} = 157.14 \text{ MPa} \quad (5)$$

Μέσω της εξίσωσης (3) υπολογίζουμε τους κύκλους αστοχίας του χάλυβα:

$$N_1 = \left(\frac{650}{157.14} \right)^{\frac{1}{0.07}} \Rightarrow$$

$$N_1 = (4.136)^{14.28571} \Rightarrow$$

$$N_1 = 643117969.5 \text{ κύκλοι φόρτισης} \quad (6)$$

2° Στάδιο Καταπόνησης

Μέσω της εξίσωσης (5) υπολογίζουμε το ισοδύναμο πλάτος τάσης:

$$\sigma_{f2} = \frac{130}{\left(1 - \frac{110}{500}\right)} \Rightarrow$$

$$\sigma_{f2} = 166.67 \text{ MPa} \quad (7)$$

Μέσω της εξίσωσης (4) υπολογίζουμε τους κύκλους αστοχίας του χάλυβα:

$$N_2 = \left(\frac{650}{166.67} \right)^{\frac{1}{0.07}} \Rightarrow$$

$$N_2 = (3.899)^{14.28571} \Rightarrow$$

$$N_2 = 276813037.8 \text{ κύκλοι φόρτισης} \quad (8)$$

3° Στάδιο Καταπόνησης

Μέσω της εξίσωσης (3) υπολογίζουμε το ισοδύναμο πλάτος τάσης:

$$\sigma_{f3} = \frac{105}{\left(1 - \frac{175}{500}\right)} \Rightarrow$$

$$\sigma_{f3} = 161.54 \text{ MPa} \quad (9)$$

Μέσω της εξίσωσης (4) υπολογίζουμε τους κύκλους αστοχίας του χάλυβα:

$$N_3 = \left(\frac{650}{161.54} \right)^{\frac{1}{0.07}} \Rightarrow$$

$$N_3 = (4.024)^{14.28571} \Rightarrow$$

$$N_3 = 434478647.5 \text{ κύκλοι φόρτισης} \quad (10)$$

Επομένως, για να υπολογίσουμε και τον άγνωστο n_3 , που έχουμε στην εξίσωση (2), θα αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις (2), (3) και (4) στην (1), και με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, βλέπουμε ότι:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1 \Rightarrow \frac{n_3}{N_3} = 1 - \frac{n_1}{N_1} - \frac{n_2}{N_2} \Rightarrow$$

$$\frac{n_3}{434478647.5} = 1 - \frac{4000000}{643117969.5} - \frac{70000}{276813037.8} \Rightarrow$$

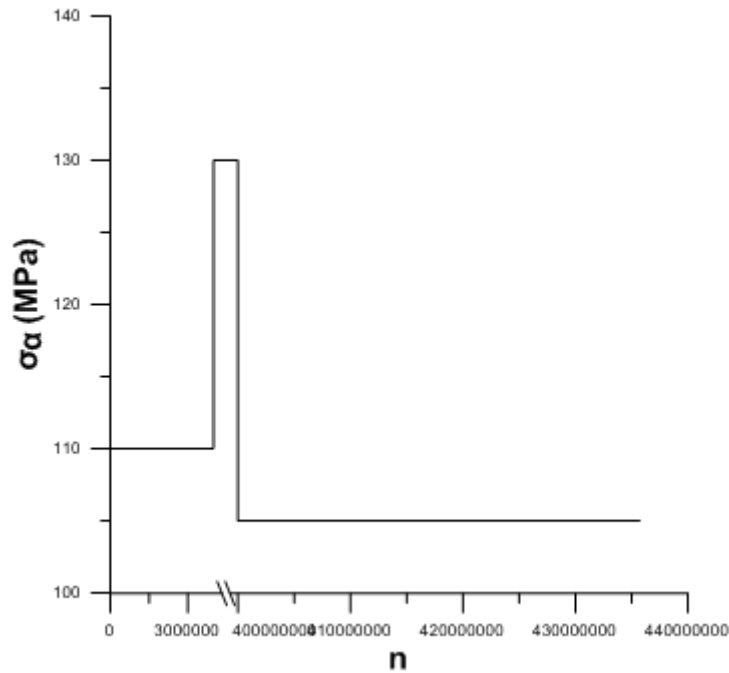
$$\frac{n_3}{434478647.5} = 1 - 0.006219 - 0.000253 \Rightarrow$$

$$n_3 = 434478647.5 * (1 - 0.006219 - 0.000253) \Rightarrow$$

$$n_3 = 434478647.5 * (0.993528) \Rightarrow$$

$$n_3 = 431666702$$

Έτσι, με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να πλέον να υπολογίσουμε την διάρκεια ζωής σε κόπωση που απομένει στο υλικό μέχρι να αστοχήσει. Στο Σχήμα 2.12 αναπαρίστανται γραφικά οι βηματικές συνθήκες καταπόνησης (μεταβλητό πλάτος) του χάλυβα AISI 4340, όπου έχουμε τα ζεύγη ($\sigma_{a1} = 110$ MPa, $n_1 = 4000000$), ($\sigma_{a2} = 10$ MPa, $n_2 = 70000$) και ($\sigma_{a3} = 110$ MPa, $n_3 = 431666702$).



Σχ. 2.12 βηματικών συνθηκών καταπόνησης χάλυβα AISI 4340

Επομένως, το δοκίμιο θα αστοχήσει μετά από $n = n_1 + n_2 + n_3 = 4000000 + 70000 + 431666702 = 435736702$ κύκλους φόρτισης.

2.11 Έναρξη και διάδοση των ρωγμών

Τα βήματα, από τα οποία χαρακτηρίζεται η έναρξη της αστοχίας λόγω κόπωσης, είναι τα εξής:

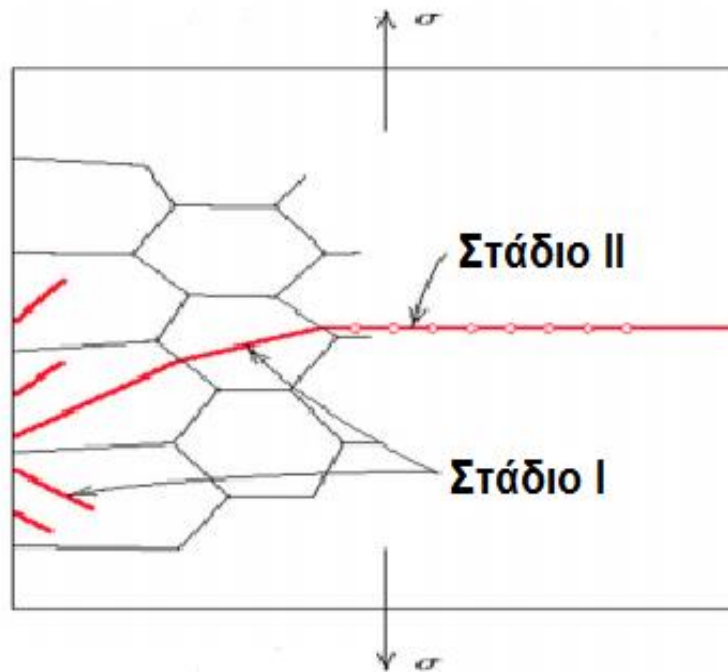
- 1) Έναρξη ρωγμής, όπου μία μικρή ρωγμή δημιουργείται σε κάποιο σημείο, όπου έχουμε μεγάλη συγκέντρωση τάσης
- 2) Διάδοση της ρωγμής, όπου η ρωγμή προχωράει αυξανόμενη με κάθε κύκλο τάσης
- 3) Τελική αστοχία, η οποία εμφανίζεται πολύ γρήγορα όταν η διαδιδόμενη ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μέγεθος.

Με αυτόν τον τρόπο, η διάρκεια ζωής σε κόπωση N , ο συνολικός αριθμός κύκλων ως την αστοχία, μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα του αριθμού των κύκλων για την έναρξη της ρωγμής N_i , και του αριθμού των κύκλων για την διάδοση της ρωγμής N_p :

$$N = N_i + N_p \quad (2.10)$$

Η συνεισφορά του τελικού σταδίου αστοχίας στην συνολική διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι ασήμαντη καθώς εμφανίζεται τόσο γρήγορα. Οι σχετικές αναλογίες των N_i και N_p ως προς την συνολική ζωή εξαρτάται από το συγκεκριμένο υλικό και τις συνθήκες δοκιμής. Σε χαμηλά επίπεδα τάσης, όπως παραδείγματος χάρη για κόπωση χαμηλού αριθμού κύκλων, ένα μεγάλο μέρος της διάρκειας ζωής σε κόπωση καταναλώνεται στην έναρξη της ρωγμής. Αν αυξήσουμε το επίπεδο της τάσης, το N_i μειώνεται και οι ρωγμές σχηματίζονται πιο γρήγορα. Έτσι, για κόπωση χαμηλού αριθμού κύκλων (υψηλά επίπεδα τάσης), το στάδιο της διάδοσης υπερισχύει (δηλαδή, $N_p > N_i$).

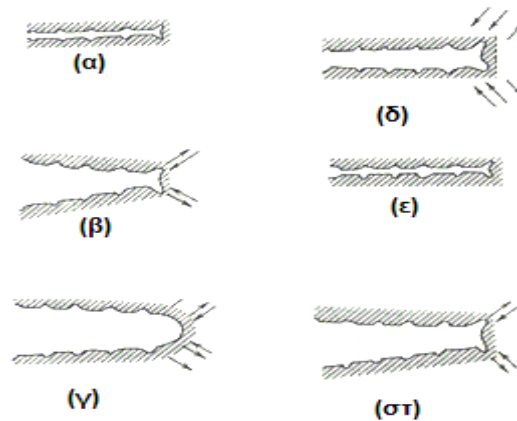
Από τη στιγμή που δημιουργηθεί μια σταθερή ρωγμή, αρχίζει η διάδοσή της με πολύ αργό ρυθμό στην αρχή, που στα πολυκρυσταλλικά μέταλλα γίνεται κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων υψηλής διατμητικής τάσης. Η διαδικασία αυτή μερικές φορές ονομάζεται και στάδιο I της διάδοσης (Σχήμα 2.13). Το στάδιο αυτό μπορεί να συνιστά ένα μεγάλο ή μικρό τμήμα της συνολικής διάρκειας ζωής σε κόπωση εξαρτώμενο από το επίπεδο της τάσης και την φύση του εξεταζόμενου δοκιμίου.



Σχ. 2.13: Αναπαράσταση σταδίων I και II της διάδοσης ρωγμών από κόπωση.

Οι υψηλές τάσεις και η παρουσία εγχοπών ευνοούν μικρής διάρκειας στάδια I. Στα πολυκρυσταλλικά μέταλλα, οι ρωγμές κατά κανόνα επεκτείνονται διαμέσου μερικών μόνο κόκκων, κατά την διάρκεια αυτού του σταδίου διάδοσης. Η επιφάνεια κόπωσης που σχηματίζεται κατά την διάρκεια του σταδίου I της διάδοσης έχει επίπεδη όψη χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

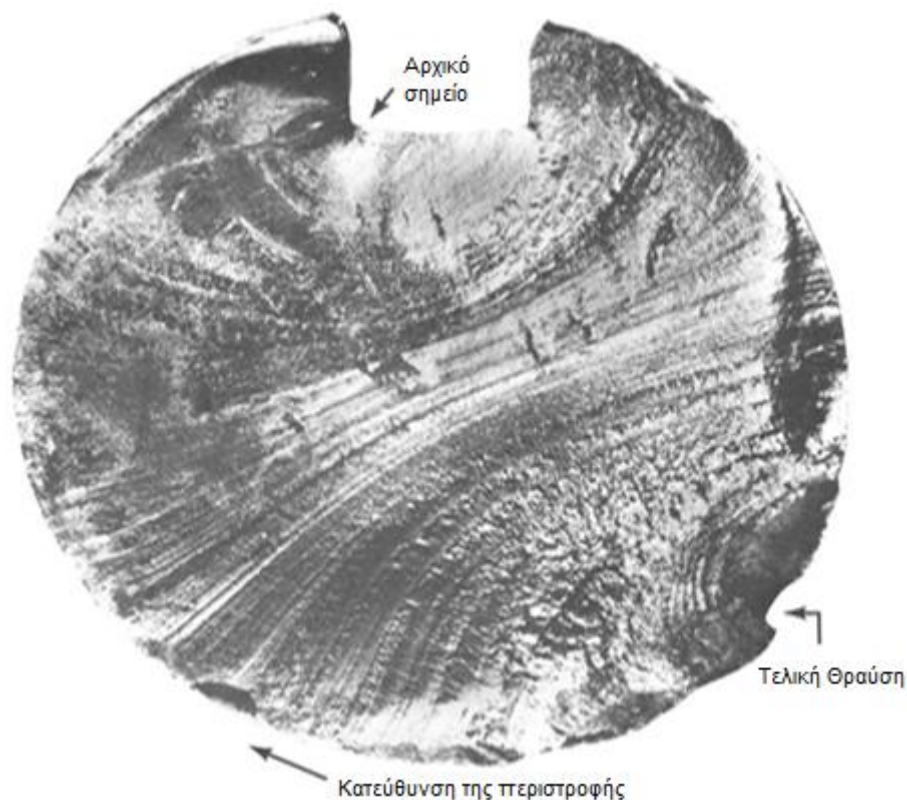
Τελικά, ένα δεύτερο στάδιο διάδοσης (στάδιο II) αναλαμβάνει δράση, στο οποίο ο ρυθμός επέκτασης της ρωγμής αυξάνει δραματικά. Επιπροσθέτως, στο σημείο αυτό υφίσταται αλλαγή στην διεύθυνση διάδοσης, σε μία νέα, σχεδόν κάθετη στην εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση. Κατά την διάρκεια αυτού του σταδίου της διάδοσης, η ανάπτυξη της ρωγμής προχωρεί με μία διαδοχικά επαναλαμβανόμενη διαδικασία πλαστικής άμβλυνσης και όξυνσης στο άκρο της ρωγμής, μηχανισμός που φαίνεται στο *Σχήμα 2.15*.



Σχ. 2.14 : Μηχανισμός διάδοσης ρωγμής από κόπωση (στάδιο II)[2]

Πιο συγκεκριμένα, στην έναρξη του κύκλου φόρτισης (μηδενικού ή μέγιστου κυκλικού φορτίου), το άκρο της ρωγμής έχει το σχήμα οξείας διπλής εγκοπής (*Σχήμα 2.14α*). Με την εφαρμογή εφελκυστικής τάσης (*Σχήμα 2.14β*), εμφανίζεται τοπική παραμόρφωση σε κάθε μία από τις εγκοπές στην άκρη, κατά μήκος επιπέδων ολίσθησης που προσανατολίζονται κατά γωνία 45° σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής. Καθώς αυξάνεται το εύρος της ρωγμής, το άκρο προωθείται με συνεχή διατμητική παραμόρφωση και με την υπόθεση μιας αμβλείας διαμόρφωσης (*Σχήμα 2.14γ*). Κατά την διάρκεια θλιπτικής καταπόνησης, οι διευθύνσεις της διατμητικής παραμορφώσεως στο άκρο της ρωγμής αντιστρέφονται (*Σχήμα 2.14δ*) έως ότου, στο αποκορύφωμα του κύκλου, σχηματισθεί ένα νέο οξύ άκρο διπλής εγκοπής (*Σχήμα 2.14ε*). Με αυτόν τον τρόπο, το άκρο της ρωγμής προωθείται, κατά τη διάρκεια της διαδρομής ενός πλήρους κύκλου κατά την απόσταση μιας εγκοπής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με κάθε επόμενο κύκλο μέχρι τελικά να επιτευχθούν κάποιες κρίσιμες διαστάσεις της ρωγμής που επιφέρουν το τελικό βήμα αστοχίας που ακολουθείται από την καταστρεπτική αστοχία.[2]

Η περιοχή της επιφάνειας θραύσης που σχηματίζεται κατά την διάρκεια του σταδίου II της διάδοσης μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο τύπους ιχνών που αποκαλούνται κυματοειδείς πτυχώσεις και μικρο-ραβδώσεις. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά γνωρίσματα υποδεικνύουν την θέση της αιχμής της ρωγμής σε κάποιο σημείο του χρόνου και εμφανίζονται ως ομόκεντρες αυλακώσεις που εκτείνονται μακριά από το σημείο σχηματισμού της ρωγμής, συχνά ακολουθώντας κυκλικό ή ημικυκλικό σχήμα. Οι κυματώσεις (μερικές φορές αποκαλούνται και “οστρακοειδείς ραβδώσεις”) έχουν μακροσκοπικές διαστάσεις (Σχήμα 2.15) και μπορούν να παρατηρηθούν δια γυμνού οφθαλμού. Στο Σχήμα 2.15, επίσης, γίνονται ορατές οι κυματοειδείς αυλακώσεις. ,



Σχ. 2.15: Επιφάνεια θραύσης περιστρεφόμενου χαλύβδινου άξονα που αστόχησε σε κόπωση.[3]

Αυτά τα σημάδια συναντιόνται σε εξαρτήματα που υφίστανται διακοπές κατά την διάρκεια του σταδίου II της διάδοσης. Για παράδειγμα, μία μηχανή που λειτουργεί μόνο κατά

την διάρκεια των ωρών κανονικής βάρδιας. Κάθε ζώνη κυματοειδών πτυχώσεων αναπαριστά μία περίοδο του χρόνου κατά τη διάρκεια της οποίας εμφανίσθηκε ανάπτυξη της ρωγμής.

Από την άλλη μεριά, οι μικρο-ραβδώσεις της κόπωσης είναι μικροσκοπικού μεγέθους και μπορούν να παρατηρηθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Κάθε μικρο-ράβδωση θεωρείται ότι αναπαριστά την απόσταση κατά την οποία αναπτύχθηκε το μέτωπο της ρωγμής κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης. Το πλάτος των μικρο-ραβδώσεων εξαρτάται και μάλιστα αυξάνει καθώς αυξάνει το εύρος της τάσης.

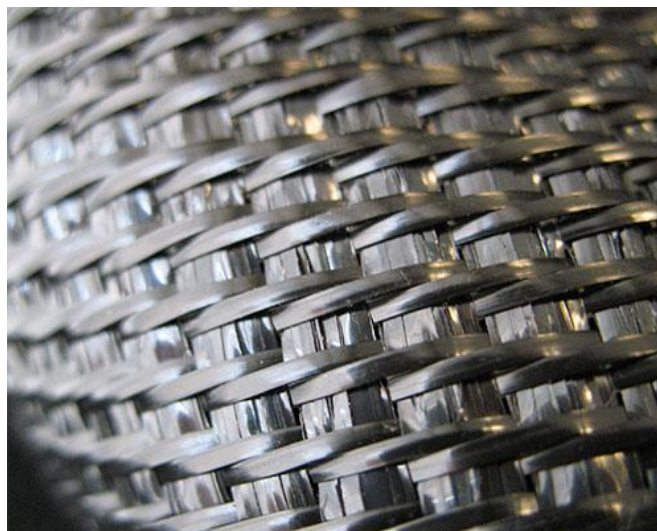
Πρέπει να σημειωθεί πως, αν και οι κυματοειδείς πτυχώσεις όσο και οι μικρο-ραβδώσεις είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα των επιφανειών θραύσης λόγω κόπωσης και έχουν παρόμοια όψη, διαφέρουν τόσο στην προέλευση όσο και στο μέγεθος. Μπορούν να υπάρχουν κυριολεκτικά χιλιάδες μικρο-ραβδώσεων σε μία κυματοειδή πτύχωση.

Πολλές φορές η αιτία της αστοχίας συνάγεται μετά την εξέταση των επιφανειών αστοχίας. Η παρουσία κυματοειδών πτυχώσεων ή και μικρο-ραβδώσεων στην επιφάνεια θραύσης επιβεβαιώνει ότι το αίτιο της αστοχίας ήταν η κόπωση. Μολαταύτα, η απουσία του ενός ή και των δύο δεν αποκλείει την κόπωση ως αιτία της αστοχίας. Κυματοειδείς πτυχώσεις και μικρο-ραβδώσεις δεν εμφανίζονται στην περιοχή στην οποία παρουσιάσθηκε γρήγορη αστοχία. Μάλιστα, η γρήγορη αστοχία μπορεί να είναι είτε όλκιμη είτε ψαθυρή. Ίχνη πλαστικής παραμόρφωσης θα είναι παρόντα στην όλκιμη και θα είναι απόντα στην ψαθυρή αστοχία.

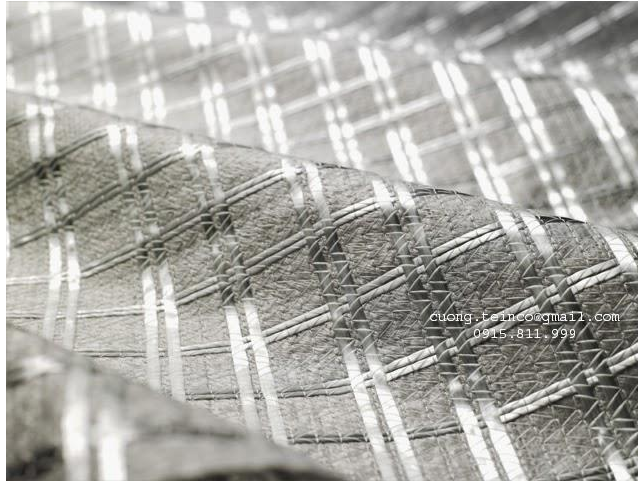
3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετο ονομάζεται ένα υλικό το οποίο αποτελείται από δυο υλικά και πάνω, αποτελείται δηλαδή πάνω από ένα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη τα οποία τα διαχωρίζει μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα σύνθετα υλικά τα οποία τα γνωρίζουμε και ως ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούν στις μέρες μας την πιο σύγχρονη τεχνική σε κατασκευές, στην ενίσχυση τους, χρησιμοποιούνται ακόμα και στην ναυσιπλοΐα αλλά και την αεροδιαστημική. Ξεχωρίζουν από τα απλά υλικά και παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες λόγω του μικρού βάρους που έχουν συνήθως, από τις πολύ υψηλές αντοχές τους σε διάφορες καταπονήσεις, την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, δεν επηρεάζονται από την διάβρωση, και ότι δεν περιορίζονται στα μεγέθη και τα σχήματα που μπορούν να πάρουν. Αυτοί είναι κάποιοι από τους λόγους όπου πλέον προτιμώνται στις διάφορες κατασκευές από τα απλά υλικά. Κατά κύριο λόγο λοιπόν τα σύνθετα υλικά είναι δομικά υλικά τα οποία όπως αναφέραμε αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά τα οποία όμως παρουσιάζουν μεγαλύτερες και καλύτερες ιδιότητες από τα υλικά όπου τα αποτελούν. Ένας γενικός ορισμός που μπορούμε να δώσουμε λοιπόν είναι:

Σύνθετο υλικό είναι το υλικό αυτό το οποίο αποτελείται από δύο ή και περισσότερα υλικά τα οποία συνδυάζονται για να πετύχουμε καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με τα υλικά που το αποτελούν.

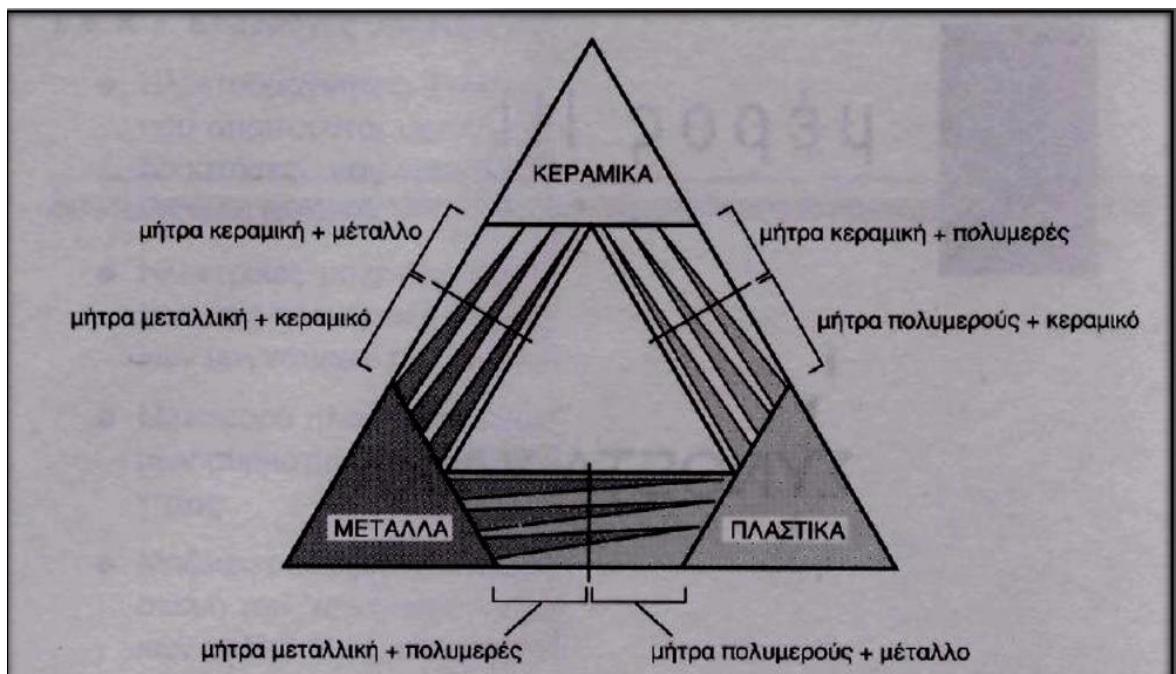


Σχ. 3.1: Σύνθετο υλικό



Σχ. 3.2: Σύνθετο υλικό

Τα επιμέρους υλικά τα οποία αποτελούν το σύνθετο υλικό όταν αναμειχθούν μεταξύ τους δεν θα διαλυθούν το ένα με το άλλο. Παρουσιάζονται συνήθως δύο στάδια για την ανάμιξη, η πρώτη είναι η φάση ενίσχυσης και η δεύτερη ονομάζεται μήτρα και η οποία παίζει σημαντικό ρόλο γιατί είναι το μέσο μεταφοράς για την ανάμιξη αυτή.



Σχ. 3.3: Ομάδες συνθέτων υλικών που αναμειγνύονται (Μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά)

Οι λόγοι για τους οποίους πλέον επιλέγονται τα σύνθετα υλικά σε όλες τις κατασκευές είναι:

- ❖ οι άριστες μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν
- ❖ μπορεί να γίνει η ανάληψη φορτίου μετά από την αστοχία
- ❖ παρουσιάζουν πολύ μικρή ευαισθησία σε εγκοπές
- ❖ πλέον έχουμε μείωση των μερών σε μια κατασκευή
- ❖ πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- ❖ πιο ανθεκτικά στην διάβρωση
- ❖ μειωμένες ταλαντώσεις σε σχέση με τα απλά υλικά
- ❖ όπως αντέχουν περισσότερο και σε μεγάλες κρούσεις
- ❖ το βάρος είναι κατά πολύ μικρότερο
- ❖ πολύ χαμηλότερο κόστος

3.1 Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Όπως αναφέραμε λοιπόν τα σύνθετα υλικά δημιουργήθηκαν για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών στα υλικά όπως είναι η δυσθραυστότητα, η αντοχή σε θερμοκρασίες υψηλές αλλά και περιβάλλοντος και η δυσκαμψία. Τα σύνθετα υλικά ανάλογα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Στρωματικά σύνθετα
2. Κοκκώδη σύνθετα
3. Ινώδη σύνθετα

Στρωματικά σύνθετα(laminated composites): Είναι τα σύνθετα με επάλληλες στρώσεις.

Κοκκώδης σύνθετα(particulate composites): Είναι τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων που είναι διασκορπισμένα στο υλικό της μήτρας.

Ινώδης σύνθετα(Fibrous composites): Είναι τα σύνθετα με ενίσχυση ινών εμποτισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα(Fibrous composites) χωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με το πως είναι κατανεμημένες οι ίνες μέσα στην μήτρα. Έτσι έχουμε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, όπου όλες οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, όπου εδώ οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Οι υποομάδες που προκύπτουν τώρα στα πολυδιευθυντικά σύνθετα είναι τα σύνθετα:

- με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση

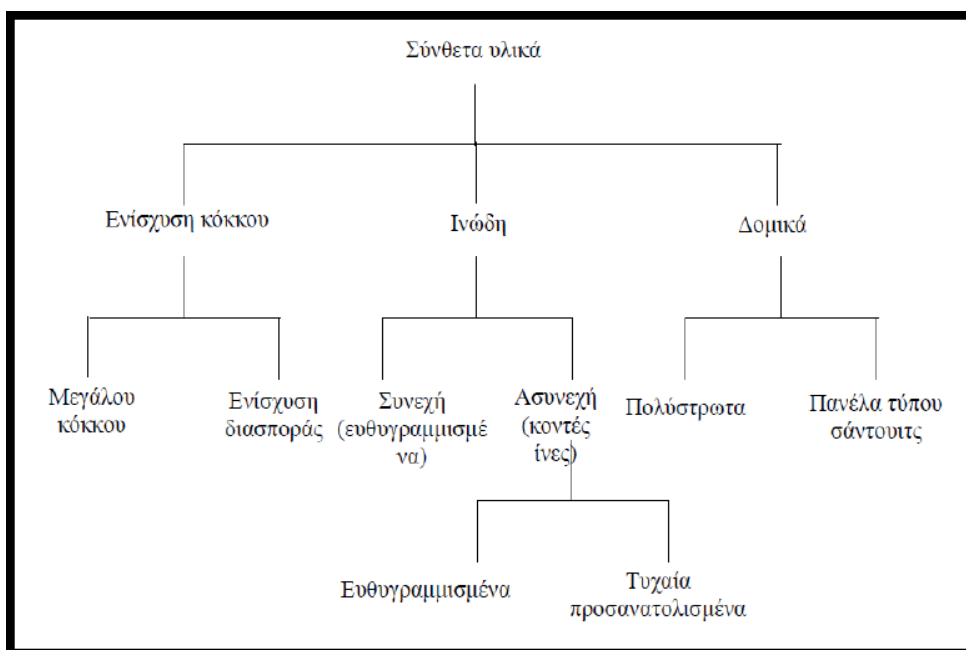
Μια τελευταία διάκριση που έχουν τα ινώδη σύνθετα βασίζεται στον λόγο μήκους προς την διάμετρο (l/d) των ινών που χαρακτηρίζονται ως συνεχής ή μεγάλου μήκους όταν ισχύει $l/d \geq 100\mu\text{m}$, ως ασυνεχής ή κοντές ίνες όταν ισχύει $l/d < 100\mu\text{m}$ και ως νηματίδια ή τριχίτες όταν $d < 1\mu\text{m}$ και $l \approx 100\mu\text{m}$.



Σχ. 3.4: Ποδήλατο από ίνες άνθρακα

Η διασπαρμένη φάση(ενίσχυσης) για τα κοκκώδη σύνθετα είναι ίδια σε όλους τους άξονες δηλαδή οι διαστάσεις που έχουν οι κόκκοι είναι περίπου ίδια σε όλες τις διευθύνσεις. Όσο για τα ινώδη σύνθετα υλικά η φάση αυτή έχει τη γεωμετρία της ίνας, δηλαδή ο λόγος ίνας-διαμέτρου είναι μεγάλος.

Π 3.1: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1, η κάθε κατηγορία έχει τουλάχιστον από δύο υποκατηγορίες.

3.2 Ίνες στα σύνθετα υλικά

Οι ίνες ενίσχυσης είναι είτε φυσικές ίνες (ζωικές, ορυκτές ή κυτταρινικές ίνες) είτε συνθετικές ίνες κατασκευασμένες από άνθρακα (γυαλί, άνθρακες ή άλλα πολυμερή όπως ίνες αραμιδίου). Από αυτές, οι ίνες γυαλιού είναι οι κυρίαρχες ίνες που χρησιμοποιούνται για μεγάλες κατασκευές χαμηλού κόστους, όπως πτερύγια ανεμογεννητριών, πλοία και δομές πολιτικού μηχανικού. Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για δομές υψηλής απόδοσης σε εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική, οι αγώνες της Formula 1 και όλο και περισσότερο στις γενικές εφαρμογές αυτόματης κίνησης. Οι ίνες αραμιδίου (π.χ., Kevlar™) χρησιμοποιούνται συχνά όπου απαιτούνται καλά χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας (π.χ. αμυντικές εφαρμογές). Μερικά παραδείγματα ιδιοτήτων γυάλινων ινών για το E-γυαλί (E-glass), το αραμίδιο και ινών άνθρακα (υψηλής αντοχής και υψηλού συντελεστή μείωσης) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Οι ίνες που υπάρχουν σε ένα σύνθετο υλικό θέλουμε να είναι <<δυνατές>> έτσι ώστε στο υλικό να πετύχουμε υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Οι φυσικές

ίνες ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχουν στην δομή τους (μοριακή και κυτταρική) έχουν ως στόχο να πετύχουν τις βέλτιστες ιδιότητες, το ίδιο ισχύει και με τις συνθετικές ίνες.

Π 3.2: Κάποια παραδείγματα από ιδιότητες ινών: παρατηρούνται αξονικές και ακτινικές ιδιότητες όπου οι ίνες είναι ανισότροπες [4]

Material	Density, ρ (kg m^{-3})	Young's modulus (tension), E (GPa)	Tensile strength, σ_{TS} (MPa)	Tensile strain to failure, ϵ_f (%)	Coefficient of thermal expansion in the axial fiber direction, α (10^{-6} K^{-1})
E-glass	2600	76	2000	2.6	4.9
Kevlar™	1450	130/10 (axial/ radial)	3000	2.3	-6
HM carbon	1950	380/12 (axial/ radial)	2400	0.6	-0.7
HS carbon	1750	230/20 (axial/ radial)	3400	1.4	-0.4

3.2.1 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα είναι οι σημαντικότερες ίνες και προτιμώνται συχνά γιατί είναι δύσκαμπτες με μεγάλη αντοχή, έχουν καλή πρόσφυση με πολυμερικά συγκολλητικά (όπως είναι η εποξικές ρητίνες) και έχουν καλή θερμική αντίσταση.



Σχ. 3.5: Ίνες άνθρακα

3.2.2 Ίνες αραμίδιο (Kevlar)

Οι ίνες kevlar έχουν μεγάλη αντοχή αλλά πολύ μικρότερη δυσκαμψία σε σχέση με τον άνθρακα και παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση στην θραύση.



Σχ. 3.6: Ίνες Kevlar

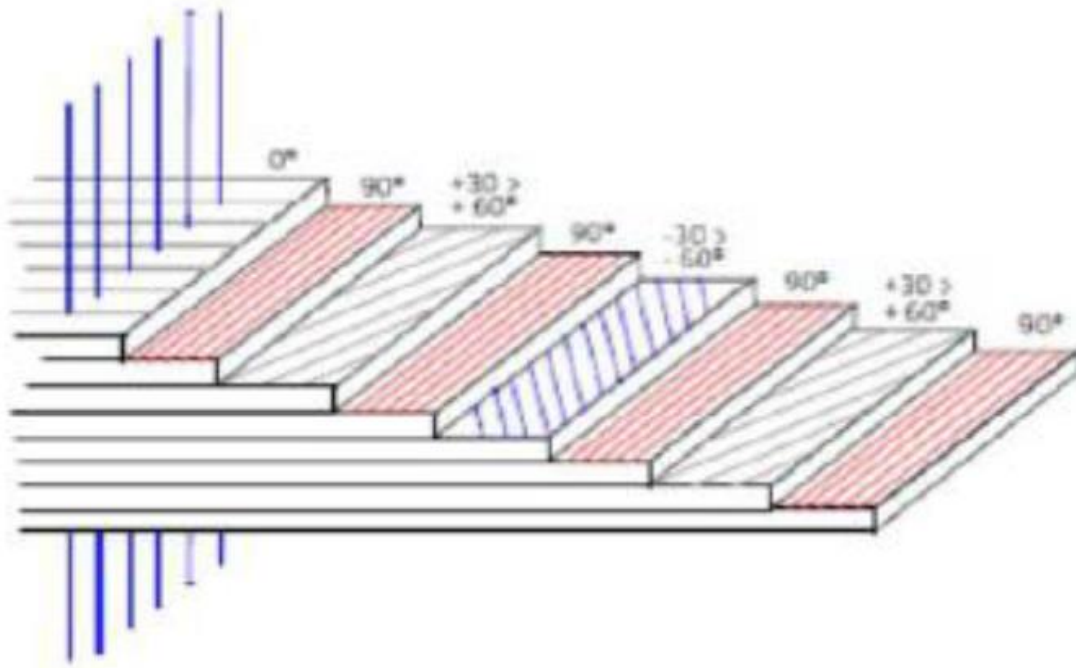
3.2.3 Ίνες γυαλιού

Όπως και οι προηγούμενες ίνες, έτσι και οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, έχουν παρόμοια δυσκαμψία με αυτή που έχει και το αλουμίνιο, και σε αυτό που διαφέρει με τις προηγούμενες ίνες είναι ότι είναι πιο φθηνές.



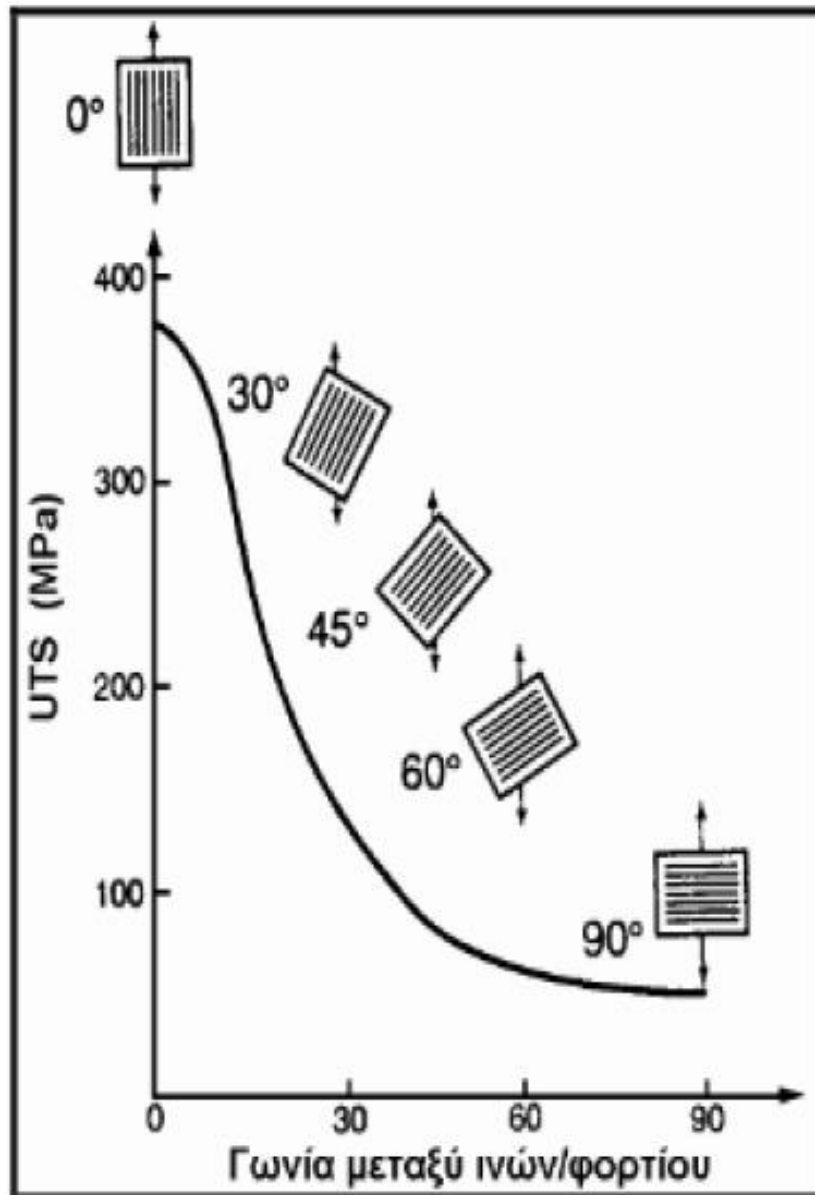
Σχ. 3.7: Ίνες Γυαλιού

3.3 Προσανατολισμός ινών



Σχ. 3.8: Επίπεδη πολυαξονική ύφανση

Οι μονοδιευθυντικές ίνες επειδή παρουσιάζουν μεγάλη ανισοτροπία και η αντοχή τους εξαρτάται από την διεύθυνση του φορτίου, χρησιμοποιούνται ίνες διάφορων προσανατολισμών για την ενίσχυση του συνθέτου υλικού.



Σχ. 3.9: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών συνθέτου υλικού στην αντοχή σε εφελκυσμό

Από το Σχήμα 3.9 προκύπτει ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα της οποίας μέτρο είναι το μέτρο ελαστικότητας E και η βέλτιστη αντοχή UTS επιτυγχάνεται εφόσον εφαρμοστεί τάση η οποία είναι πάντα παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.

3.4 Βλάβες στα σύνθετα υλικά

Η βλάβη στα σύνθετα υλικά συμβαίνει σε μια σειρά μεγάλου μήκους, από το μικροσκοπικό, σχεδόν ανιχνεύσιμο διάτρητο ινώδες πλέγμα, μέχρι τη διάσπαση της μακροσκοπικής μήτρας και τη διάσπαση της μήτρας. Στις επόμενες ενότητες της εργασίας αυτής περιγράφεται ο γενικός χαρακτήρας αυτής της καταστροφής. Τα επόμενα κεφάλαια απεικονίζουν την ανάπτυξη ζημιών των ινών και υπό τύπους φόρτωσης όπως είναι η κόπωση, με την οποία ασχολούμαστε στο κεφάλαιο αυτό και οι καταστροφικές μέθοδοι όπου γίνονται για να δοκιμαστούν τα σύνθετα υλικά και να οδηγηθούμε στην αντιμετώπιση των βλαβών αυτών.

3.5 Καταστροφικές μέθοδοι συνθέτων υλικών

Οι καταστροφικές μέθοδοι που γίνονται για τις δοκιμές(test) των συνθέτων υλικών είναι:

- I. Τεχνική διάλυση της μήτρας
- II. DSC-DMA
- III. Τεχνική διαχωρισμού
- IV. TGA
- V. Ιξωδομετρία
- VI. FTIR-Φασματοσκοπίου υπέρυθρου
- VII. Μηχανικές δοκιμές

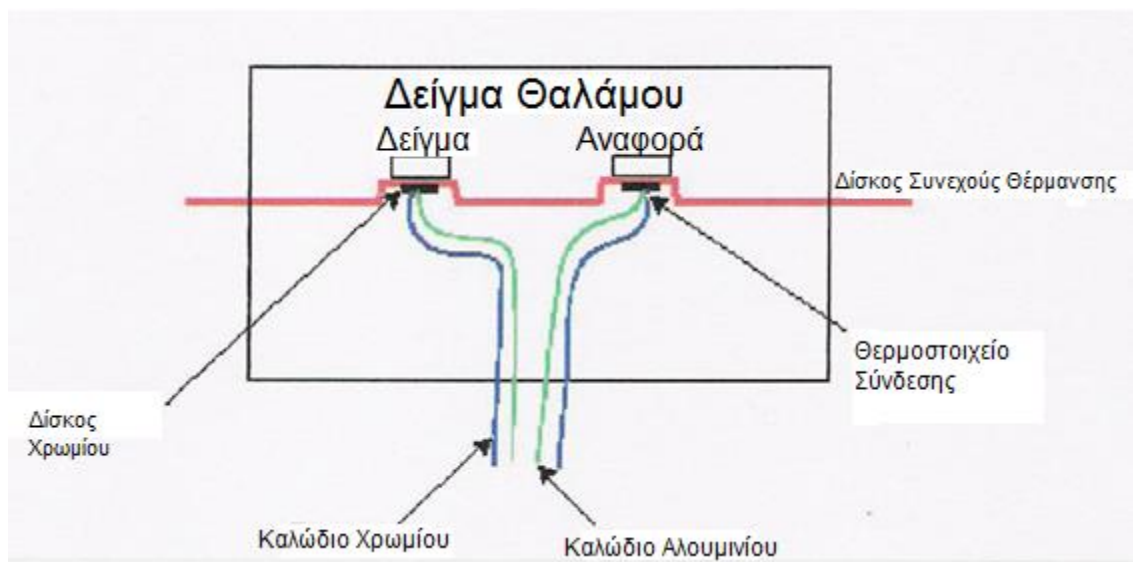
3.5.1 Τεχνική διάλυση της μήτρας

Συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του όγκου όλων των ινών και των κενών μέσα σε μήτρες οργανικές ή μεταλλικές των συνθέτων υλικών. Γίνεται, λοιπόν το ζύγισμα του δοκιμίου και έτσι προσδιορίζεται ο όγκος του από την τεχνική μετατόπιση του

ρευστού και στην συνέχεια υπολογίζεται η πυκνότητα του. Τέλος τοποθετείτε σε υγρό το οποίο διαλύει την μήτρα και αφού το μίγμα φιλτραριστεί, ότι περισσεύει στεγνώνεται, ζυγίζεται και έτσι έχουμε τον τελικό προσδιορισμό της ποσότητας των ινών.

3.5.2 DSC-DMA

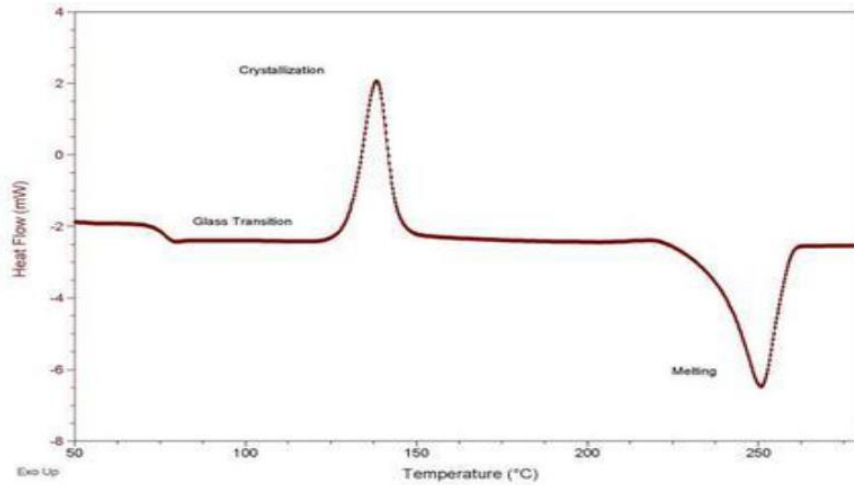
Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως ‘Τεχνική ανίχνευσης φυσικό/χημικών διεργασιών’ πολυμερικών και άλλων υλικών τα οποία συνοδεύονται με ανταλλαγή θερμότητας από το περιβάλλον. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτή βασίζεται στις μετρήσεις που δείχνουν την διαφορά της ροής της θερμότητας προς ένα δείγμα και μια ουσία-αναφοράς.



Σχ. 3.10: Απεικόνιση της μεθόδου DSC-DMA

Ο σκοπός λοιπόν αυτής της μεθόδου είναι η καταγραφή της θερμότητας που ανταλλάσσεται μεταξύ δοκιμίου και περιβάλλοντος που ορίστηκε (αναφορά) κατά την θέρμανση/ ψύξη, ανάλογα δηλαδή τι έχουμε με σταθερό (σχεδόν) αριθμό.

$$\frac{dT}{dt} = const \quad (3.1)$$



Σχ. 3.11: Ο προσδιορισμός θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης (TG), της θερμοχωρητικότητας (T_m , C_p), της ενθαλπίας τήξης (DHf) και του βαθμού κρυσταλλικότητας (X_c)

3.5.3 Τεχνική διαχωρισμού

Η τεχνική αυτή δίνει πληροφορίες για την μορφή θραύσης που παίρνουν οι ίνες και γι' αυτό χρησιμοποιείται συνήθως σε σύνθετα υλικά με οργανικές μήτρες. Αρχικά θερμαίνεται το υλικό, άρα γίνεται πυρόλυση της ρητίνης και έτσι μειώνεται η διαστρωματική αντοχή και με την βοήθεια μιας κολλώδους ουσίας παίρνουμε τις στρώσεις. Στην συνέχεια με ένα ανιχνευτικό μικροσκόπιο ανιχνεύουμε τις σπασμένες ίνες και σε μια οθόνη σκιαγραφούνται οι περιοχές του κάθε φύλλου που έχει γίνει αποκόλληση και υπάρχουν ρωγμές.

3.5.4 TGA

Η τεχνική αυτή είναι τεχνική ανίχνευσης φυσικό-χημικών διεργασιών πολυμερικών κι άλλων υλικών και αυτό γίνεται με την αλλαγή της μάζας τους. Ο σκοπός της μεθόδου αυτής

είναι η καταγραφή της αλλαγής της μάζας του δοκιμίου είτε κατά την θέρμανση με σταθερό ρυθμό ($dT/dt=const$) είτε κατά την παραμονή του σε σταθερή T του χρόνου που έχει ορισθεί.

3.5.5 Μηχανικές δοκιμές

Οι μηχανικές ιδιότητες όπου δοκιμάζονται (test) τα σύνθετα υλικά είναι:

- Εφελκυσμός
- Θλίψη
- Κρούση
- Θλίψη από την κρούση
- Δοκιμή διαστρωματικής αντοχής
- Δοκιμή δυσθραυστότητας
- Κόπωση

Εμείς στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με το φαινόμενο της κόπωσης και των δοκιμών (τεστ) που κάνουμε στα σύνθετα υλικά και τα οποία παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων και τα πειραματικά σημεία του διαγράμματος προσεγγίζονται με διάφορους κανόνες.

Η κατανόηση της βλάβης και της αστοχίας των σύνθετων υλικών είναι κρίσιμη για των αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών μηχανολογικών σχεδιασμών. Συνδυάζοντας τη μηχανική των υλικών και τη μοντελοποίηση, η εργασία αυτή αναφέρεται στις βλάβες λόγω κόπωσης και την αστοχία σύνθετων υλικών. Αναφέρονται οι βασικές αρχές που διέπουν τη σύνθετη βλάβη, για να περιγράψουν μηχανισμούς βλάβης. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφονται οι φυσικοί μηχανισμοί στους οποίους βασίζεται ο σχηματισμός και η εξέλιξη της βλάβης υπό μηχανικά φορτία με άφθονα πειραματικά δεδομένα και συνδυάζονται μοντέλα βλαβών. Τέλος, η κόπωση σύνθετων υλικών συζητείται χρησιμοποιώντας διαγράμματα κόπωσης-ζωής.

4. ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Είναι φυσικό να υποθέτουμε ότι η πολυπλοκότητα της βλάβης στα σύνθετα υλικά που παρατηρείται υπό στατική φόρτιση θα ενισχυθεί όταν η καταπόνηση εφαρμόζεται με κυκλικό τρόπο. Η εμπειρία για την κόπωση των μεταλλικών υλικών δείχνει ότι η επιφάνεια θραύσης ενός δείγματος που αστόχησε στην κόπωση παρουσιάζει σαφώς διαφορετικά χαρακτηριστικά απ' ότι εάν αστοχούσε στην εφαρμογή ενός μονοστατικού φορτίου.

Η επιφάνεια θραύσης ενός ενισχυμένου με ίνες μονής κατεύθυνσης σύνθετου υλικού που καταπονήθηκε κατά μήκος των ινών μονοστατικά ή κυκλικά δεν δίνει σαφή ένδειξη μηχανισμών που οδηγούν στην αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των σύνθετων δομών σε αστοχία και στις δύο περιπτώσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις που έχουμε οπτικές ίνες, όπως στα σύνθετα υφάσματα, είναι γενικά δύσκολο να ακολουθούνται οι μηχανισμοί που γνωρίζουμε, από την αρχή (έναρξη) της καταπόνησης στην κόπωση έως την αστοχία (διαχωρισμός με θραύση). Ωστόσο, καθώς γίνονται κατά καιρούς πειράματα και οι ανάλογες τεχνικές παρατηρήσεις, αυξανόταν η σαφήνεια των μηχανισμών. Στα πρώτα χρόνια των μελετών κόπωσης στα σύνθετα υλικά τη δεκαετία του '70, ελάχιστα ήταν αυτά που μπορούσαν να κατανοήσουν για τους μηχανισμούς της κόπωσης και κατά συνέπεια οι υποθέσεις που έγιναν στα πρότυπα πρόβλεψης ήταν στην καλύτερη περίπτωση κερδοσκοπικές.

Σε μια μελέτη ενός σύνθετου μονής κατεύθυνσης υαλοπίνακα / εποξειδικής (glass/epoxy) ρητίνης, προέκυψαν υποθέσεις μηχανισμών κόπωσης που οδήγησαν σε λογική εξήγηση των τάσεων στην κόπωση. Το πλαίσιο έλαβε τη μορφή ενός δισδιάστατου διαγράμματος που ονομάστηκε "διάγραμμα διαβίωσης από την κόπωση", όπου διαχωρίστηκαν περιοχές κυρίαρχων μηχανισμών. Το διάγραμμα αυτό είναι η καμπύλη σ - N προσαρμοσμένη σε δεδομένα (ιστορικά γνωστή ως διάγραμμα Wöhler) και χρησιμοποιείται ως μέσω ερμηνείας για την διάρκεια ζωής σε κόπωση των ινών, της μήτρας και των υπόλοιπων μερών του υλικού καθώς και των παραμέτρων διαμόρφωσης, τον προσανατολισμό και το πάχος. Δεδομένου ότι το σύνθετο υλικό μονής κατεύθυνσης των ινών (ή το φύλλο) είναι ένα υλικό που ανήκει στα πολυστρωματικά σύνθετα, το διάγραμμα ζωής της κόπωσης που προκύπτει για αυτό το σύνθετο υλικό, υπό φορτίο τάσης εφελκυσμού σχηματίζει το διάγραμμα από το οποίο εξελίσσονται γενικότερες παρατηρήσεις. Από αυτό προκύπτει μια ολοκληρωμένη αναφορά στην κατάσταση καταπόνησης και παρέχει ανώτερα και κατώτερα όρια στη συμπεριφορά σε κόπωση. Επομένως, το στέλεχος προς αστοχία (της ίνας) σχηματίζει το ανώτερο όριο, ενώ η τάση

προσαρμόζεται στο όριο κόπωσης (πρωτίστως μία ιδιότητα της μήτρας) σχηματίζει το κατώτερο όριο.

Αυτές οι τιμές παραμόρφωσης μπορούν πάντα να μετατραπούν σε εφαρμοζόμενη τάση, αλλά η σχεδιάσή τους στο διάγραμμα επιτρέπει μια συστηματική και ολοκληρωμένη ερμηνεία της διάρκειας ζωής των συστατικών του συνθέτου. Οι περιοχές που υποδεικνύονται στο διάγραμμα ζωής της κόπωσης, δείχνουν με σαφήνεια τους μηχανισμούς που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της καταπόνησης καθώς δείχνουν και τις ιδιότητες των συνθέτων. Η κατασκευή του διαγράμματος για τα μονής κατεύθυνσης σύνθετα υλικά, αρχικά βασίστηκε στις τότε γνώσεις που είχαν. Τα φυσικά στοιχεία για τη δημιουργία του διαγράμματος παρουσιάστηκαν αργότερα από μια εξειδικευμένη πειραματική μελέτη στην κόπωση, η οποία δεν θα αναλυθεί σε αυτήν την εργασία. Το διάγραμμα ζωής της κόπωσης μπορεί λοιπόν να μας δώσει, κάνοντας μοντελοποίηση, πιθανές προβλέψεις για εναπομένονσα ζωή στην κόπωση βάση των μηχανισμών αυτών. Γενικά, η πορεία προς την πρότυπη μοντελοποίηση με βάση τους υποκείμενους μηχανισμούς βλάβης απαιτεί πολύ χρόνο και πολλά πειράματα.

4.1 Αστοχία στα σύνθετα υλικά

Έχει παρατηρηθεί ότι τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν ιδιαίτερους μηχανισμούς αστοχίας, όταν σε αυτά ασκούνται στατικά και μεταβαλλόμενα φορτία. Αυτό γίνεται γιατί η αντοχή τους και η δυσκαμψία τους παρουσιάζει ανισότροπη συμπεριφορά. Η αστοχία εξαιτίας της κόπωσης εμφανίζει κυρίως εκτεταμένες βλάβες στα σύνθετα υλικά οι οποίες αυξάνονται μέσα στο υλικό (μέσα στον όγκο του) από μια απλή ρωγμή που δημιουργείται και στην συνέχεια διαδίδεται. Οι βασικοί μηχανισμοί που παρατηρεί συνήθως κάποιος είναι η αποκόλληση των στρώσεων, η θραύση των ινών και τέλος η ρηγμάτωση και η θραύση του μητρώου. Μόλις εμφανιστεί κάποιος από αυτούς τους μηχανισμούς στο υλικό, αυξάνονται οι βλάβες λόγω κόπωσης και κατά συνέπεια στην μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής του στην κόπωση. Από υλικό σε υλικό οι βλάβες αυτές διαφέρουν διότι το κάθε σύνθετο υλικό έχει διαφορετικές ιδιότητες, στρώσεις καθώς αλλάζει και το φορτίο κόπωσης που ασκείται πάνω σε κάθε υλικό. Πιο κάτω θα αναλύσουμε ξεχωριστά τους μηχανισμούς αυτούς γιατί παρατηρείται ότι στην κόπωση οι βλάβες αυτές εμφανίζονται ανάλογα από τον αριθμό κύκλων φόρτισης.

Η αστοχία, λαμβάνει χώρα πρώτα στις στρώσεις που είναι ασθενείς και στην πορεία διαδίδεται προς τις ισχυρές στρώσεις, όταν έχουμε διαστρωματώσεις ινών πολλών κατευθύνσεων υπό επίπεδη εντατική κατάσταση, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στο σύνθετο υλικό graphite/epoxy με $[0/90/\pm 45]_s$, το οποίο υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Όπως αναφέραμε, θα έχουμε διαδοχική ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών υπό γωνία πρώτα στις ασθενέστερες στρώσεις, καθώς αυξάνεται προοδευτικά το επιβαλλόμενο φορτίο στην διαστρωμάτωση. Οι ρωγμές εμφανίζονται πρώτα στις στρώσεις των 90° και έπειτα στις στρώσεις των $\pm 45^\circ$. Από αυτό το γεγονός, προκύπτει ότι οι προβλέψεις αλλά και τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πιο καλά για την περίπτωση των στρώσεων των 90° παρά για την περίπτωση των στρώσεων των $\pm 45^\circ$, αφού οι ρωγμές πρωτοεμφανίστηκαν στις στρώσεις των 90° . Γενικά, το πλήθος των ρωγμών υπό φορτία κόπωσης σε κάθε στρώση υπό γωνία, είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο υπό στατικά φορτία και έχει μια οριακή τιμή.

4.2 Αποκόλληση στρώσεων

Η διάσπαση μεταξύ των στρωμάτων, δηλαδή η διάσπαση στο ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ δύο παρακείμενων στρώσεων σε ένα ελασματοειδές, προκαλεί διαχωρισμό των στρώσεων και αναφέρεται ως αποκόλληση. Σε σύνθετα ελασματοποιημένα φύλλα, η αποκόλληση μπορεί να λάβει χώρα σε κομμένα (ελεύθερα) άκρα, όπως σε οπές, ή σε εκτεθειμένη επιφάνεια μέσω του πάχους. Όταν δέχεται φορτίσεις στο επίπεδο, το έλασμα αναπτύσσει κανονικές διατομές και διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια χωρίς έλξη που εκτείνεται σε μικρή απόσταση στο επίπεδο του ελασματοποιημένου φύλλου. Αυτές οι καταπονήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε τοπική ρωγμή στα επίπεδα που υπάρχουν ανάμεσα. Οι αποελασματοποιήσεις μπορούν επίσης να σχηματιστούν ως αποτέλεσμα της μικρής ταχύτητας πρόσκρουσης.

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, στα σύνθετα ελασματοποιημένα πολυμερή μπορεί να εμφανιστεί αποκόλληση κάτω από την επιφάνεια μιας δομής υπό μια σχετικά ελαφριά κρούση, όπως αυτή από ένα πτώση εργαλείου, ενώ η επιφάνεια εμφανίζεται άθικτη στον οπτικό έλεγχο. Η ανάπτυξη των ρωγμών αποκόλλησης κάτω από την επακόλουθη εφαρμογή εξωτερικών φορτίων οδηγεί σε ταχεία επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων και μπορεί να προκαλέσει καταστροφική βλάβη της σύνθετης δομής. Μία άλλη πηγή αποελασματοποίησης είναι η τοπική ενδοελασματική ρωγμή που προκαλείται από ρωγμές ρευστού. Αυτή η αποκόλληση μπορεί να

αναπτυχθεί και να διαχωριστεί η περιοχή μεταξύ δύο παρακείμενων ρωγμών μήτρας ελασμάτων. Η αποκόλληση μπορεί να είναι ένα σημαντικό πρόβλημα στο σχεδιασμό σύνθετων δομών, καθώς μπορεί να μειώσει το ρόλο των ισχυρών ινών και να καταστήσει τις ιδιότητες της ασθενέστερης μήτρας να διέπουν τη δομική αντοχή. Κατά την έναρξη της αποκόλλησης, η κρίσιμη ιδιότητα του υλικού είναι η ενδοελασματική αντοχή, η οποία καθορίζεται από τη μήτρα. Μόλις σχηματιστούν οι διασωματικές ρωγμές, η ανάπτυξή τους καθορίζεται από την ανθεκτικότητα μεταξύ των στρώσεων, η οποία επίσης διέπεται από τη μήτρα. Αν η αποκόλληση θεωρείται ως αποκόλληση της συνεκτικής ζώνης μεταξύ των διαχωριστικών πτυχών, τότε τόσο η αντοχή της μήτρας όσο και η σκληρότητα του θραύσματος δρουν ως παράμετροι υλικού. Ως προσέγγιση σχεδίασης, η αποκόλληση μπορεί να μειωθεί είτε με τη βελτίωση της ενδοελασματικής αντοχής και της αντοχής σε θραύση, είτε με την τροποποίηση της αρχιτεκτονικής των ινών ώστε να μειωθούν οι κινητήριες δυνάμεις για την αποκόλληση.

Το φαινόμενο της αποκόλλησης παρατηρήθηκε στις αρχές του 1970, όπου από τότε γίνονται συνεχώς έρευνες για να κατανοηθεί πλήρως. Στο συμπέρασμα όπου έχουν καταλήξει είναι πως η αποκόλληση των στρώσεων παρουσιάζεται εξαιτίας των υψηλών τάσεων που συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του υλικού κοντά σε κάποιο ελεύθερο άκρο κάποιας διαστρωμάτωσης υπό επίπεδη εντατική καταπόνηση. Το είδος των τάσεων αυτών εκφράζεται μέσα από αναλυτικά μοντέλα. Η κατανομή και το μέγεθος των συνιστωσών των διεπιφανειακών τάσεων μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος, το οποίο εξαρτάται από το είδος της διαστρωμάτωσης, από τον κώδικα αλληλουχίας, εφόσον μιλάμε για σύνθετα υλικά, εξαρτάται και από τις ιδιότητες και των δύο επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται καθώς και από το είδος της ίδιας της φόρτισης που επιβάλλεται.

Χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα για το φαινόμενο αυτό μπορούμε να διευκρινίσουμε ακριβώς την σημασία του. Εάν έχουμε ένα σύνθετο υλικό το οποίο έχει διαστρωμάτωση $[30/90]_s$ παρουσιάζει λιγότερες διεπιφανειακές τάσεις από ένα υλικό με διαστρωμάτωση $[\pm 45/90]_s$. Αυτό σημαίνει ότι στο υλικό με διαστρωμάτωση $[\pm 45/90]_s$ θα παρατηρήσουμε αυξημένη αποκόλληση στρώσεων όταν αυτό είναι υπό εφελκυστική τάση σε αντίθεση με το υλικό το οποίο έχει διαστρωμάτωση $[30/90]_s$ στο οποίο δεν θα παρατηρήσουμε σχεδόν καθόλου να γίνεται αποκόλληση των στρώσεων. Ο κώδικας αλληλουχίας που αναφέρθηκε πιο πάνω μας δείχνει αν οι τάσεις αυτές θα είναι θλιπτικές ή εφελκυστικές στο ελεύθερο άκρο. Έτσι για παράδειγμα ένα υλικό με μια διαστρωμάτωση με κώδικες $[0/90/\pm 30]_s$ και $[0/\pm 30/90]_s$ θα μας δείξει ότι η πρώτη έχει αναπτύξει θλιπτικές τάσεις σε αντίθεση με την πρώτη που έχει αναπτύξει εφελκυστικές τάσεις. Άρα το πρώτο δοκίμιο θα παρουσιάσει εκτεταμένη

αποκόλληση στρώσεων όταν αυτό καταπονηθεί σε θλίψη αλλά δεν θα παρουσιάσει καθόλου αποκόλληση στρώσεων όταν υποβληθεί σε εφελκυσμό διότι οι διεπιφανειακές τάσεις του είναι εφελκυστικές. Για τον ίδιο λόγο ακριβώς το ίδιο θα συμβεί και στο δεύτερο δοκίμιο αλλά υπό εφελκυστικό φορτίο αυτή την φορά θα παρουσιαστεί αποκόλληση στρώσεων αλλά καθόλου υπό θλιπτικό φορτίο.

4.2.1 Ρηγμάτωση της μήτρας

Όταν ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από πολλές διαστρωματώσεις ινών διαφόρων κατευθύνσεων, η αστοχία λόγω κόπωσης θα συμβεί πρώτα στις ασθενείς στρώσεις και στην συνέχεια θα διαδοθεί προς τις ισχυρές. Έτσι αν χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα ενός συνθέτου όπως πριν με κώδικα $[0/90/\pm 30]_s$ που υποβάλλεται σε εφελκυσμό, αυτό που θα περιμέναμε θα ήταν μια διαδοχική ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών από τις ασθενείς στρώσεις καθώς αυξάνει το φορτίο. Οι πρώτες ρωγμές λοιπόν θα εμφανιστούν στις στρώσεις των 90° και στην συνέχεια στις άλλες στρώσεις των $\pm 30^\circ$. Μέσα όμως από πειράματα θα δούμε ότι μόνο για τις στρώσεις των 90° οι προβλέψεις μας είναι καλές και όχι για τις άλλες στρώσεις. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των ρωγμών που έχουν ήδη εμφανιστεί στις 90° .

4.2.2 Θραύση ινών και μήτρας

Τέλος οι μηχανισμοί θραύσης των ινών και θραύσης του μητρώου είναι διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας και εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές ατέλειες των ινών καθώς και από τις ιδιότητες των υλικών από όπου αποτελείται το σύνθετο υλικό. Αυτό που ισχύει συνήθως είναι πως η αντοχή στη θραύση μητρώων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των ινών, γι' αυτό συνήθως στα σύνθετα υλικά παρατηρείτε το σπάσιμο των ινών πρώτα και μετά των μητρώων λόγω ατελειών ή πιθανών ρωγμών που μπορεί να έχουν οι ίνες. Έτσι όταν δημιουργηθεί ρωγμή εξαιτίας της θραύσης των ινών, έχει παρατηρηθεί πως τείνει να επεκταθεί στο μητρώο από τον επόμενο κιάλας κύκλο φόρτισης. Στην αύξηση αυτή εξαρτάται το υλικό του μητρώου και η ίδια η συνάφεια που παρουσιάζουν μεταξύ τους ίνες-μητρώο. Άρα αν υπάρχει μια δυνατή συνάφεια μεταξύ τους τότε η ρωγμή διαδίδεται ανοίγοντας μια νέα επιφάνεια αύξησης, αλλιώς σε μη ισχυρή συνάφεια η ίδια η ρωγμή μπορεί να προκαλέσει εξόλκευση. Οι μηχανισμοί αυτοί

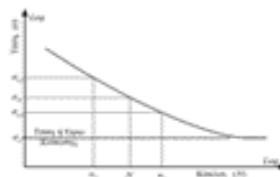
εκτός από φορτία κόπωσης ισχύουν το ίδιο και για στατικά φορτία. Να σημειωθεί όμως ότι στα φορτία κόπωσης εξαρτάται και η ευαισθησία σε κόπωση που παρουσιάζει το σύνθετο υλικό στις ίνες, στο μητρώο καθώς και στην ίδια την συνάφεια ίνας-μητρώου.

4.3 Μείωση αντοχής και δυσκαμψίας των συνθέτων υλικών

Συχνά οι βλάβες που προκαλούνται λόγω κόπωσης στα σύνθετα υλικά είναι η σημαντική μείωση της αντοχής τους και την μείωση της δυσκαμψίας τους. Η επιρροή των βλαβών αυτών για αυτές τις μειώσεις εξαρτάται από το φορτίο που ασκείτε, από την διαστρωμάτωση και από άλλους τέτοιους παράγοντες. Για παράδειγμα μια διαστρωμάτωση με διάφορες γωνίες προσανατολισμού ινών παρουσιάζει σταδιακή μείωση σε αντίθεση με μια διαστρωμάτωση που δεν έχει γωνίες προσανατολισμού, η οποία μέχρι την αστοχία δεν εμφανίζει καμία μείωση αντοχής όταν αυτά υποβληθούν σε κόπωση. Γενικά λοιπόν φαίνεται πως η μείωση της αντοχής φαίνεται να είναι ανάλογη με τον βαθμό της βλάβης που μαζεύεται κατά την διάρκεια της φόρτισης σε κόπωση, η μέγιστη μείωση δηλαδή της αντοχής συμβαίνει για διακύμανση τάσεων στην πλευρά του εφελκυσμού. Μια επίσης σημαντική μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας E παρουσιάζεται στα δοκίμια που υποβάλλονται σε κόπωση, για διακύμανση τάσεων στην πλευρά του εφελκυσμού και για διακύμανση τάσεων με αντίθετα όμως πρόσημα ενώ γενικά καμία μεταβολή δεν παρατηρείτε σε άλλα φορτία όπως τα φορτία θλίψης.

4.4 Ανάλυση της κόπωσης στα σύνθετα υλικά

Η κόπωση στα σύνθετα υλικά, βλέπουμε να παρουσιάζεται με κύρια μορφή της σχέσης τάση-διάρκεια ζωής (σ - N καμπύλες) και πιο κάτω θα αναλυθούν μερικοί από τους κύριους παράγοντες όπου επηρεάζουν την σχέση αυτή.



Σχ. 4.1: Διάγραμμα σ - N

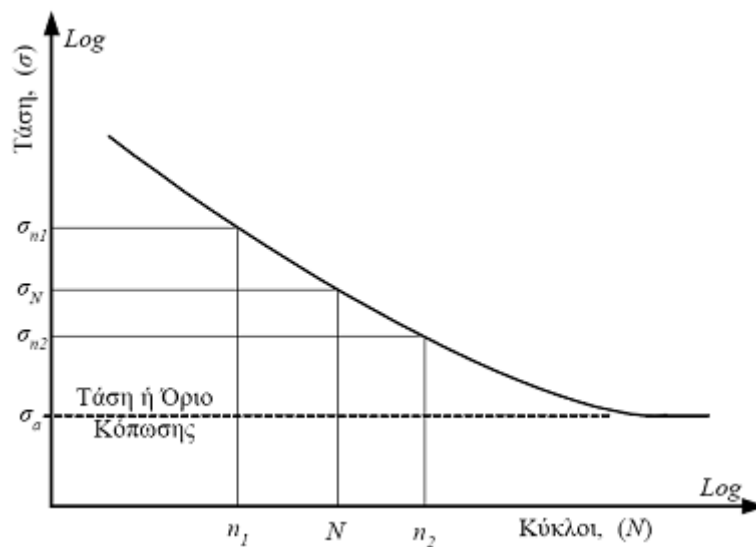
Τα πρώτα συστηματικά πειράματα κόπωσης τα πραγματοποίησε ο **Wöhler**, ο οποίος εισήγαγε το **διάγραμμα Τάσης-Κύκλων ($\sigma-N$)**, και το «**Όριο Κόπωσης**». Για τη συμβολή του αυτή θεωρείται σήμερα ο πατέρας των συστηματικών δοκιμών κόπωσης. [5]

Ο Wöhler, διατύπωσε τη σχέση:

$$\sigma_n = \sigma_N * \left(\frac{N}{n}\right)^k \quad (4.1)$$

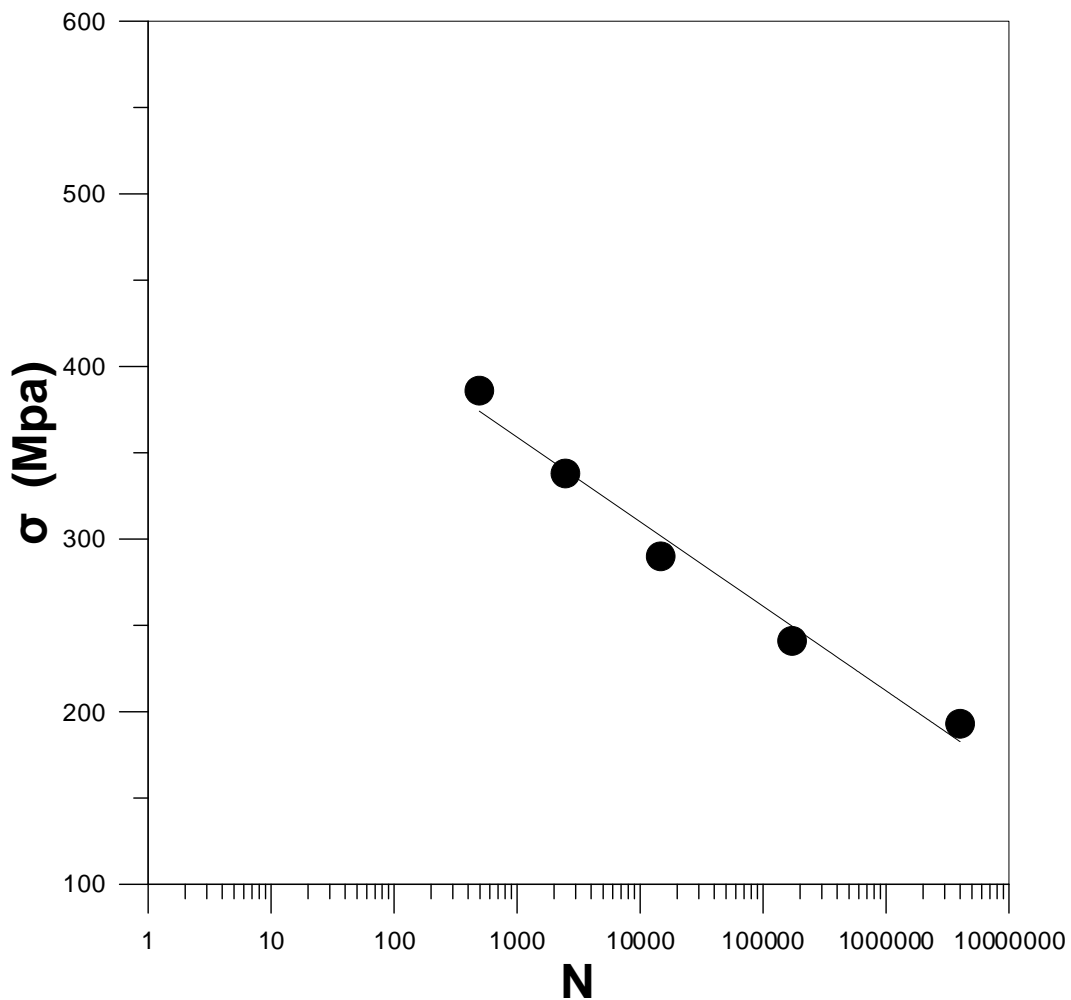
όπου, σ_n είναι η αντοχή κόπωσης για αστοχία στους n κύκλους σ_N είναι η τάση (φόρτιση) που προκαλεί αστοχία στους N κύκλους, και, k είναι η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα $\sigma-N$ [5]

Το διάγραμμα $\sigma-N$ σχεδιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα (log-log). Το σημείο όπου η καμπύλη γίνεται πρακτικά οριζόντια λέγεται **τάση ή όριο κόπωσης** (ή και δυναμική αντοχή) και είναι η ανώτατη φόρτιση που μπορεί να δεχτεί ένα στοιχείο χωρίς να αστοχήσει, ακόμα και για άπειρο αριθμό επαναλήψεων.



Σχ. 4.2 : Διάγραμμα $\sigma-N$ (τάσης-κύκλων κόπωσης).

Η σχέση σ - N κυρίως εξαρτάται από τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών που έχει το σύνθετο. Οι περισσότερες ίνες πλέον δεν είναι ευαίσθητες όταν δέχονται φορτία σε κόπωση, άρα και τα σύνθετα υλικά με αυτές τις ίνες παρουσιάζουν καλή αντοχή σε κόπωση. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται μια καμπύλη σ - N από σύνθετο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα της εργασίας αυτής. Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στον λόγο αντοχής σε κόπωση προς την αντοχή σε στατικά φορτία.[5]



Σχ. 4.3: Καμπύλη σ - N (Wöhler) για σύνθετο υλικό Glass/epoxy

Όπως είδαμε και στο παράδειγμα στα μεταλλικά υλικά, έτσι και στα σύνθετα υλικά ισχύει πως η διαφορά του μεταβλητού με το σταθερό πλάτος κόπωσης, είναι ότι στο μεταβλητό πλάτος επιδρούν τάσεις με διαφορετικές τιμές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, λόγω των μεταβαλλόμενων φορτίων που ασκούνται στο δοκίμιο που εξετάζεται, να δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση. Έτσι, το δοκίμιο αυτό, θα έχει μικρότερη διάρκεια ζωής σε κόπωση, από ότι αν επιβάλλονταν σε αυτό τάσεις με σταθερή τιμή.

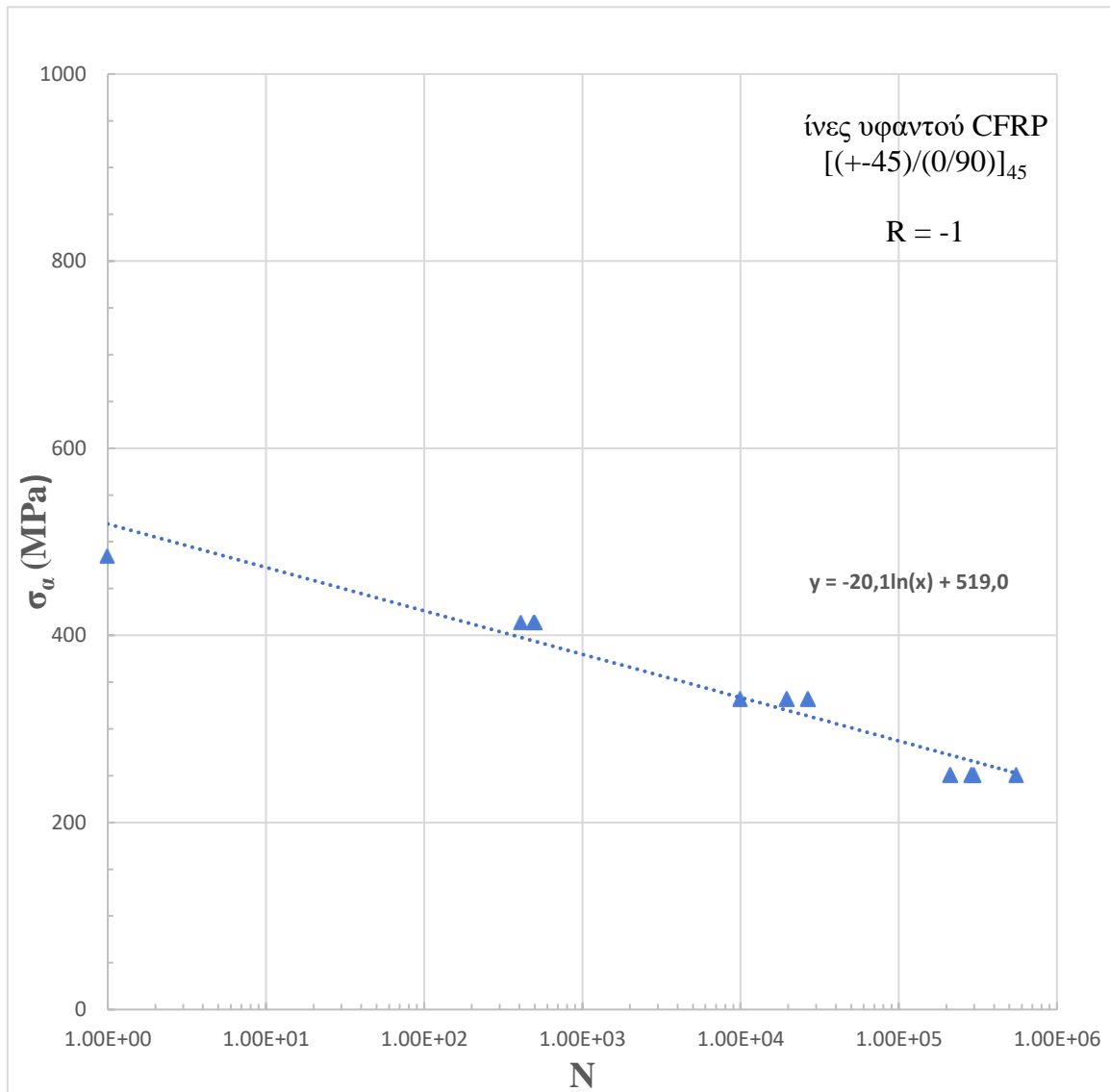
Το παράδειγμα που ακολουθεί, αρκεί για να αντιληφθεί κάποιος την λειτουργία της κόπωσης με μεταβλητό πλάτος. Έχουμε τα εξής δεδομένα για τις ίνες υφαντού CFRP $[[+45)/(0/90)]_{45}$:

Π 4.1: Τάσεις (σ) - κύκλοι φόρτισης(N) για τις ίνες υφαντού CFRP

A/A	σ (Mpa)	N
1.	485	1
2.	414	410
3.	414	496
4.	414	504
5.	332	10000
6.	332	19756
7.	332	26809
8.	251	213352
9.	251	289987
10.	251	300136
11.	251	555420

Εισάγοντας τα δεδομένα του Πίνακα 4.1 , προκύπτει:

Σχ. 4.4: σ -N ινών υφαντού CFRP



Από το Σχήμα 4.4, προκύπτει ότι η εξίσωση που χαρακτηρίζει την κλίση της ευθείας, είναι της μορφής:

$$y = -20.1 * \ln x + 519 \quad (1)$$

όπου $y = \sigma_a$ και $x = N_i$

Επιλέγουμε τρεις τυχαίες τάσεις, οι οποίες να είναι εντός των ορίων του σ_a . Επομένως, έχουμε $\sigma_1=292$ MPa, $\sigma_2 = 374$ MPa, $\sigma_3=436$ MPa.

- Για $\sigma_1 = 292$ MPa, το N_1 μέσω της εξίσωσης (1) θα είναι ίσο με:

$$292 = -20.1 * \ln x + 519 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 519 - 292 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 227 \Rightarrow$$

$$\ln x = \frac{227}{20.1} \Rightarrow$$

$$\ln x = 11.29 \Rightarrow$$

$$x = e^{11.29} \Rightarrow$$

$$x = 80017$$

Άρα, $N_1 = 80017$

- Για $\sigma_2 = 350$ MPa, το N_2 μέσω της εξίσωσης (1) θα είναι ίσο με:

$$350 = -20.1 * \ln x + 519 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 519 - 350 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 169 \Rightarrow$$

$$\ln x = \frac{169}{20.1} \Rightarrow$$

$$\ln x = 8.41 \Rightarrow$$

$$x = e^{8.41} \Rightarrow$$

$$x = 4492$$

Άρα, $N_2 = 4492$

- Για $\sigma_2 = 418$ MPa, το N_2 μέσω της εξίσωσης (1) θα είναι ίσο με:

$$418 = -20.1 * \ln x + 519 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 519 - 418 \Rightarrow$$

$$20.1 * \ln x = 101 \Rightarrow$$

$$\ln x = \frac{101}{20.1} \Rightarrow$$

$$\ln x = 5.03 \Rightarrow$$

$$x = e^{5.03} \Rightarrow$$

$$x = 153$$

Άρα, $N_3 = 153$

Συνοψίζοντας έχουμε τα εξής ζευγάρια τάσεων – αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι την κόπωση, όπου θα τα χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να υπολογίσουμε το μεταβλητό πλάτος κόπωσης.

$$\sigma_1 = 292 - N_1 = 80017$$

$$\sigma_2 = 350 - N_2 = 4492$$

$$\sigma_3 = 418 - N_3 = 153$$

Υποβάλλουμε ένα δοκίμιο από ίνες υφαντού CFRP σε $n_1 = 30000$ κύκλους φόρτισης και $n_2 = 500$ κύκλους φόρτισης. Αυτό που αναζητούμε, είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης n_3 που απαιτείται για να αστογήσει το υλικό.

Αφού, ισχύει ο γραμμικός κανόνας του Miner εξίσωση (2), στην συγκεκριμένη περίπτωση και για τα τρία στάδια καταπόνησης έχουμε ότι:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1 \quad (2) \Rightarrow$$

$$\frac{30000}{80017} + \frac{500}{4492} + \frac{n_3}{153} = 1 \Rightarrow$$

$$\frac{n_3}{153} = 1 - \frac{30000}{80017} - \frac{500}{4492} \Rightarrow$$

$$\frac{n_3}{153} = 1 - 0.375 - 0.111 \Rightarrow$$

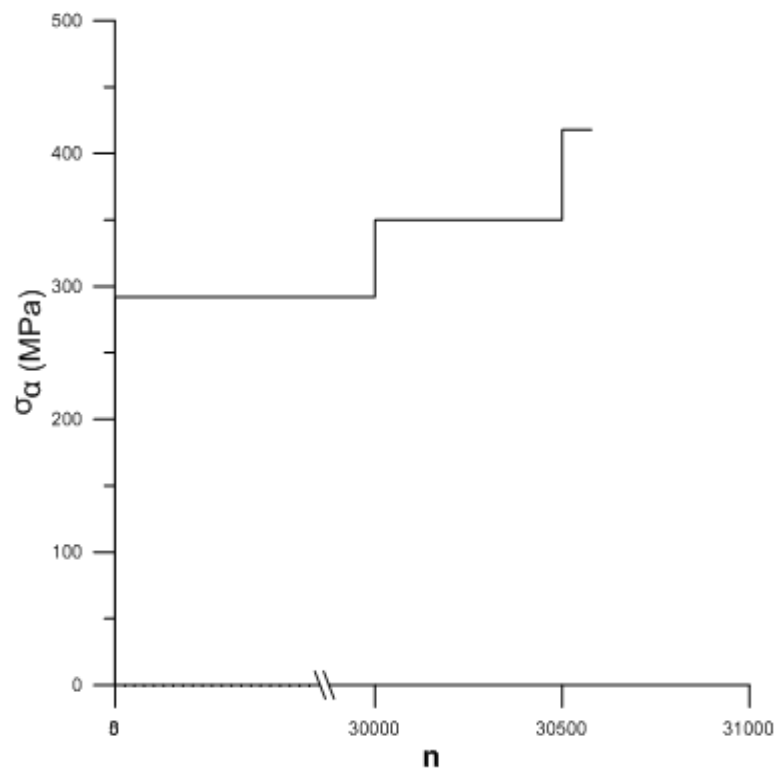
$$\frac{n_3}{153} = 0.514 \Rightarrow$$

$$n_3 = 0.514 * 153 \Rightarrow$$

$$n_3 = 78.7$$

Έτσι, με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να πλέον να υπολογίσουμε την διάρκεια ζωής σε κόπωση που απομένει στο υλικό μέχρι να αστοχήσει. Στον Πίνακα 4.1 αναπαρίστανται γραφικά οι βηματικές συνθήκες καταπόνησης (μεταβλητό πλάτος) των ινών υφαντού CFRP [(+/- 45)/(0/90)]₄₅.

Σχ. 4.5 βηματικών συνθηκών καταπόνησης υφαντού CFRP



Επομένως, με βάση της καμπύλης Wohler του υλικού και τους υπολογισμούς, το δοκίμιο θα αστοχήσει μετά από $n = n_1 + n_2 + n_3 = 30000 + 500 + 78.7 = 30578.7$ κύκλους φόρτισης.

4.4.1 Διακύμανση τάσεων και μέση τάση

Στην κόπωση, όταν λέμε κόπωση τάσης εννοούμε μια κυκλική τάση στην οποία επαλληλίζεται μια μέση τάση σ_m . Σε αυτήν την κατάσταση η αντοχή σε κόπωση συμβολίζεται με το σ_a , το οποίο πάντα αντιστοιχεί σε τιμές της μέσης τάσης. Οι εξισώσεις τους έχουν αναφερθεί πιο πάνω.

Στις καμπύλες σ - N οι οποίες είναι γνωστές και ως καμπύλες Wohler, στην κόπωση η συμπεριφορά που παρουσιάζουν είναι ανεξάρτητη από το είδος φόρτισης στην κόπωση δηλαδή αν έχουμε θλίψη με θλίψη ή εφελκυσμό με εφελκυσμό και αυτό γίνεται γιατί η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή είναι ίσες σε απόλυτη τιμή.

Όταν στην κόπωση εξετάζεται η διακύμανση των τάσεων της και τα πρόσημα να είναι αντίθετα (θλίψη-εφελκυσμός) τότε η αστοχία που θα εμφανιστεί στην περιοχή του εφελκυσμού θα παρουσιάσει πιο σημαντικές βλάβες στο μητρώο σε σχέση με τις βλάβες που θα εμφανιστούν στην περιοχή της θλίψης.

4.4.2 Επίδραση οπών

Όταν λόγω κόπωσης σε ένα σύνθετο υλικό όπως και σε κάποιο μέταλλο συγκεντρωθούν τάσεις δημιουργούνται οπές, κυρίως στα σύνθετα υλικά επειδή υπάρχουν πολύ παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά τους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Όταν πλέον έχουμε υλικά/δοκίμια με οπές δημιουργούνται συνδυασμένες τάσεις στο σημείο της οπής, οι οποίες έχουν μεγάλο εύρος διακύμανσης. Έτσι κατά την διάρκεια της ζωής κόπωσης παρουσιάζονται βλάβες στο υλικό γίνεται ανακατανομή των τάσεων και μεταβολή του εύρους στο σημείο που δημιουργείται η οπή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε πλέον την αντοχή του υλικού σε κόπωση όταν το δοκίμιο έχει οπές σε αντίθεση με τα δοκίμια που δεν έχουν οπές

όπου εκεί λόγο πειραμάτων και αναφορών που έχουν γίνει κατά καιρούς γνωρίζουμε τι αντοχές θα παρουσιάσει.

Τα πειραματικά δεδομένα βέβαια για την αντοχή σε κόπωση μας έχουν δείξει ότι στις περισσότερες διαστρωματώσεις από σύνθετα υλικά, η μείωση της αντοχής σε κόπωση είναι σχεδόν αμελητέα. Επομένως και οι καμπύλες σ-N για αυτά τα δοκίμια με εγκοπές ταυτίζονται σχεδόν με τα δοκίμια όπου δεν έχουν εγκοπές για τη διάρκεια ζωής τους σε κόπωση.

Όταν ένα σύνθετο υλικό/δοκίμιο με εγκοπές παρουσιάσει, σε κάποιες περιπτώσεις, πάρα πολύ καλή αντοχή σε κόπωση τότε έχουν βοηθήσει οι βλάβες που προκαλούνται γιατί οι ανακατανομές των τάσεων που δημιουργούνται εκεί στις οπές αντιμετωπίζουν απαλώνοντας έτσι τις τάσεις που συγκεντρώνονται στις οπές και τις ρωγμές.

4.4.3 Επίδραση συχνότητας

Ακόμα κάτι που μας απασχολεί στην κόπωση στα σύνθετα υλικά είναι η επίδραση της συχνότητας δοκιμής στην διάρκεια ζωής σε κόπωση. Η επίδραση συχνότητας κυμαίνεται ανάμεσα από 1Hz μέχρι και 30Hz στην διάρκεια ζωής κόπωσης, όμως συνήθως στα σύνθετα υλικά με διαστρωματώσεις, που έχουν έναν αριθμό στρώσεων η επίδραση της συχνότητας είναι σχεδόν αμελητέα. Για να επηρεάζει η συχνότητα θα πρέπει οι διαστρωματώσεις του υλικού μητρώου να είναι πιο ευαίσθητες στις μεταβολές θερμοκρασίας και στον ρυθμό επιβολής φορτίου.

4.4.4 Περιβαλλοντικές επιδράσεις

Αυτό, που έχει μελετηθεί στην κόπωση των συνθέτων είναι οι περιβαλλοντικές επιδράσεις. Ανάμεσα στις διάφορες περιβαλλοντικές επιδράσεις που είναι ικανές να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών βρίσκεται η θερμοκρασία και η υγρασία, οι οποίες είναι οι σημαντικότερες και οι πιο συχνές που βλέπουμε να επηρεάζουν την διάρκεια ζωής κόπωσης του υλικού. Η μεταβολή λοιπόν της θερμοκρασίας και η υγρασία στα σύνθετα υλικά (πολυμερή) αλλάζουν τις αντοχές των συνθέτων καθώς και την εντατική κατάσταση λόγω παραμενουσών τάσεων. Αυτό που γίνεται συνήθως είναι η ύπαρξη μεγάλων

θερμοκρασιών και υψηλή συγκέντρωση τάσεων οι οποίες μειώνουν την αντοχή του μητρώου αλλά και τις παραμένουσες τάσεις. Επιπλέον η απορρόφηση υγρασίας μειώνει την θερμοκρασία μετάβασης του πολυμερούς μητρώου και επηρεάζει την αντοχή σε διάβρωση πλέον σε ορισμένες ίνες. Έρευνες έχουν δείξει, ότι η εφελκυστική αντοχή των διαστρωματώσεων υπό στατικά φορτία που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αστοχία των ινών, δεν είναι ευαίσθητη στην συγκέντρωση της υγρασίας και στην θερμοκρασία. Στις διαστρωματώσεις όπου έχουμε στρώσεις υπό γωνία, η αντοχή τους σε κόπωση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η συνοχή στην σύνδεση ινών/μήτρας μειώνεται λόγω της παρουσίας της υγρασίας, αυξάνοντας έτσι την συχνότητα εμφάνισης ινών που έχουν αφαιρεθεί, στις επιφάνειες θραύσης. Μια περαιτέρω παρατήρηση είναι ότι, μια αρκετά εξασθενημένη μήτρα θα υποστήριζε διαφορετικά τις ίνες κατά την διάρκεια πολυαξονικών δοκιμών, επηρεάζοντας έτσι την αντοχή τους σε θραύση και κατανέμοντας το φορτίο λιγότερο αποτελεσματικά. Παρατηρήθηκε, ότι η θραύση των ινών και της μήτρας ήταν ολοένα και περισσότερο ψαθυρή με υψηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν τρεις σημαντικοί παράγοντες που σχετίζονται με την θερμοκρασία, και αυτοί είναι:

1. Η διαφοροποιημένη ανάπτυξη μεταξύ των ινών και της μήτρας και μεταξύ των διαφορετικά προσανατολισμένων στρωμάτων σε ένα έλασμα, μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερικές τάσεις.

2. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν ως αποτέλεσμα μεταβολές στις ιδιότητες των συστατικών των υλικών, ειδικότερα της μήτρας, ιδιαίτερα στον χρόνο σκλήρυνσης, ο οποίος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

3. Η αντίσταση των υλικών στην καταπόνηση υπό φορτίο (αντίσταση ερπυσμού) εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία λόγω των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων της μήτρας.

4.4.5 Συγκέντρωση τάσεων

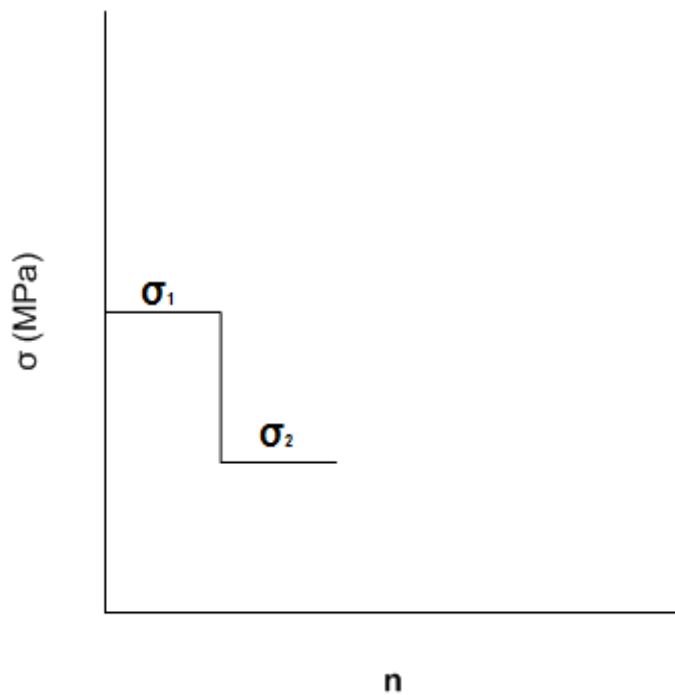
Στα μέταλλα, οι επιδράσεις από την συγκέντρωση των τάσεων οφείλονται στην παρουσία παραγόντων που αυξάνουν τις τάσεις, όπως εγκοπές, τρύπες, ξαφνική αλλαγή στην εγκάρσια διατομή κλπ. Στα σύνθετα υλικά, οι επιδράσεις από την συγκέντρωση των τάσεων εμφανίζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα. Δεν περιορίζονται μόνο σε τρύπες, εγκοπές και άλλους γνωστούς παράγοντες, αλλά εμφανίζονται επίσης, λόγω της παρουσίας πρόσθετης περιεκτικότητας ρητίνης, σπασμένων ινών, ατελούς δεσμού μεταξύ ινών και ρητίνης και πολλών άλλων παραγόντων.

Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να ορίσουμε έναν συντελεστή συγκέντρωσης τάσης, ο οποίος να λαμβάνει υπόψη αυτές τις ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως καθορίστηκε για τα μέταλλα.

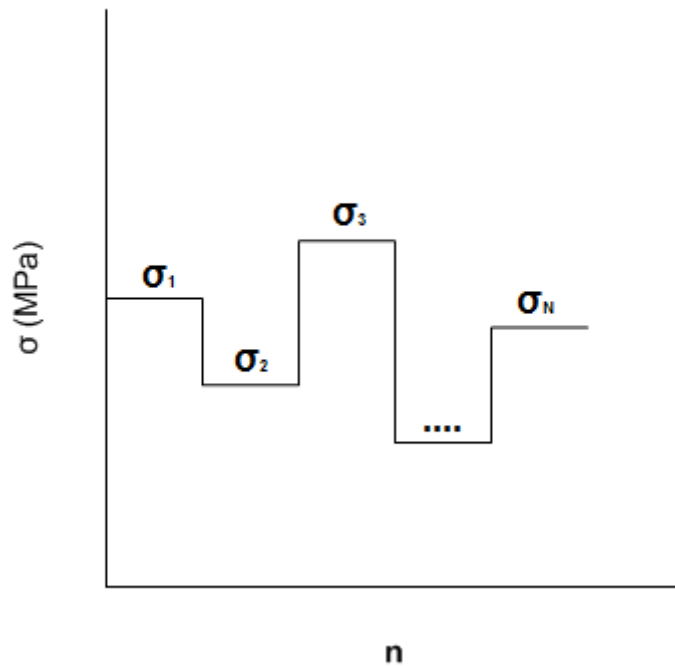
5. ΚΟΠΩΣΗ ΣΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

Η κόπωση σε μεταβλητές συνθήκες καταπόνησης έχει διάφορα στάδια. Μπορεί η κόπωση να συμβεί μετά από δύο μόνο βηματικές καταπονήσεις (σ_1 , σ_2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 ή μπορεί ακόμα να συμβεί και μετά από έναν μεγάλο αριθμό καταπονήσεων (σ_1 , σ_2 , σ_3 , ..., σ_N), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Αυτό εξαρτάται φυσικά από το υλικό, την σύσταση του, τις ιδιότητές του, και έναν μεγάλο αριθμό άλλων παραγόντων στους οποίους έγινε αναφορά σε προηγούμενα κεφάλαια.

Ως σ ορίζονται τα πλάτη των τάσεων που εφαρμόζονται, ως N ορίζονται οι κύκλοι αστοχίας ή διάρκεια ζωής για συνεχή φόρτιση πλάτους σ και ως n ορίζονται οι επιβαλλόμενοι κύκλοι κόπωσης για σταθερές συνθήκες καταπόνησης.



Σχήμα 5.1: Βηματική καταπόνηση κόπωσης με δύο πλάτη τάσεων



Σχ. 5.2: Βηματική καταπόνηση κόπωσης πολλών πλάτων τάσεων

5.1 Γραμμικά μοντέλα – Το μοντέλο Palmgren και Miner

Το μοντέλο μέσω του οποίου αναλύεται το φαινόμενο της κόπωσης και που κατά κύριο λόγο δείχνει την συσσώρευση της φθοράς στο υλικό που εξετάζεται, είναι το μοντέλο Palmgren-Miner ή αλλιώς μοντέλο συσσώρευσης φθοράς. Με το μοντέλο αυτό, γίνεται εφικτή η προσέγγιση της διάρκειας ζωής σε κόπωση, που απομένει τόσο στα μεταλλικά υλικά όσο και στα σύνθετα υλικά με τα οποία ασχολείται κατά κύριο λόγο η εργασία αυτή. Πρόκειται για ένα απλό μοντέλο, με το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί η διάρκεια ζωής ενός μεταλλικού ή σύνθετου υλικού, όταν αυτό καταπονηθεί από μια σειρά τάσεων με διαφορετικό πλάτος. Το μοντέλο Palmgren-Miner ορίζεται ως:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_v}{N_v} = 1 \quad (5.1)$$

όπου n_1, n_2, \dots, n_v είναι οι κύκλοι καταπόνησης για πλάτη τάσεων $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_v$ αντίστοιχα και N_1, N_2, \dots, N_v είναι οι κύκλοι αστοχίας για τις αντίστοιχες τάσεις (εάν αυτές επιβάλλονταν συνεχώς).

Για δύο βήματα καταπόνησης η εξίσωση (5.1) παίρνει την μορφή:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (5.2)$$

Αν θέσουμε τώρα ότι:

$$\frac{n_2}{N_2} = y \quad (5.3)$$

και

$$\frac{n_1}{N_1} = x \quad (5.4)$$

η εξίσωση (5.2) παίρνει την καινούρια μορφή:

$$y + x = 1 \text{ ή}$$

$$y = 1 - x \quad (5.5)$$

Πολλές φορές, δεν μπορούμε να προσεγγίσουμε την ζωή σε κόπωση των υλικών με τον κανόνα του Miner, αφού ο κανόνας του Miner είναι γραμμικός κανόνας και παριστάνεται από ευθεία γραμμή. Αυτό σημαίνει, πως προσεγγίζει σημεία που έχουν πάρα πολύ μικρή διασπορά μεταξύ τους, γεγονός που είναι πολύ δύσκολο να συμβεί σε δυναμικές καταπονήσεις με μεταβλητό πλάτος, που λαμβάνουν χώρα σε όλες σχεδόν τις κατασκευές που αποτελούνται από σύνθετα υλικά. Η χρησιμοποίησή του από τους μηχανικούς στην πράξη, οφείλεται λόγω της απλότητας του.

Επειδή στην πράξη, τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν για τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν μεγάλη διασπορά μεταξύ τους, το μοντέλο Palmgren-Miner δεν μας ικανοποιεί. Γι' αυτό, έχουν προταθεί νέα μοντέλα που είναι μη-γραμμικά.

5.2 Μη γραμμικά μοντέλα

Η ανάγκη για καλύτερη ανάλυση και πρόβλεψη της διάρκειας ζωής σε κόπωση στα σύνθετα υλικά, οδήγησε τους μηχανικούς στην δημιουργία νέων μοντέλων μη γραμμικών, αφού το γραμμικό μοντέλο Palmgren-Miner παρουσιάζει απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, όπως αποδεικνύεται στην συνέχεια. Η απόκλιση αυτή, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πολύ μεγάλη, γι' αυτό έχουν προταθεί μη γραμμικά μοντέλα, που έχουν την δυνατότητα να προσεγγίζουν καλύτερα τα δεδομένα που εξάγονται από εργαστηριακές μετρήσεις επάνω στα σύνθετα υλικά. Αυτά τα μη γραμμικά μοντέλα, όπως αποδεικνύεται στην συνέχεια, παρουσιάζουν καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, διότι μπορούν να προβλέψουν καλύτερα την διάρκεια ζωής των σύνθετων υλικών σε μεταβλητές συνθήκες καταπόνησης.

5.2.1 Το μοντέλο Hashin και Rotem

Το πρώτο μοντέλο με το οποίο ασχολείται η πτυχιακή, είναι το μοντέλο Hashin και Rotem [6]. Με την παραδοχή ότι η κόπωση, που αντιπροσωπεύει η καμπύλη σ - N , είναι λογαριθμική, οι Hashin και Rotem [6] τροποποίησαν τον νόμο των εκθετικών βλαβών των Marco και Starkey [7] και πρότειναν το μοντέλο, το οποίο για τα σύνθετα υλικά και για δύο στάδια φόρτισης, παίρνει την μορφή:

$$y = 1 - x^a \quad (5.6)$$

Με:

$$a = \frac{1-s_2}{1-s_1} \quad (5.7)$$

όπου ο εκθέτης a δεν βρίσκεται πλέον πειραματικά αλλά εξαρτάται τόσο από τις εφαρμοσμένες τάσεις (σ_1 και σ_2), όσο και από τη στατική αντοχή του υλικού ($s_1 = \sigma_1 / \sigma_{uts}$, $s_2 = \sigma_2 / \sigma_{uts}$, όπου το σ_{uts} είναι το όριο θραύσης του υλικού).

5.2.2 Το μοντέλο Manson και Halford

Το δεύτερο μοντέλο που αναλύεται στην εργασία, είναι το μοντέλο που πρότειναν οι Manson and Halford [8], το οποίο για τα σύνθετα υλικά και για δύο στάδια φόρτισης, παίρνει την μορφή:

$$y = 1 - x^a \quad (5.8)$$

Με:

$$a = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,4} \quad (5.9)$$

όπου N_1 και N_2 είναι οι κύκλοι αστοχίας για τάσεις σ_1 και σ_2 αντίστοιχα

5.2.3 Το μοντέλο Subramanian

Το τρίτο μοντέλο, είναι το μοντέλο Subramanian [9] το οποίο για τα σύνθετα υλικά και για δύο στάδια φόρτισης, παίρνει την μορφή:

$$y = 1 - x^a \quad (5.10)$$

Με:

$$a = \frac{\sigma_2 - \sigma_d}{\sigma_1 - \sigma_d} \quad (5.11)$$

όπου το σ_d είναι το όριο κόπωσης του υλικού.

5.2.4 Το μοντέλο New Model

Το τέταρτο μοντέλο που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή, είναι το μοντέλο New Model [10], το οποίο για τα σύνθετα υλικά και για δύο στάδια φόρτισης, παίρνει την μορφή:

$$y = 1 - x^a \quad (5.12)$$

Με:

$$a = \frac{\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{f'}}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{f'}}\right)} \quad (5.13)$$

όπου, το $\sigma_{f'}$ είναι ο συντελεστής αντοχής κόπωσης του υλικού.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

6.1 Περιγραφή του πειράματος

Πολλοί ερευνητές κατά καιρούς, έχουν κάνει πειράματα πάνω σε σύνθετα υλικά όταν αυτά καταπονούνται σε κόπωση και προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να προβλέψουν την διάρκεια ζωής των συνθέτων υλικών κατά την κόπωση. Αφού, πρώτα ξεκινούσαν την πειραματική διαδικασία δοκιμάζοντας πολλά δοκίμια συνθέτων υλικών, διαδικασία που κρατούσε πολύ καιρό (πάνω από ένα χρόνο), έτσι ώστε να έχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα για να μπορούν μετά να κάνουν πιο σωστές προσεγγίσεις, γιατί με λίγα πειραματικά δεδομένα δεν μπορεί να προβλεφθεί σωστά η διάρκεια ζωής σε κόπωση των συνθέτων υλικών. Εάν, για παράδειγμα, έχουμε ένα δοκίμιο το οποίο έχει κάποια ρωγμή εξαρχής σε σχέση με ένα άλλο που δεν έχει, δεν θα δώσει σωστά δεδομένα, άρα δεν θα μπορέσουν να βγουν σωστά συμπεράσματα στο τέλος του πειράματος.

Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με τάσεις δύο φάσεων, που καταπονούνται σε κόπωση σε διάφορα δοκίμια, όπου τα πειράματα έχουν γίνει στο παρελθόν και τα πειραματικά δεδομένα πάρθηκαν από την αντίστοιχη βιβλιογραφία. Εφόσον, αντλήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα, επόμενος σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση των κανόνων και των ανάλογων προσεγγίσεων προκειμένου να βγει ένα συμπέρασμα, ποιος από τους κανόνες προσεγγίζει καλύτερα την διάρκεια ζωής σε κόπωση τα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά (δοκίμια) των πειραμάτων που πήραμε και χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε τις προσεγγίσεις αυτές είναι Glass/Epoxy (GRP), Carbon/Epoxy T300/914. Επίσης τα δοκίμια όπου μας απασχόλησαν είναι το 5208/T300 Graphite/Epoxy [$\pm 45_0$]_{2s}, το Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/ ± 45]_{2s}, το Graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-45₂°/45°]], το AS-4PEEK ([0/90]_{4s}, [0/45/90/-45]_{2s}, [± 45]_{4s}) και τέλος το [02/902]_s HTA/6376C Carbon/Epoxy.

6.2 Πειραματικές μετρήσεις

Τα πειραματικά δεδομένα που μας βοήθησαν για την δημιουργία των καμπυλών Wohler είναι:

Π 6.1: Glass/Epoxy (GRP) πειραματικά δεδομένα δοκιμών για καμπύλη Σ-N.[11]

<i>One-Stress Level Tests</i>					
σ , ksi	$\overline{\log N}$, Mean log Cycles to Failure	N	95% Confidence Limit on N	Standard Deviation, S_x , log	No. of Specimens
56	2.6930	493	570 – 420	0.230	35
49	3.3930	2 470	2 820 – 2 170	0.162	31
42	4.1675	14 700	17 590 – 12 100	0.262	37
35	5.2360	172 200	213 000 – 139 200	0.262	31

$$\sigma_{\text{uts}} = 448 \text{ Mpa}$$

Οι πειραματικές μετρήσεις που έχουμε από τα πειράματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Π 6.2: Glass/Epoxy (GRP) πειραματικά δεδομένα δοκιμών.[12]

Πειραματικά Δεδομένα			
σ_1 (Mpa)	n_1	σ_2 (Mpa)	n_2
386	250	241	192 000
386	100	241	193 000
386	250	290	5840
386	100	290	11 970
386	250	338	1,250
386	100	338	1635
338	1000	241	86 000
338	250	241	162 500
338	1000	290	8670
338	250	290	8000
290	10 00	241	96 500
290	2000	241	110 800
241	50 000	290	3730
241	20 000	290	9490
241	50 000	338	391
241	20 000	338	804
241	50 000	386	— ^a
241	20 000	386	124
290	10 000	338	293
290	2000	338	1290
290	10 000	386	—
290	2000	386	355
338	1000	386	297
338	250	386	503

Αντίστοιχα τα πειραματικά δεδομένα για το σύνθετο άνθρακα Carbon/Epoxy T300/914 είναι:

Π 6.3: Πειραματικά Δεδομένα για Carbon/Epoxy T300/914 [13]

	n_1	n_2	$\frac{n_1}{N_1}$	$\frac{n_2}{N_2}$	$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2}$
	87200	520	0.76	0.06	0.82
	87000	150	0.76	0.02	0.78
	86300	1408	0.75	0.16	0.91
	75999	0	0.66	0	0.66
	57700	1750	0.50	0.20	0.70
	57550	2280	0.50	0.26	0.76
	40300	2027	0.35	0.23	0.58
Low-to-high	28700	3320	0.25	0.38	0.63
	26500	2640	0.23	0.3	0.53
	25300	2464	0.22	0.28	0.50
	17650	6170	0.15	0.70	0.85
*	17000	38140	0.15	4.33	4.48
*	13000	14300	0.11	1.63	1.74
*	12500	24030	0.11	2.73	2.84
	8500	15250	0.97	0.13	1.10
	7480	17060	0.85	0.15	1
	7480	79496	0.85	0.69	1.54
	6800	29939	0.77	0.26	1.03
	6500	48760	0.74	0.42	1.16
	4600	73910	0.52	0.64	1.16
High-to-low	4400	89350	0.50	0.78	1.28
	4400	80605	0.5	0.7	1.2
	2500	90150	0.28	0.78	1.06
*	1500	41840	0.17	0.36	0.53
	1500	111120	0.17	0.97	1.14
	1350	99520	0.15	0.86	1.01

$\sigma_L = 315$ MPa, $N_L = 115150$ cycles $\sigma_H = 340$ MPa, $N_H = 8800$ cycles. * data not considered in the statistical re-analysis.

Π 6.4: Υπολογισμοί για Carbon/Epoxy T300/914

N ₁	115150
N ₂	8800

Π 6.5: 5208/T300 Graphite/Epoxy [± 45]_{2s}, για L-H [14]

Specimen No.	Fatigue life under high load, cycles	Initial stiffness, MPa (ksi)	Residual stiffness, MPa (ksi) ^a
A2-6	140	5619(815)	5068(735)
A1-17	1,200	5516(800)	5171(750)
A3-15	1,740	5619(815)	5343(775)
A2-14	3,300	5550(805)	5264(762)
A2-43	3,350	5378(780)	5102(740)
A1-53	3,740	5516(800)	5171(750)
A3-26	4,710	5861(850)	5516(800)
A3-34	4,730	5895(855)	5343(775)
A2-49	4,810	5792(840)	5343(775)
A1-51	5,280	5343(775)	5102(740)
A3-56	5,340	5929(860)	5343(775)
A1-56	5,470	5412(785)	4999(725)
A1-40	5,610	5516(800)	5171(750)
A3-31	5,820	5516(800)	5102(740)
A2-38	6,000	5688(825)	5412(785)
A2-2	6,900	5792(840)	5206(755)
A3-9	13,320	5688(825)	5240(760)

^a Residual stiffness at the end of low load ($n_l = 73,940$ cycles).

II 6.6: 5208/T300 Graphite/Epoxy [$\pm 45_0$]_{2s}, γ_{α} H-L [14]

Specimen No.	Fatigue life under high load, cycles	Fatigue life under low load, cycles	Initial stiffness, MPa (ksi)	Residual stiffness, MPa (ksi) ^a
A1-13	3020		5516(800)	
A1-10	4800		5816(850)	
A1-54	4970		5240(760)	
A1-47	5080		5206(755)	
A2-12	2420		5447(790)	
A2-26	2480		5378(780)	
A3-46	4720		6033(875)	
A2-48		5,890	5619(815)	5171(750)
A1-5		20,090	5343(775)	4482(650)
A3-10		23,120	5516(800)	4964(720)
A2-50		30,000	5378(780)	5102(740)
A2-40		46,030	5585(810)	5102(740)
A1-43		54,760	5792(840)	4964(720)
A3-54		60,170	5929(860)	5171(750)
A1-42		66,100	5240(760)	4895(710)
A3-25		87,190	5924(860)	5164(749)
A3-39		112,660	5516(800)	5033(730)
A2-52		113,370	5240(760)	5033(730)
A2-42		122,790	5688(825)	5171(750)
A3-16		129,170	5585(810)	5033(730)
A2-22		136,500	5723(830)	5240(760)
A2-5		147,750	5861(850)	5171(750)
A3-35		182,290	5688(825)	5171(750)
A3-38		196,460	5861(850)	5447(790)
A2-11		211,890	5723(830)	5378(780)

^a Residual stiffness at the end of high load ($n_f = 6,030$ cycles).

Π 6.7: Πειραματικά δεδομένα Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/±45]_{2s} [15]

Set	Stress level	N_f	N_i	$\Delta E_i/E_0$	$\Delta E_f/E_0$	c
1	$r=0.65$	1 000 000	100 000	0.02	0.25	1.5
2	$r=0.85$	10 000	1000	0.03	0.23	0.8

Π6.8: Πειραματικά δεδομένα Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/±45]_{2s} [15]

	Number of cycles	
	Low-high test	High-low test
Experimental data	8572	643 570
Cumulative model	9600	565 804

Π6.9: Πειραματικά δεδομένα Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/±45]_{2s} [15]

	Low-high test	High-low test
Cumulative model	0.9156	1.0906
Miner's model	0.9572	1.1435

Π 6.10: πειραματικές μετρήσεις για 5208/T300 Graphite/Epoxy [± 45]_{2s}

N_1	136860
N_2	11095
σ_{uts}	98.788 (Mpa)

Π6.11: Πειραματικά δεδομένα Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/ ± 45]_{2s}

N_1	100000
N_2	8572

Π 6.12: Πειραματικά δεδομένα graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-452°/45°]. [16]

r	Lognormal				Weibull	
	λ	ξ	\bar{N}	c.o.v. = σ/\bar{N}	α	Θ
0.85	8.59917	0.64685	6690.06	0.7208	1.64566	7420.208
0.90	6.41836	0.39224	662.165	0.4077	2.92501	729.77
0.95	5.41079	0.46561	249.43	0.4920	2.38782	277.653

Case	Lognormal		Weibull	
	Median	c.o.v	α	Θ
(i) $r_1 = 0.90$ $r_2 = 0.95$	170.33	0.6649	1.64252	232.695
(ii) $r_1 = 0.95$ $r_2 = 0.90$	484.03	0.85925	1.38578	701.873
(iii) $r_1 = 0.85$ $r_2 = 0.90$ $r_3 = 0.95$	91.03	0.99809	1.11716	143.009
(iv) $r_1 = 0.95$ $r_2 = 0.90$ $r_3 = 0.85$	2293.72	0.83382	1.43808	3275.923

Spectrum stress	n_1	n_2		n_3	
		Lognormal	Weibull	Lognormal	Weibull
$r_1 = 0.90, r_2 = 0.95$	200	72.65	59.121	—	—
$r_1 = 0.95, r_2 = 0.90$	80	160	138.36	—	—
$r_1 = 0.85, r_2 = 0.90, r_3 = 0.95$	1500	150	150	25.33	19.078
$r_1 = 0.95, r_2 = 0.90, r_3 = 0.85$	80	250	150	787.88	685.06

$$r_1 = 0.85; \quad N_{1,0.9} = 2155;$$

$$r_2 = 0.9; \quad N_{2,0.9} = 364;$$

$$r_3 = 0.95; \quad N_{3,0.9} = 119.$$

Π 6.13: Πειραματικά δεδομένα graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-452°/45°].

N1	662.165
N2	249143

Π 6.14: Πειραματικά δεδομένα για το AS-4ΠΡΕΕΚ ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [±45]4s). [17,18]

H - L Δοκιμές Κόπωσης				H - L Δοκιμές Κόπωσης			
λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental	λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental
$r_1R_1f_2$	$r_2R_1f_2$	0.2	0.76	$r_2R_1f_2$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.20
		0.5	0.73			0.5	1.25
		0.8	0.80			0.8	1.21
$r_2R_1f_1$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.94	$r_2R_2f_1$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.02
		0.5	0.88			0.5	1.12
		0.8	1.12			0.8	0.90
$r_2R_1f_1$	$r_2R_1f_2$	0.2	1.06	$r_2R_1f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	0.94
		0.5	0.96			0.5	1.03
		0.8	1.08			0.8	0.94
$r_1R_2f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	0.84	$r_2R_1f_1$	$r_1R_2f_2$	0.2	1.18
		0.5	0.78			0.5	1.15
		0.8	0.82			0.8	1.07
$r_1R_1f_2$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.69	$r_2R_2f_1$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.36
		0.5	0.58			0.5	1.31
		0.8	0.75			0.8	1.08

Π 6.15: Πειραματικά δεδομένα για το AS-4ΠΡΕΕΚ ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [±45]4s). [17,18]

H - L Δοκιμές Κόπωσης				L - H Δοκιμές Κόπωσης			
λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental	λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental
$r_1R_1f_2$	$r_2R_1f_2$	0.2	0.86	$r_2R_1f_2$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.11
		0.5	0.74			0.5	1.22
		0.8	0.80			0.8	1.24
$r_2R_1f_1$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.88	$r_2R_2f_1$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.17
		0.5	0.77			0.5	1.12
		0.8	0.92			0.8	1.20
$r_2R_1f_1$	$r_2R_1f_2$	0.2	1.05	$r_2R_1f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.08
		0.5	0.86			0.5	1.04
		0.8	0.96			0.8	1.17
$r_1R_2f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	0.82	$r_2R_1f_1$	$r_1R_2f_2$	0.2	0.87
		0.5	0.79			0.5	0.91
		0.8	0.80			0.8	1.22
$r_1R_1f_2$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.78	$r_2R_2f_1$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.16
		0.5	0.64			0.5	1.25
		0.8	0.74			0.8	1.36

Π 6.16: Πειραματικά δεδομένα για το AS-4ΠΡΕΕΚ ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [±45]4s). [17,18]

H - L Δοκιμές Κόπωσης				L - H Δοκιμές Κόπωσης			
λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental	λ_1	λ_2	n_1/N_1	Experimental
$r_1R_1f_2$	$r_2R_1f_2$	0.2	0.71	$r_2R_1f_2$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.32
		0.5	0.74			0.5	1.27
		0.8	1.08			0.8	1.14
$r_2R_1f_1$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.84	$r_2R_2f_1$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.05
		0.5	0.92			0.5	0.91
		0.8	1.06			0.8	0.94
$r_2R_1f_1$	$r_2R_1f_2$	0.2	0.70	$r_2R_1f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.26
		0.5	0.76			0.5	1.20
		0.8	0.81			0.8	1.02
$r_2R_1f_1$	$r_1R_2f_2$	0.2	0.94	$r_1R_2f_2$	$r_2R_1f_1$	0.2	1.06
		0.5	0.79			0.5	1.16
		0.8	0.85			0.8	1.11
$r_1R_1f_2$	$r_2R_2f_1$	0.2	0.82	$r_2R_2f_1$	$r_1R_1f_2$	0.2	1.17
		0.5	0.84			0.5	1.02
		0.8	1.14			0.8	0.89

Π 6.17: Πειραματικά δεδομένα για το AS-4PEEK ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [±45]4s).

([0/90]4s)

r=0.60	r=0.66
N1	200000
N2	640000

[0/45/90/-45]2s

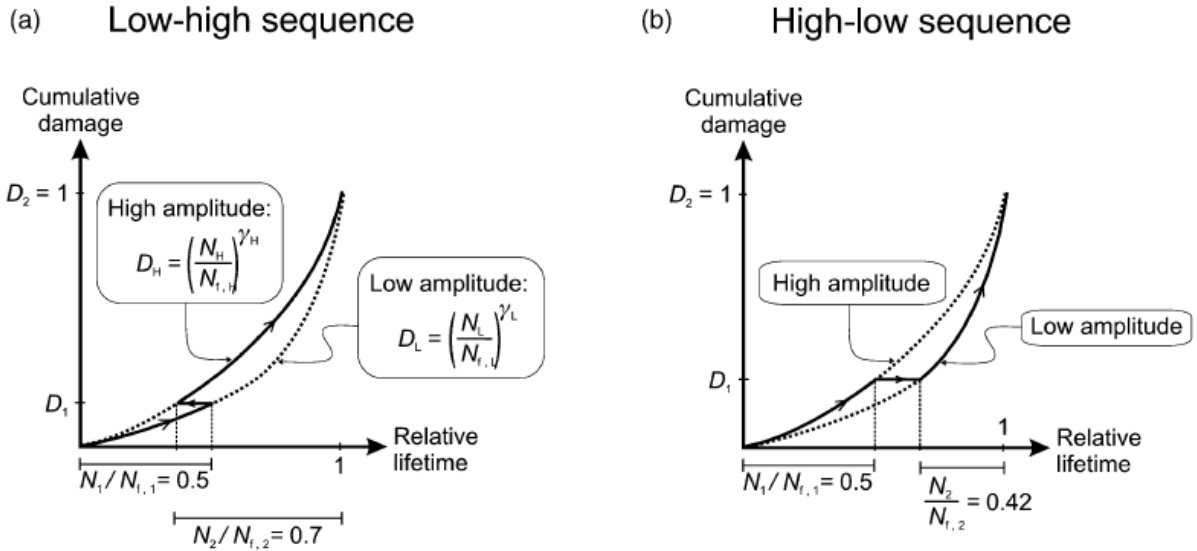
r=0.64	r=0.70
N1	120000
N2	800000

[±45]4s

r=0.34	r=0.40
N1	430000
N2	810000

Όπου ο συντελεστής r είναι ο λόγος των τάσεων σ (σ_1 και σ_2) προς το όριο θραύσης του υλικού σ_{uts} .

Π 6.18: Πειραματικά δεδομένα για το [02/902]_s HTA/6376C Carbon/Epoxy. [19]



Π 6.19: Πειραματικά δεδομένα για το [02/902]_s HTA/6376C Carbon/Epoxy.

N1	29881
N2	318

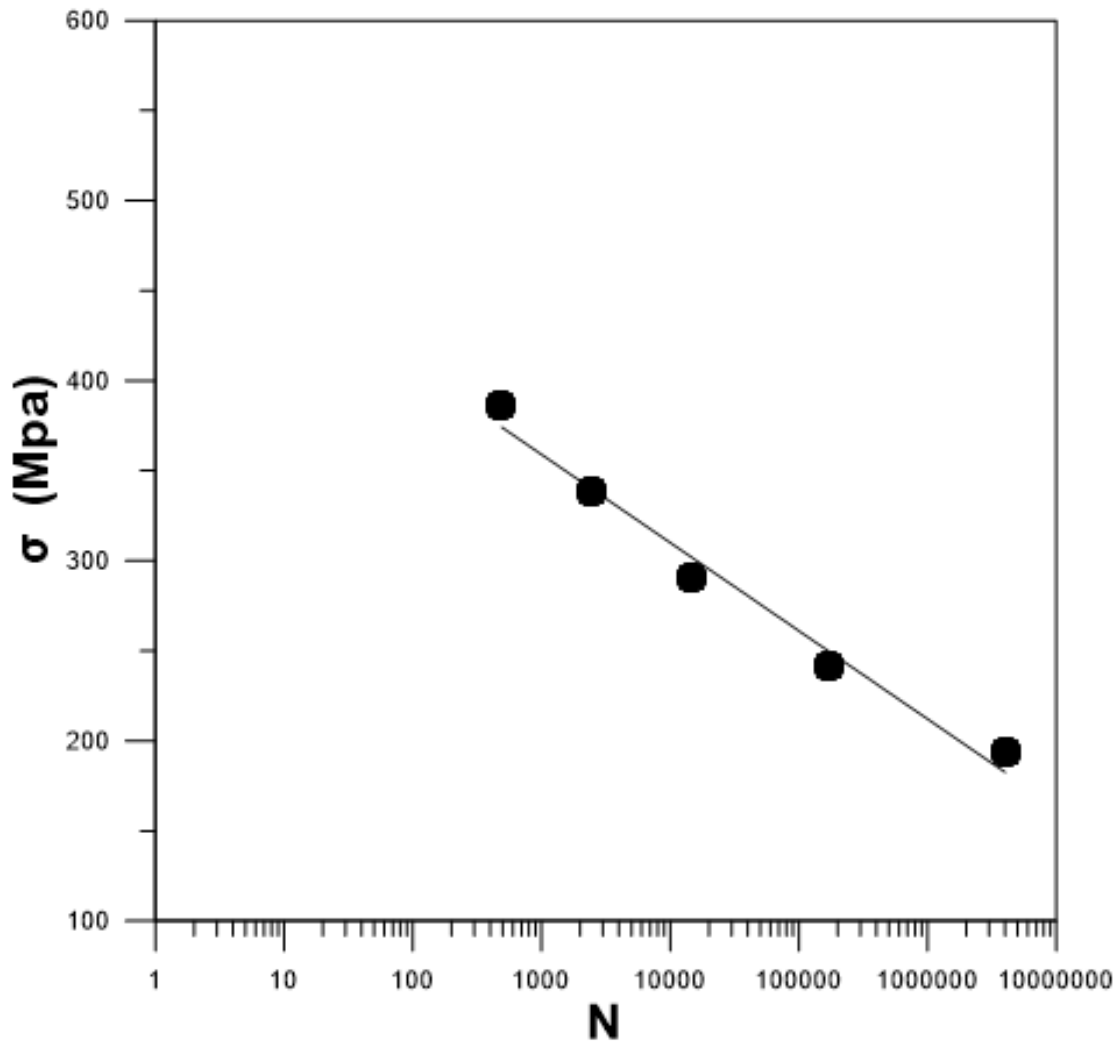
Με τα δεδομένα των δοκιμών που έχουμε, δημιουργούμε τις καμπύλες σ -N οι οποίες έδωσαν τα σ_F και σ_d τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των κανόνων που αναφέραμε πιο πριν, με τους οποίους θα γίνουν οι προσεγγίσεις στο πείραμα μας. Οι καμπύλες σ -N (Wöhler) που προκύπτουν για τα δοκίμια glass/epoxy (GRP), για το Carbon/Epoxy T300/914, 5208/T300 Graphite/Epoxy [± 45]_{2s}, Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/ ± 45]_{2s}, graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-452°/45°], AS-4PEEK ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [± 45]4s) και τέλος το [02/902]_s HTA/6376C Carbon/Epoxy.

6.3 Καμπύλες Wöhler για τα υλικά

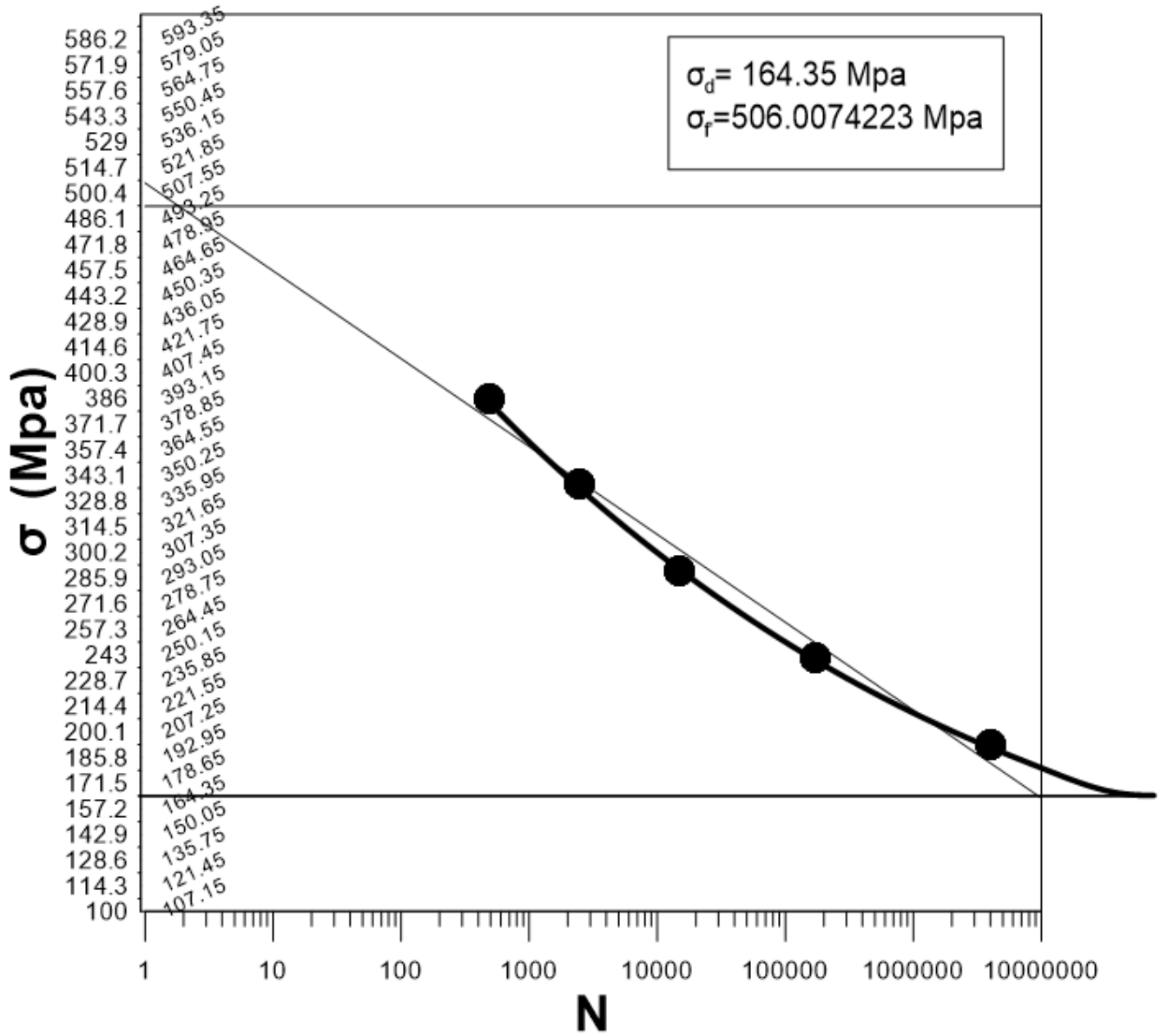
Με βάση τα πειραματικά στοιχεία σχεδιάζονται οι καμπύλες Wöhler για τα αντίστοιχα υλικά.

6.3.1 Η καμπύλη Wöhler για glass/epoxy(GRP)

Διάγραμμα 6.3.1: glass/epoxy(GRP)

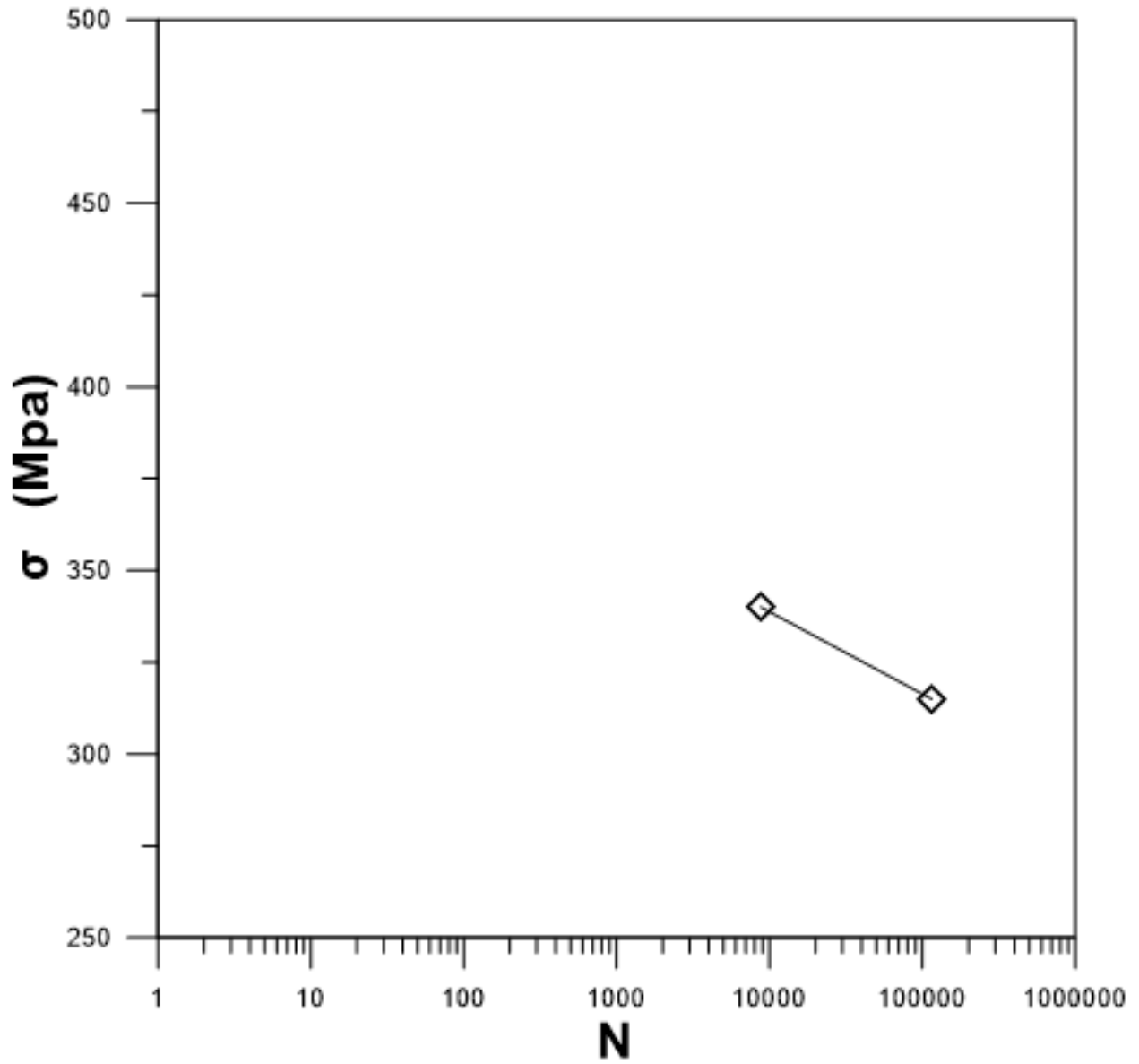


GRP Wöhler

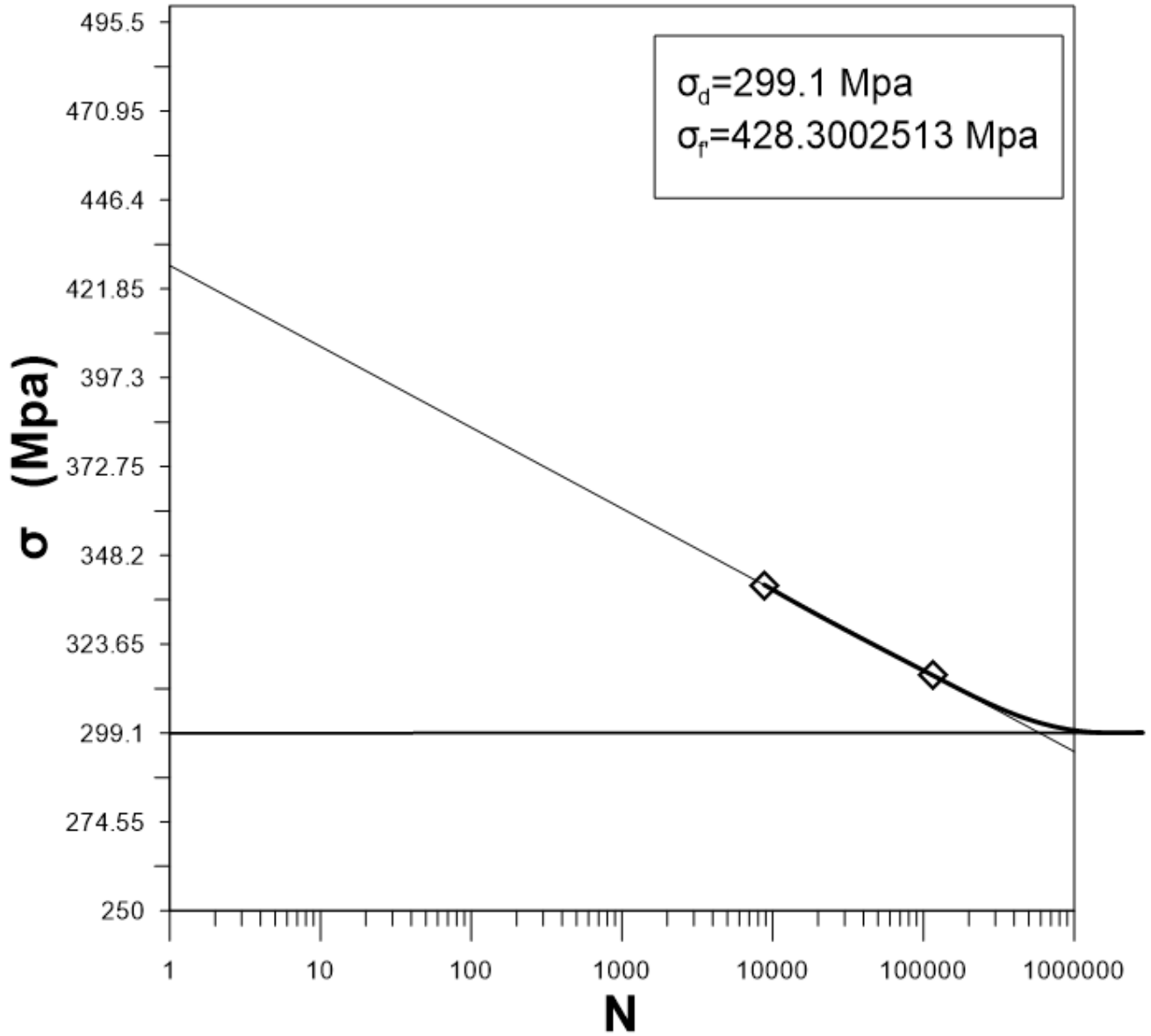


6.3.2 Η καμπύλη Wöhler για Carbon/Epoxy T300/914

Διάγραμμα 6.3.2: Carbon/Epoxy T300/914

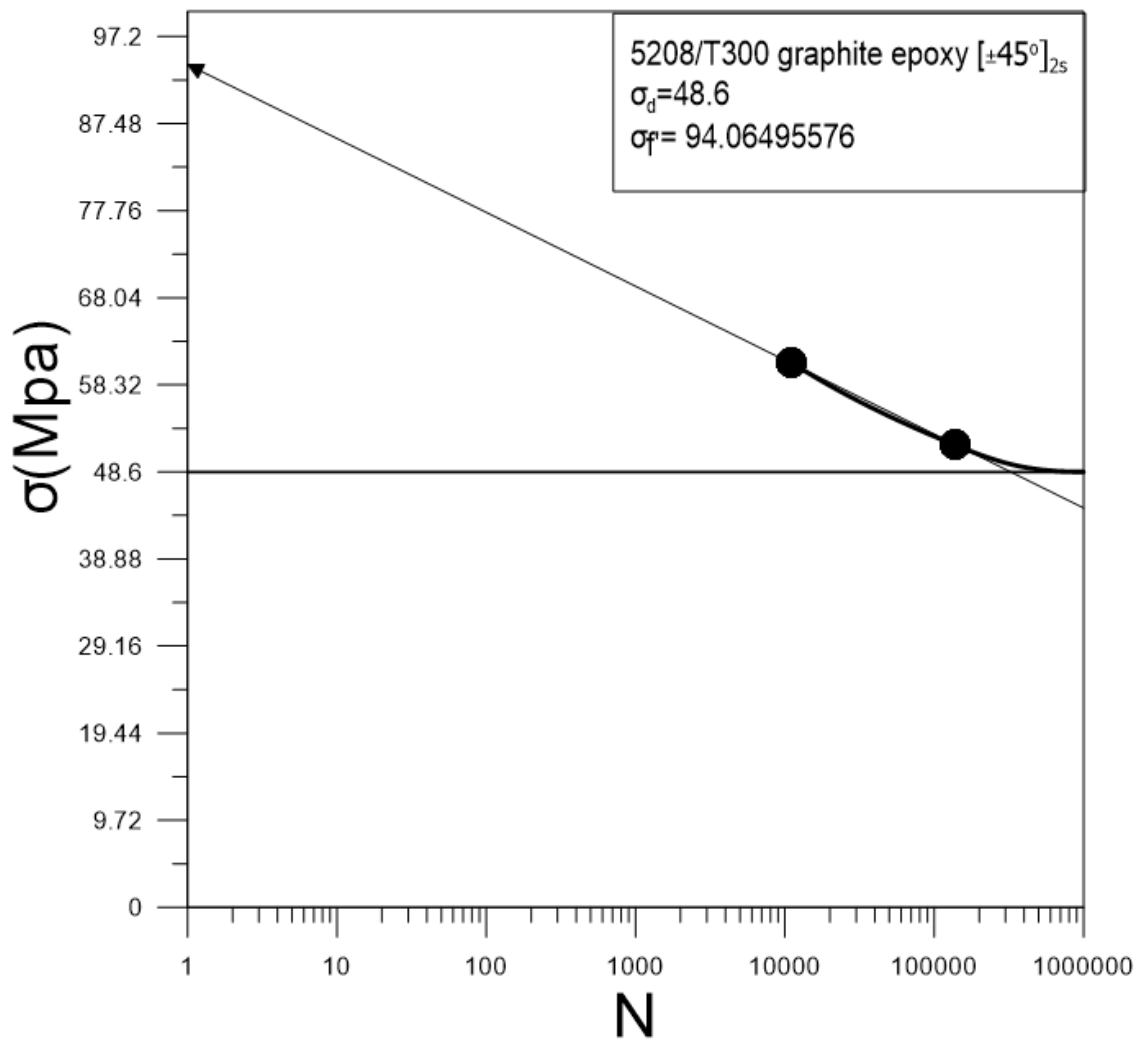


Carbon/Epoxy T300/914 Wöhler



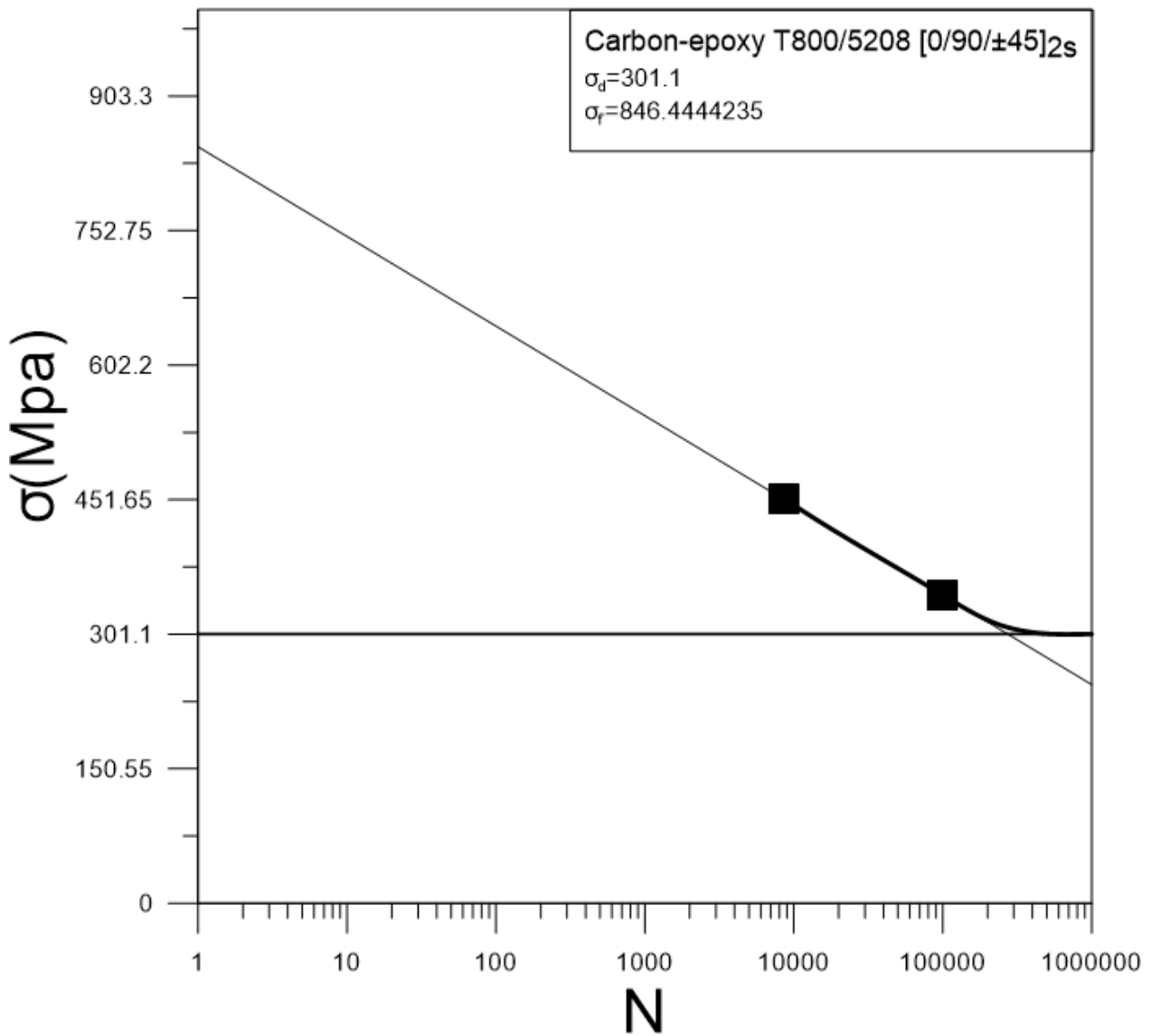
6.3.3 Η καμπύλη Wöhler για 5208/T300 Graphite/Epoxy [±45°]_{2s}

Διάγραμμα 6.3.3: Καμπύλη Wöhler 5208/T300 Graphite/Epoxy [±45°]_{2s}



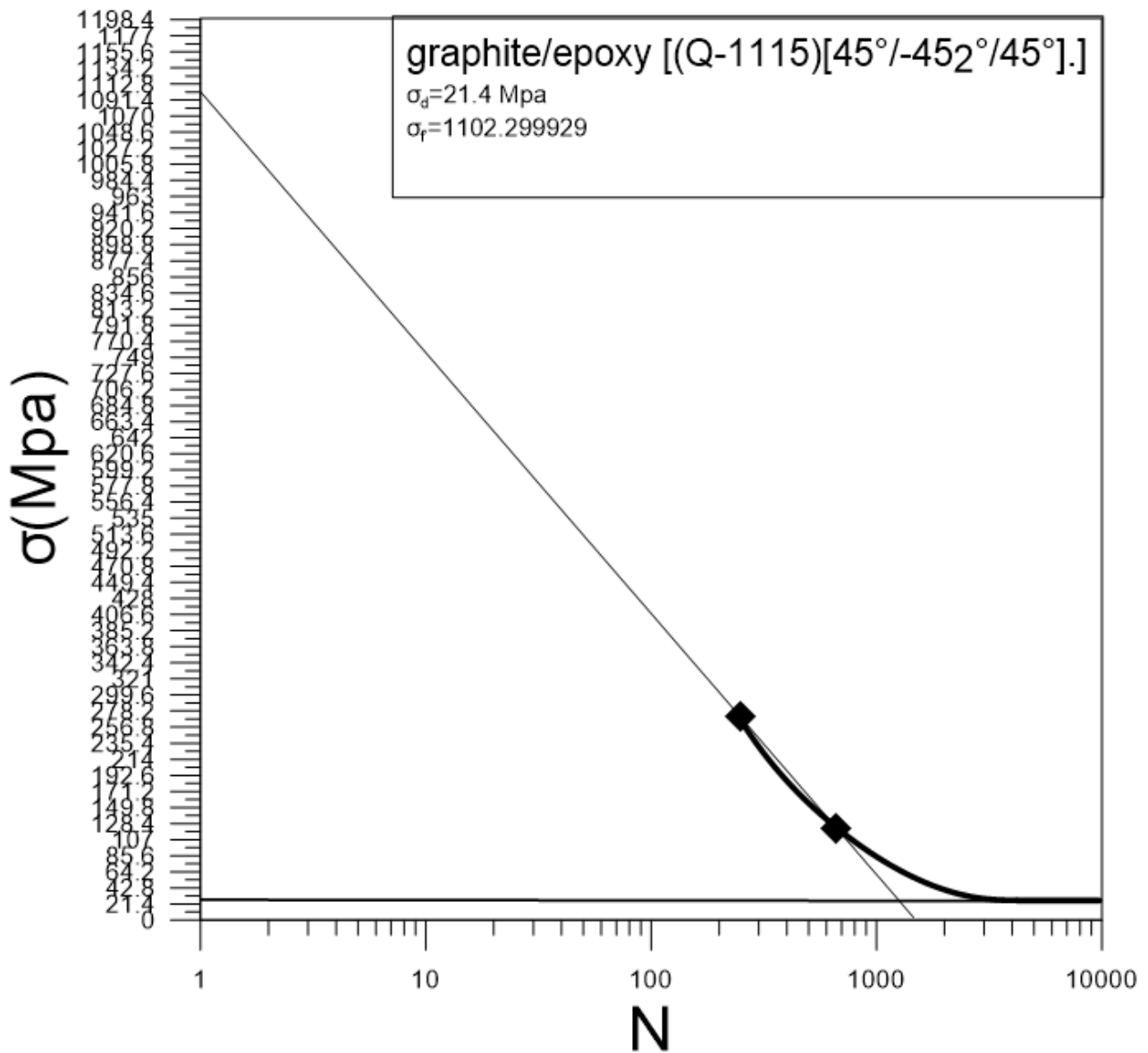
6.3.4 Η καμπύλη Wöhler για Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/±45]2s

Διάγραμμα 6.3.4: Καμπύλη Wöhler Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/±45]2s



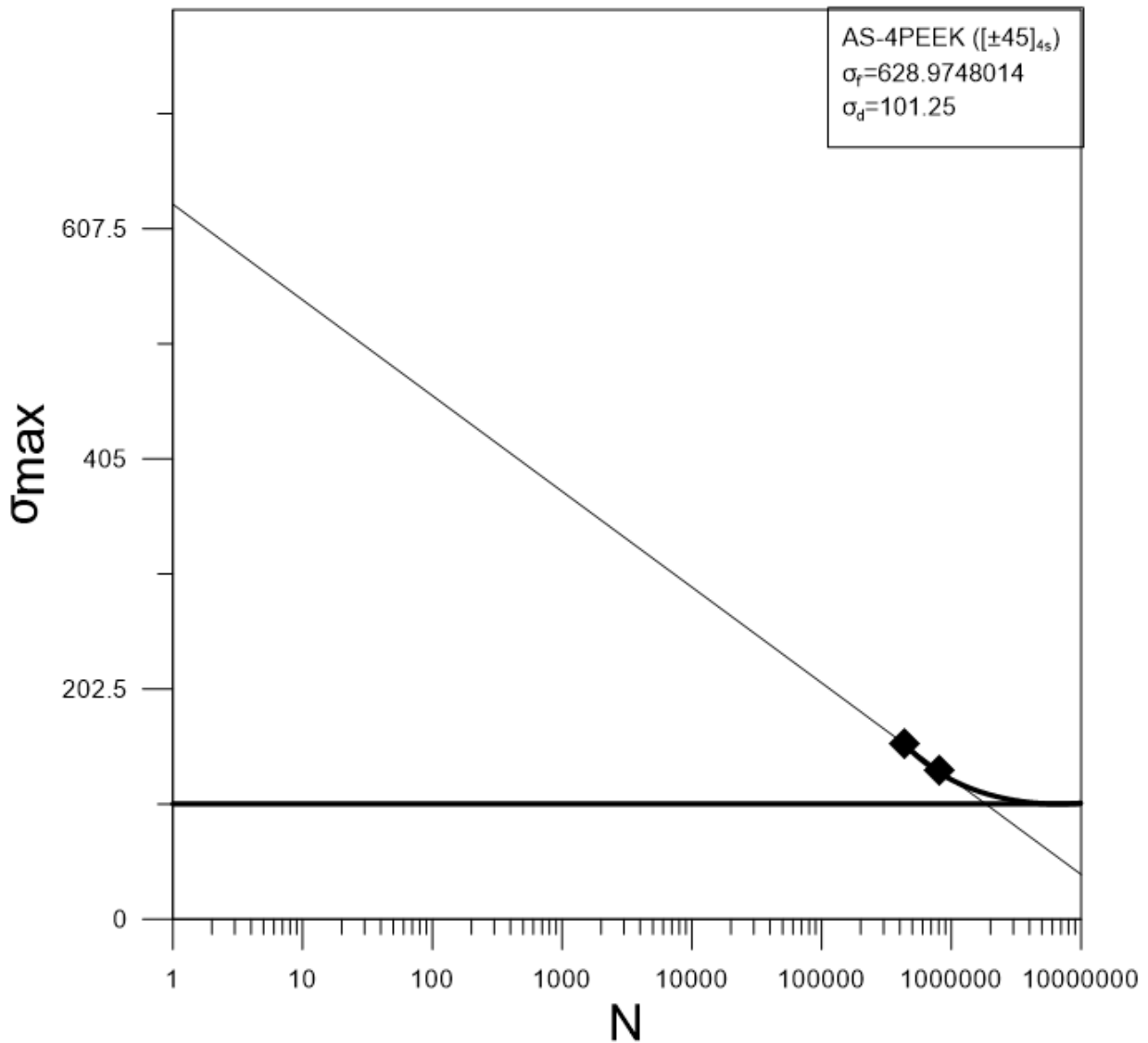
6.3.5 Η καμπύλη Wöhler για graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-452°/45°]

Διάγραμμα 6.3.5: Καμπύλη Wöhler graphite/epoxy [(Q-1115)[45°/-452°/45°]

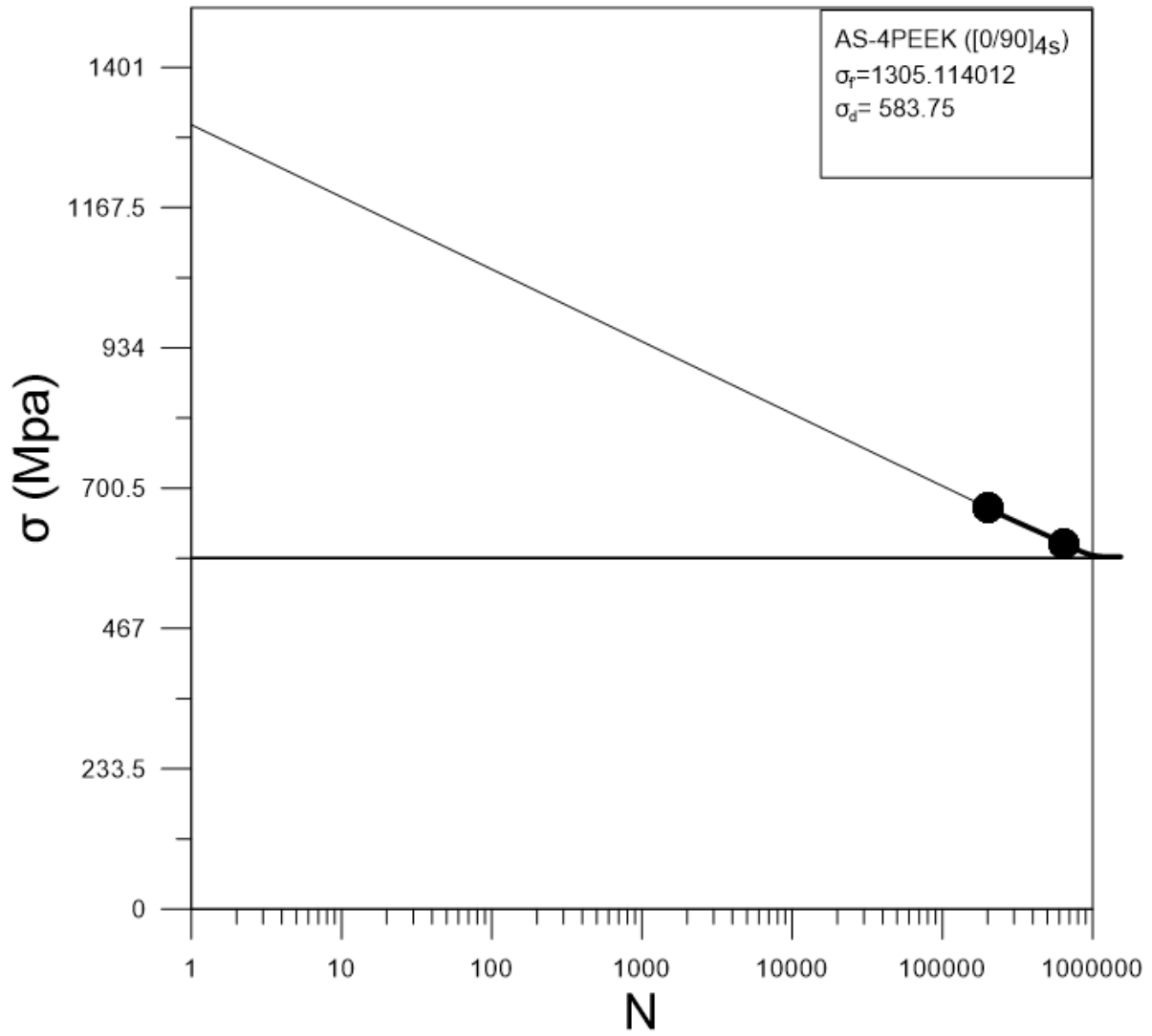


6.3.6 Οι καμπύλες Wohler για AS-4PEEK ([0/90]4s, [0/45/90/-45]2s, [±45]4s)

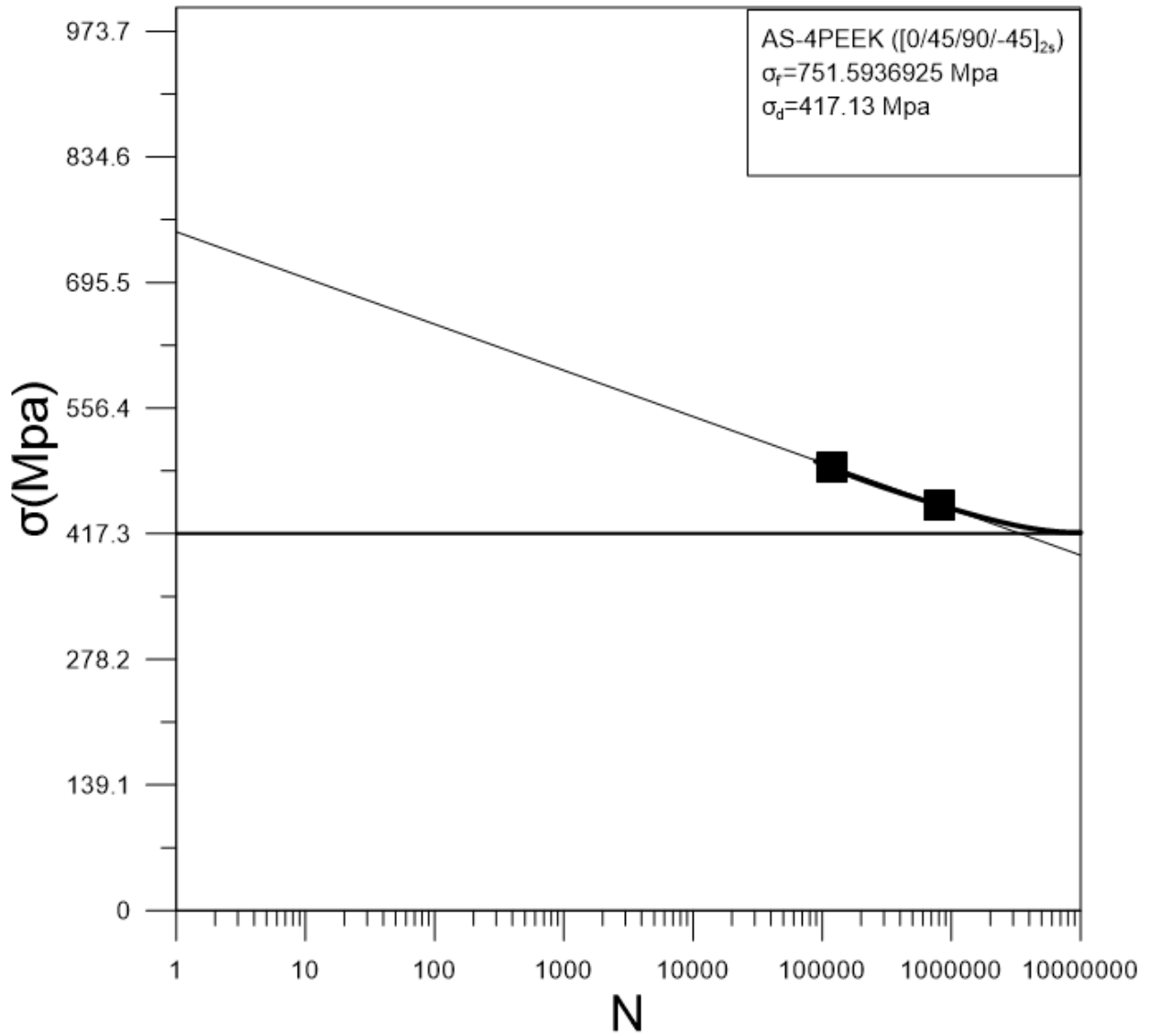
Διάγραμμα 6.3.6α: Καμπύλη Wöhler AS-4PEEK [±45]4s



Διάγραμμα 6.3.6β: Καμπύλη Wöhler AS-4PEEK [0/90]_{4s}

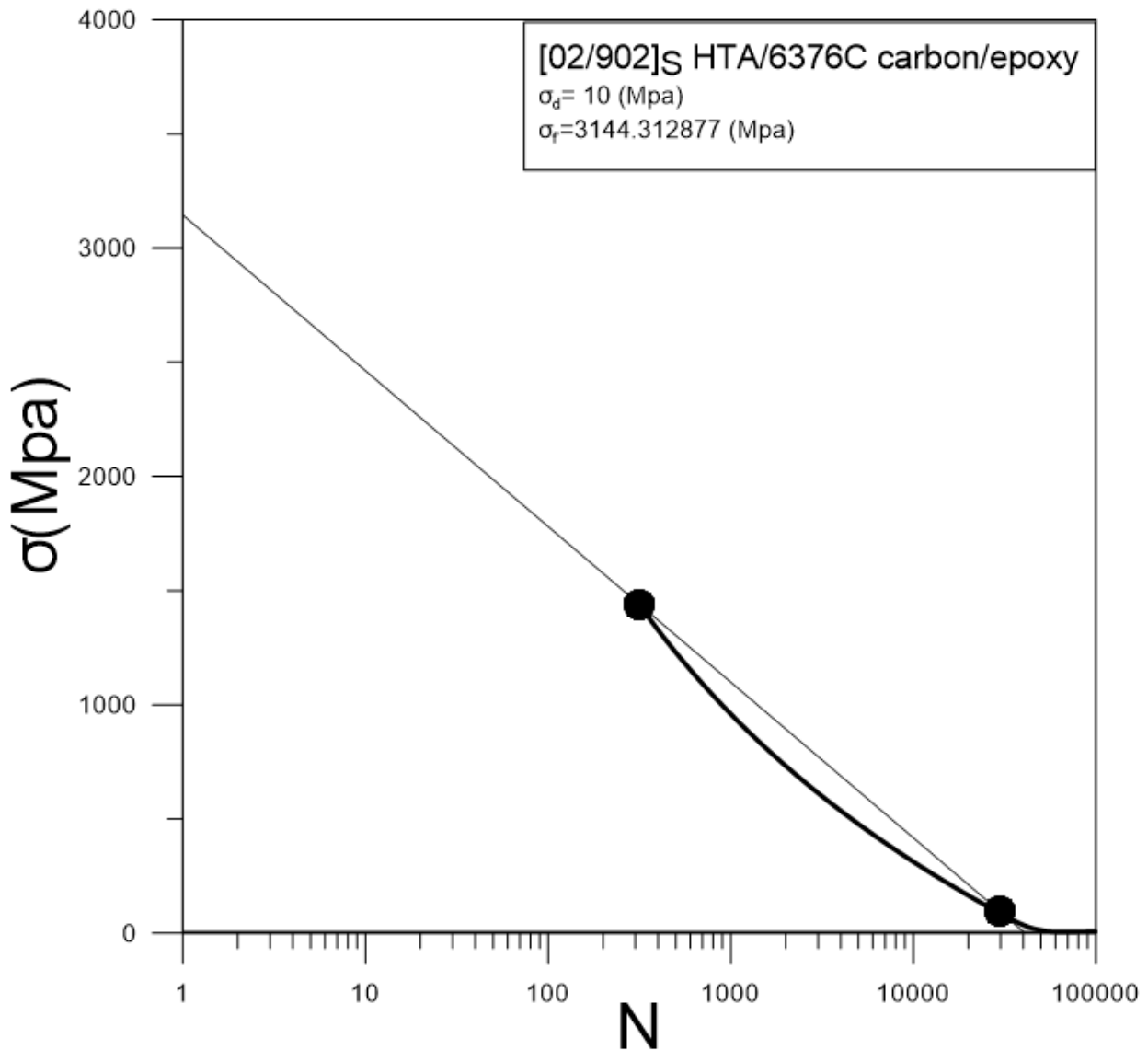


Διάγραμμα 6.3.6γ: Καμπύλη Wöhler AS-4PEEK [0/45/90/-45]_{2s}



6.3.7 Οι καμπύλες Wohler για [02/902]S HTA/6376C Carbon/Epoxy

Διάγραμμα 6.3.7: Καμπύλη Wohler [02/902]s HTA/6376C Carbon/Epoxy



7. ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΣΕ ΒΗΜΑΤΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Αρχικά παρουσιάζουμε τα πειραματικά δεδομένα μέσω πινάκων και τους υπολογισμούς που προέκυψαν, για να έχουμε όλα τα δεδομένα για τα μοντέλα, όπως παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην συνέχεια μέσω των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζουμε τις καμπύλες σ - N από τις οποίες προκύπτουν νέα δεδομένα τα οποία τα χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε τους υπολογισμούς που χρειάζεται στα μοντέλα προσέγγισης.

Τέλος σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα με τις προσεγγίσεις των μοντέλων, τα οποία στην συνέχεια τα συγκρίνουμε μεταξύ τους για να μας οδηγήσουν στην επόμενη ενότητα που είναι τα συμπεράσματα της πειραματικής διαδικασίας στην πτυχιακή εργασία αυτή.

Σε όλα τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν σε κόπωση εφαρμόστηκαν δύο τάσης φόρτισης διαφορετικού πλάτους και οι κανόνες προσέγγισης που χρησιμοποιούμε είναι τέσσερις, ο Hashin and Rotem , Subramanian, Manson-Halford και New Model.

Στην συνέχεια, θέλουμε να εφαρμόσουμε τα 4 μοντέλα προσέγγισης μαζί με τον κανόνα του Miner έτσι ώστε να μπορέσουμε να δούμε ποιος κανόνας θα κάνει καλύτερη προσέγγιση στα πειραματικά δεδομένα των δοκιμών αυτών. Για να εφαρμοστούν οι κανόνες θα πρέπει να υπολογιστούν τα εκθετικά a τα οποία υψώνονται στους κανόνες που χρησιμοποιούμε. Εφόσον γίνει ο υπολογισμός των συντελεστών αυτών τότε θα τοποθετήσουμε στα διαγράμματα τον κάθε κανόνα ξεχωριστά να τα παρουσιάσουμε παρακάτω και έτσι θα μπορούμε στο τέλος να τα συγκρίνουμε και να βγάλουμε τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

7.1 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό glass/epoxy (GRP)

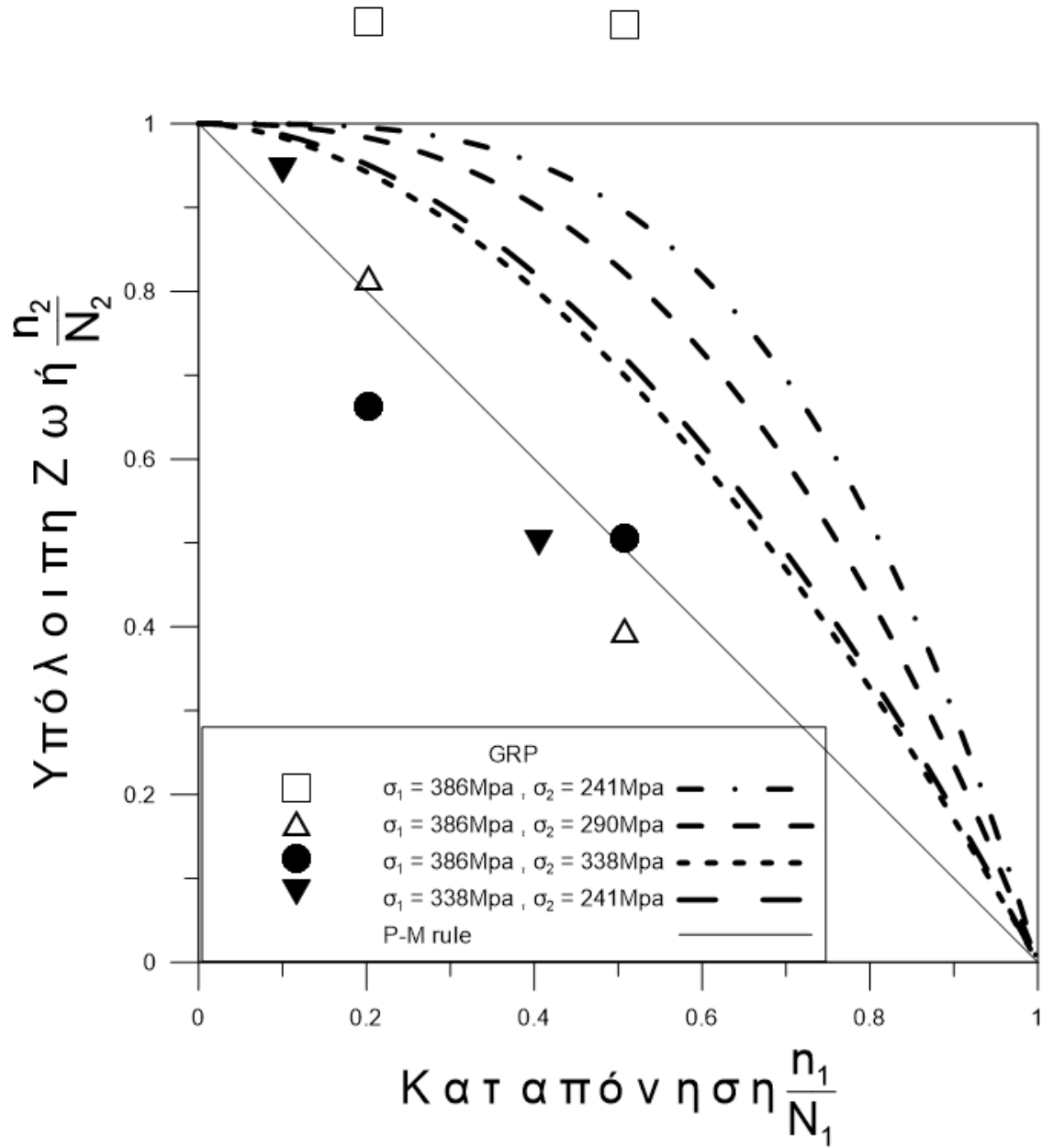
7.1.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό glass/epoxy (GRP)

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.1.1:

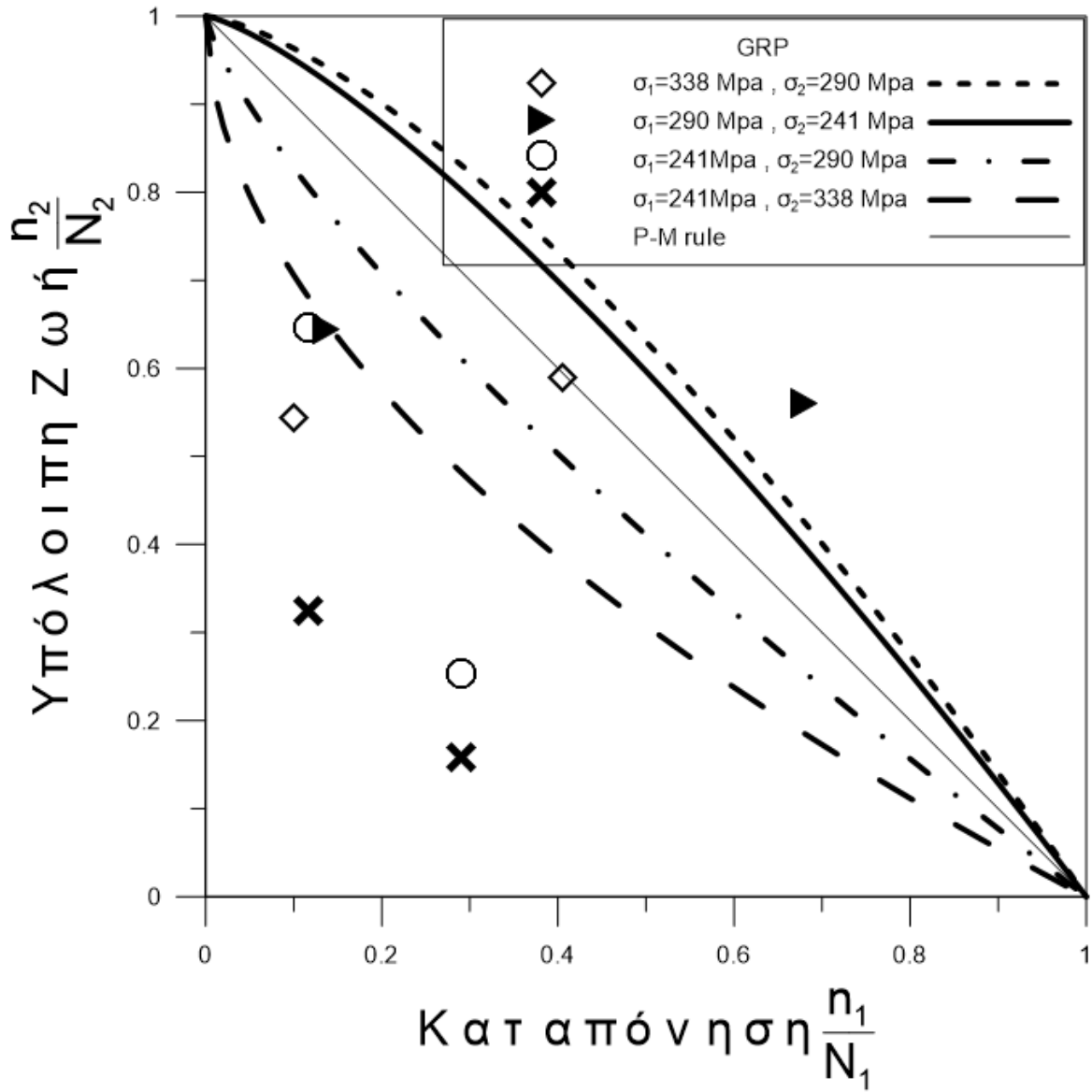
Πίνακας 7.1.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό GRP

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
386	241	3.338709677
386	290	2.548387097
386	338	1.774193548
338	241	1.881818182
338	290	1.436363636
290	241	1.310126582
241	290	0.763285024
241	338	0.531400966
241	386	1.604166667
290	338	1.166089965
290	386	1.332179931
338	386	1.142433234
σ_{uts} (Mpa) = 448		

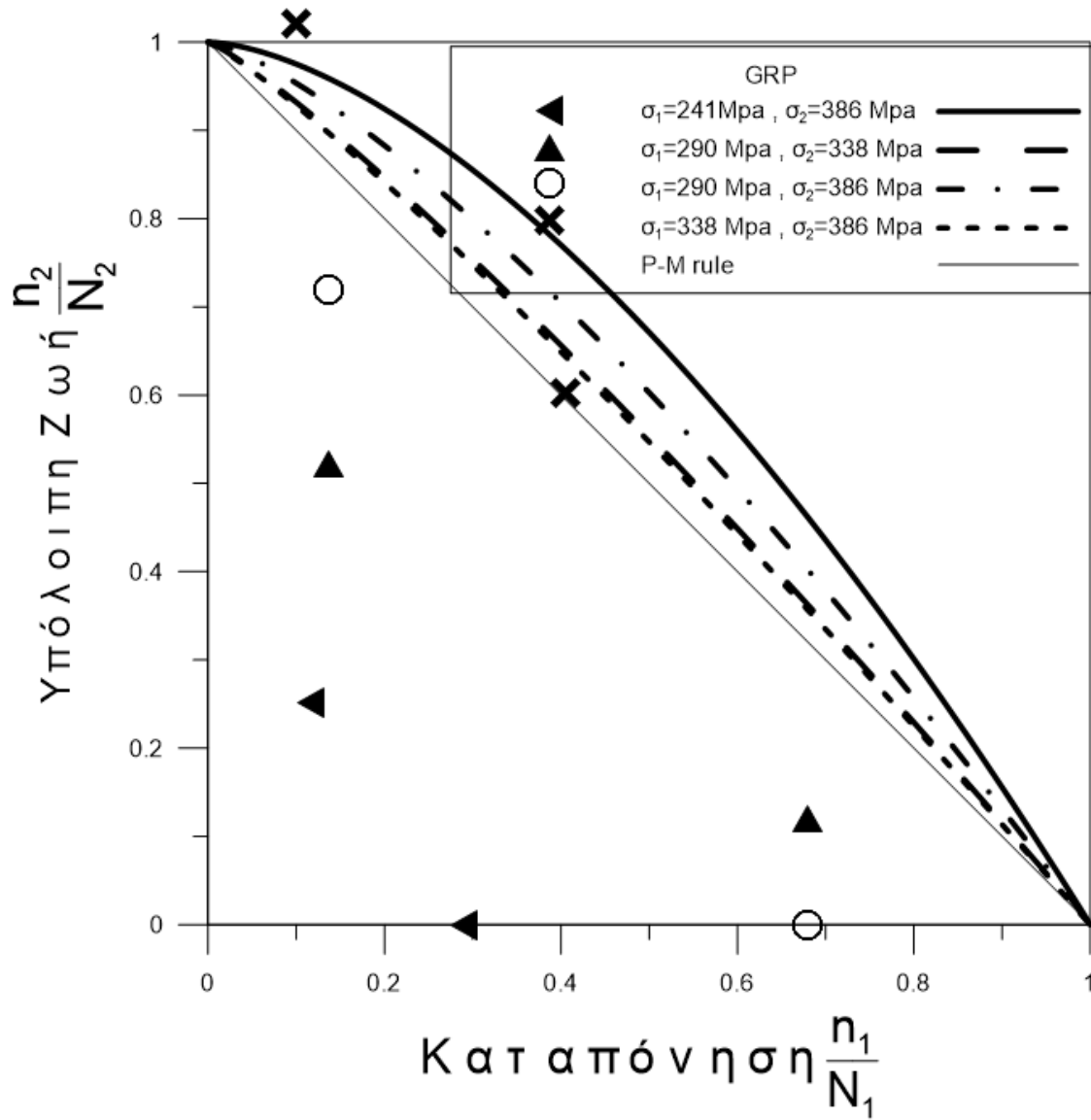
Διάγραμμα 7.1.1α



Διάγραμμα 7.1.1β



Διάγραμμα 7.1.1γ



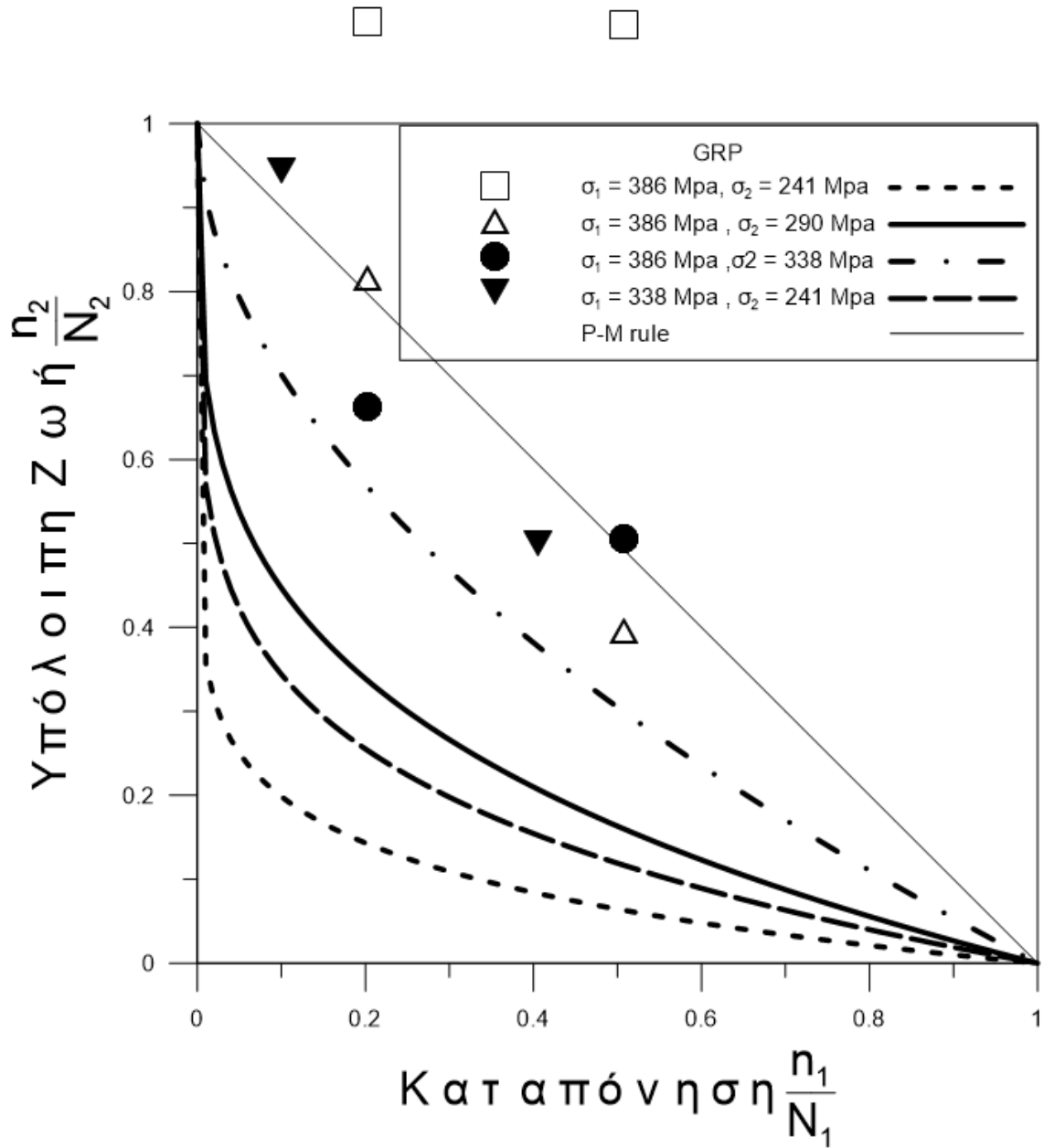
7.1.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό glass/epoxy (GRP)

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.1.2:

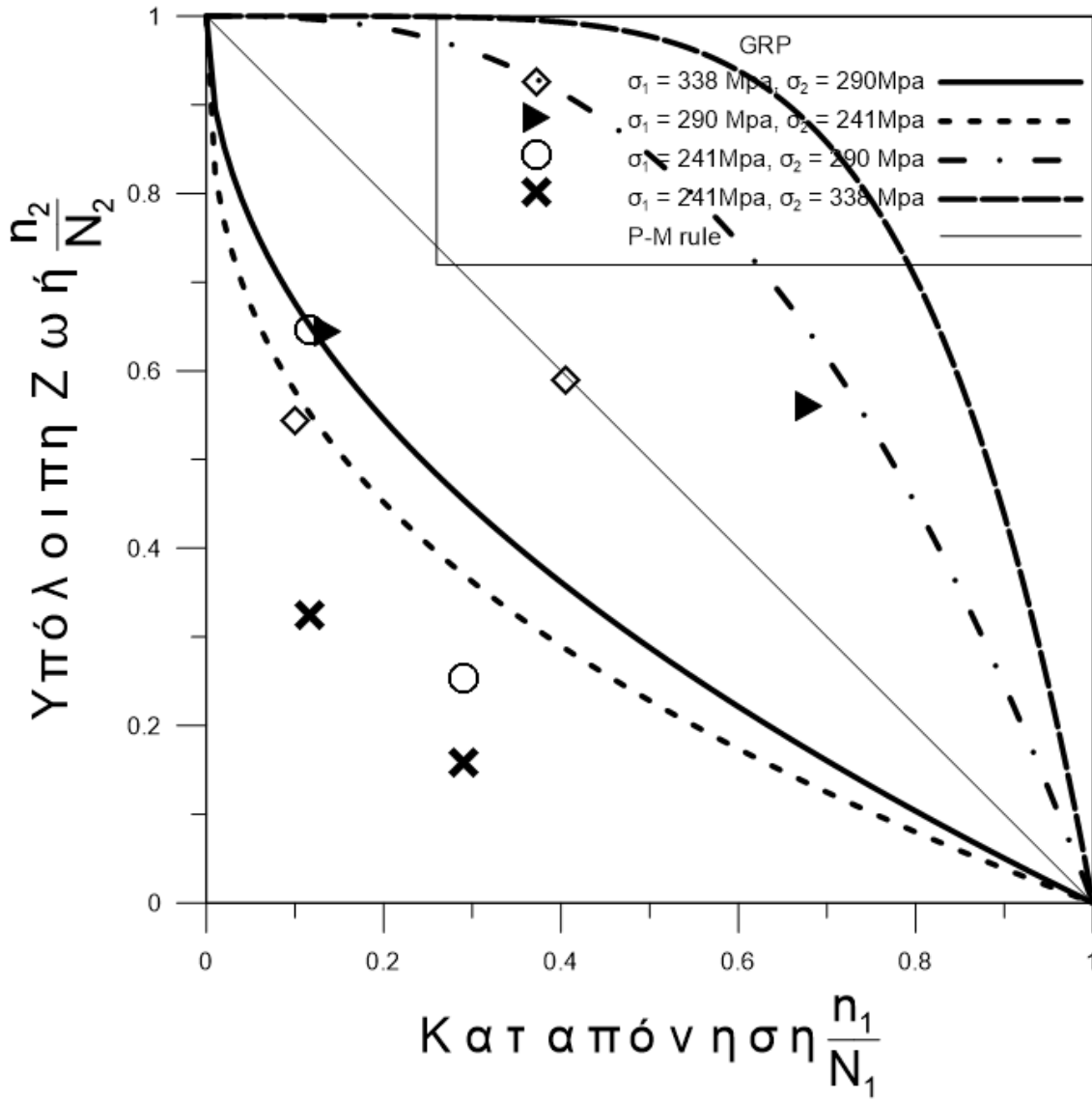
Πίνακας 7.1.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό GRP

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
386	241	0.096100469
386	290	0.257164984
386	338	0.524879954
338	241	0.183090378
338	290	0.489950096
290	241	0.373691892
241	290	2.676001330
241	338	5.461783455
241	386	10.405776439
290	338	2.041024193
290	386	3.888554285
338	386	1.905197547
$\sigma_{\text{outs}} \text{ (Mpa)} = 448$		

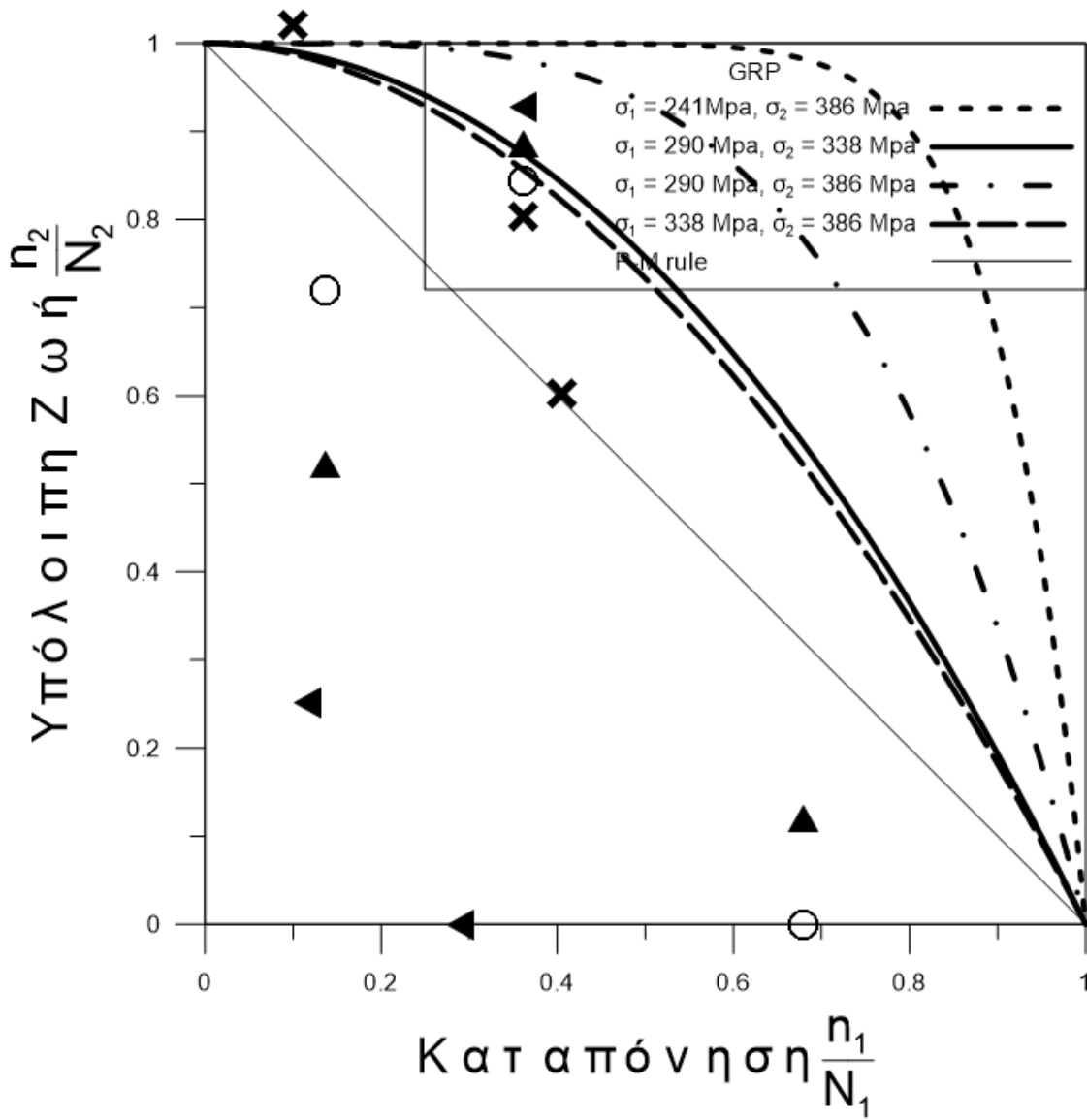
Διάγραμμα 7.1.2α



Διάγραμμα 7.1.2β



Διάγραμμα 7.1.2γ



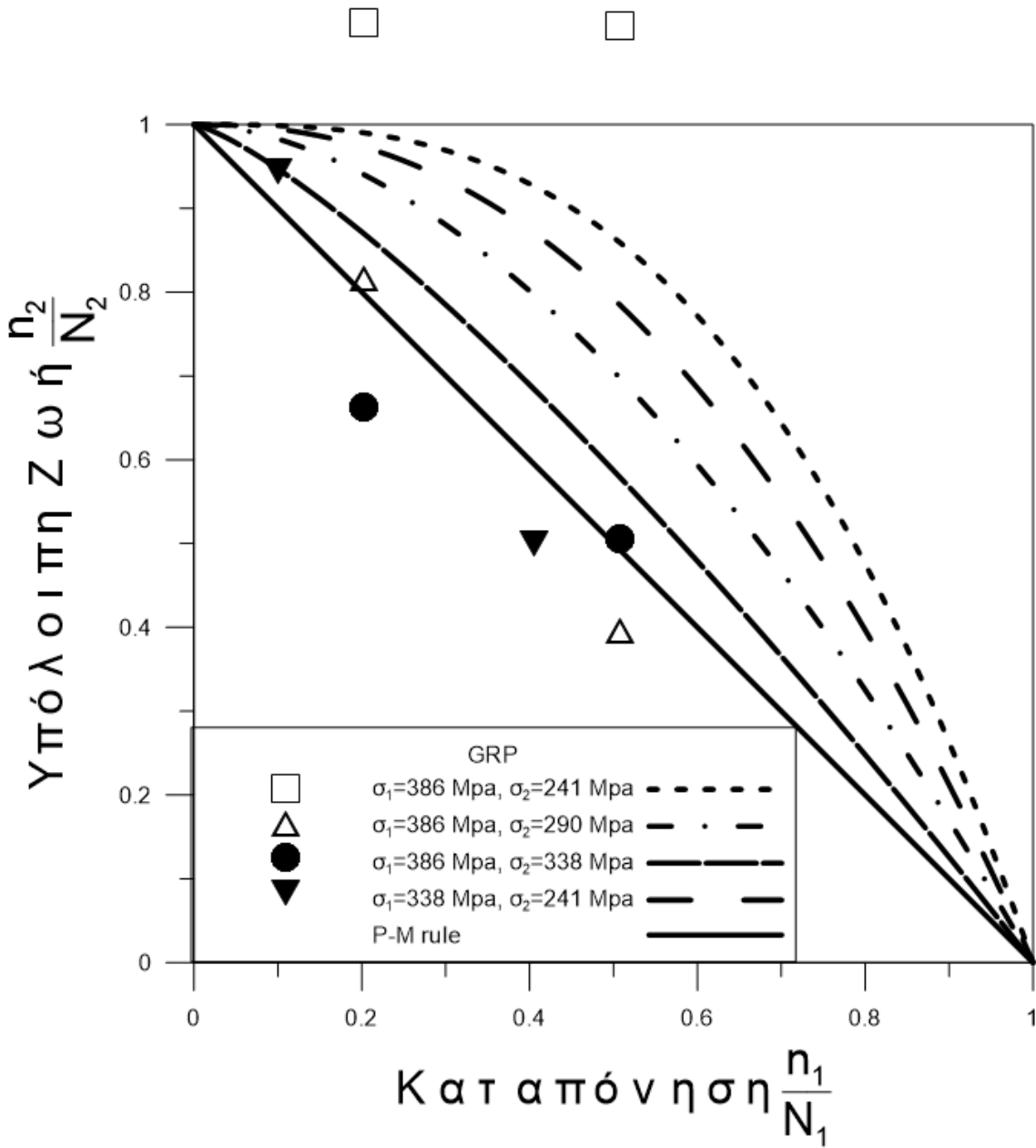
7.1.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό glass/epoxy (GRP)

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.1.3:

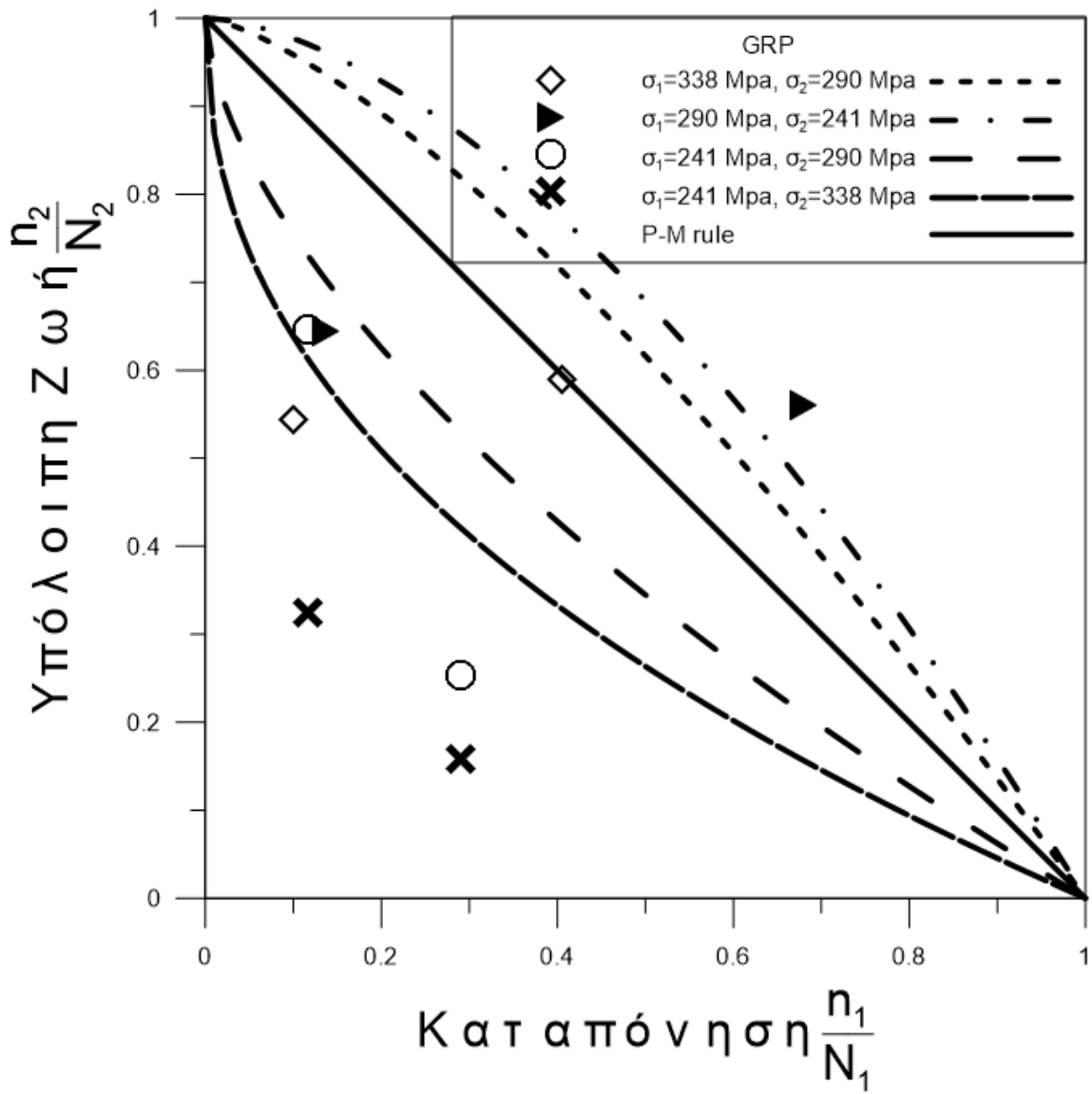
Πίνακας 7.1.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό GRP

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
386	241	2.891715590
386	290	1.764027059
386	338	1.276418082
338	241	2.265492498
338	290	1.382013530
290	241	1.639269406
241	290	0.610027855
241	338	0.441405125
241	386	0.345815475
290	338	0.723581918
290	386	0.566884728
338	386	0.783442364
σ_d (Mpa) = 164.35		

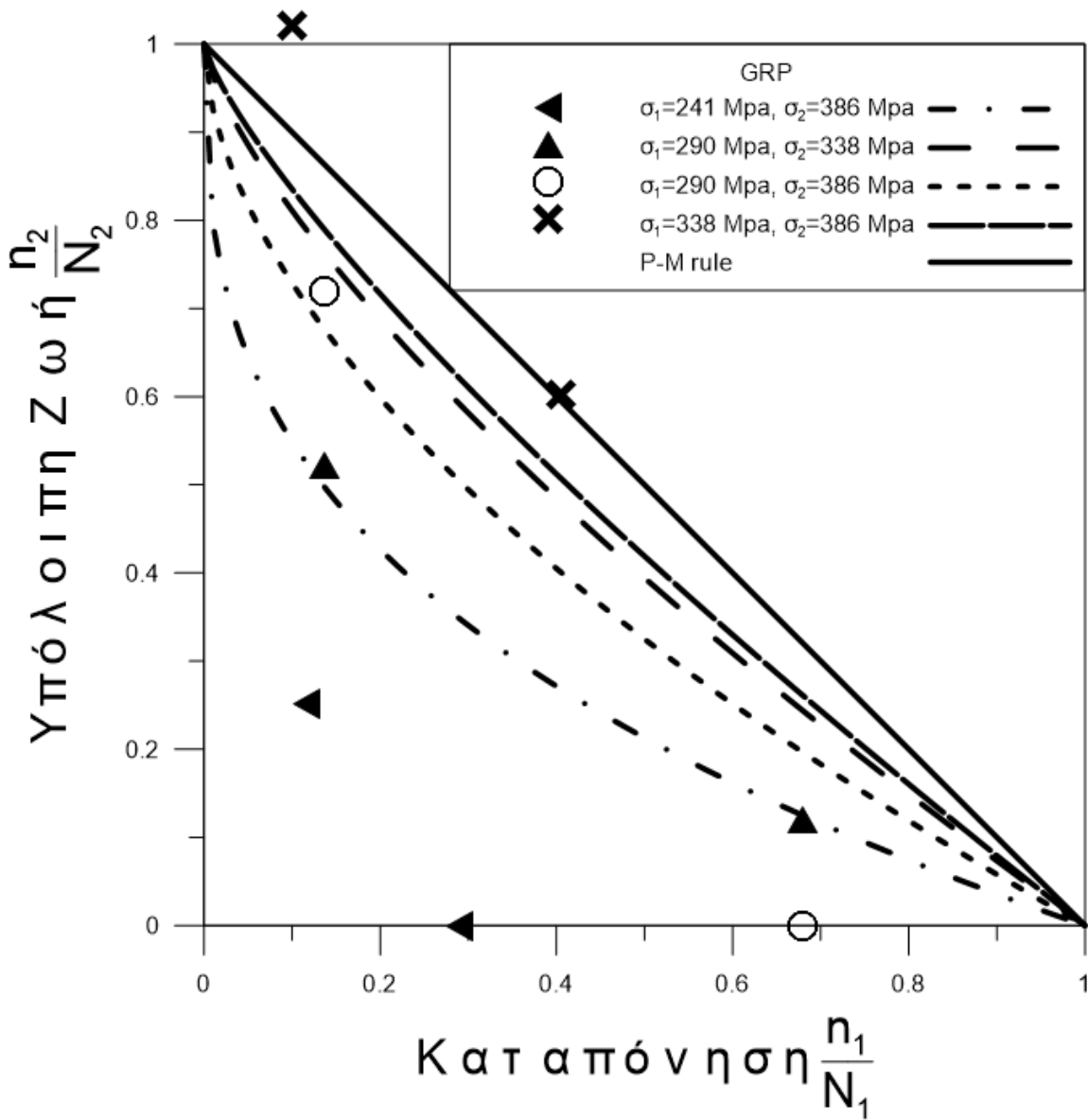
Διάγραμμα 7.1.3α



Διάγραμμα 7.1.3β



Διάγραμμα 7.1.3γ



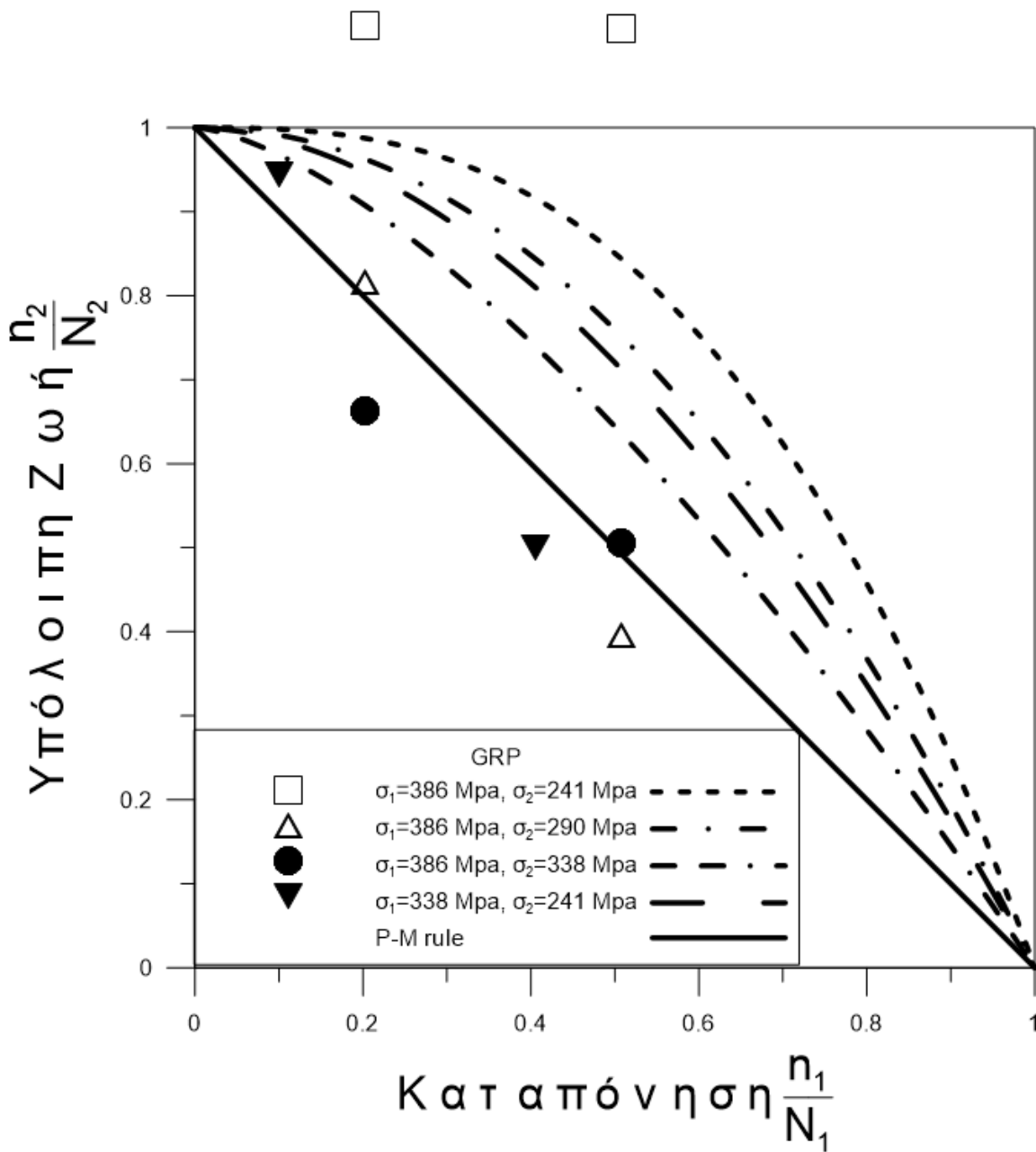
7.1.4 Κανόνας New Model για το υλικό glass/epoxy (GRP)

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_f που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.1.4:

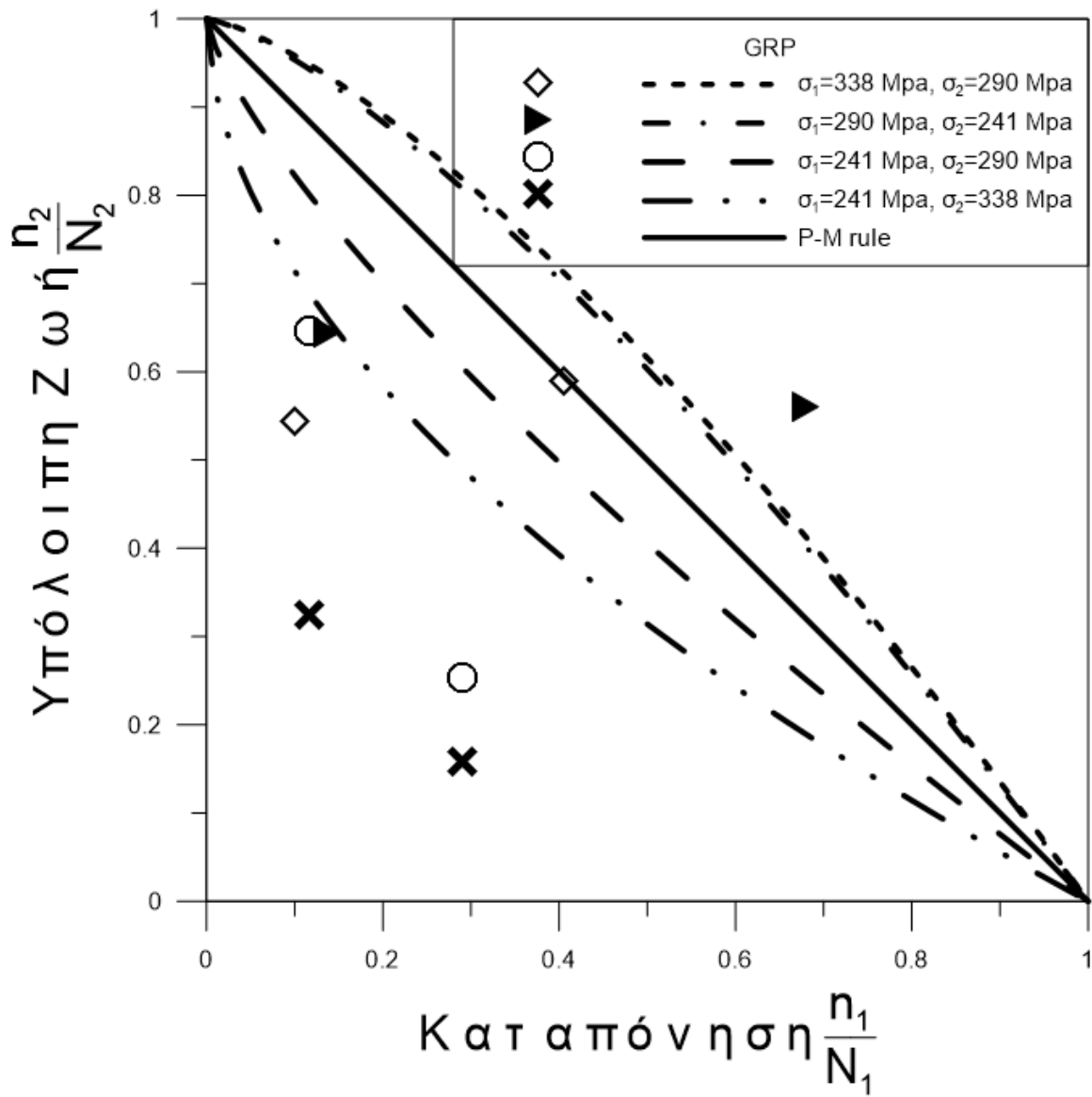
Πίνακας 7.1.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό GRP

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
386	241	2.740087382
386	290	2.056361973
386	338	1.490549750
338	241	1.838306559
338	290	1.379599690
290	241	1.332492731
241	290	0.750473130
241	338	0.543978911
241	386	0.364951865
290	338	0.724847945
290	386	0.486295707
338	386	0.670893407
σ_f (Mpa) = 506.0074223		

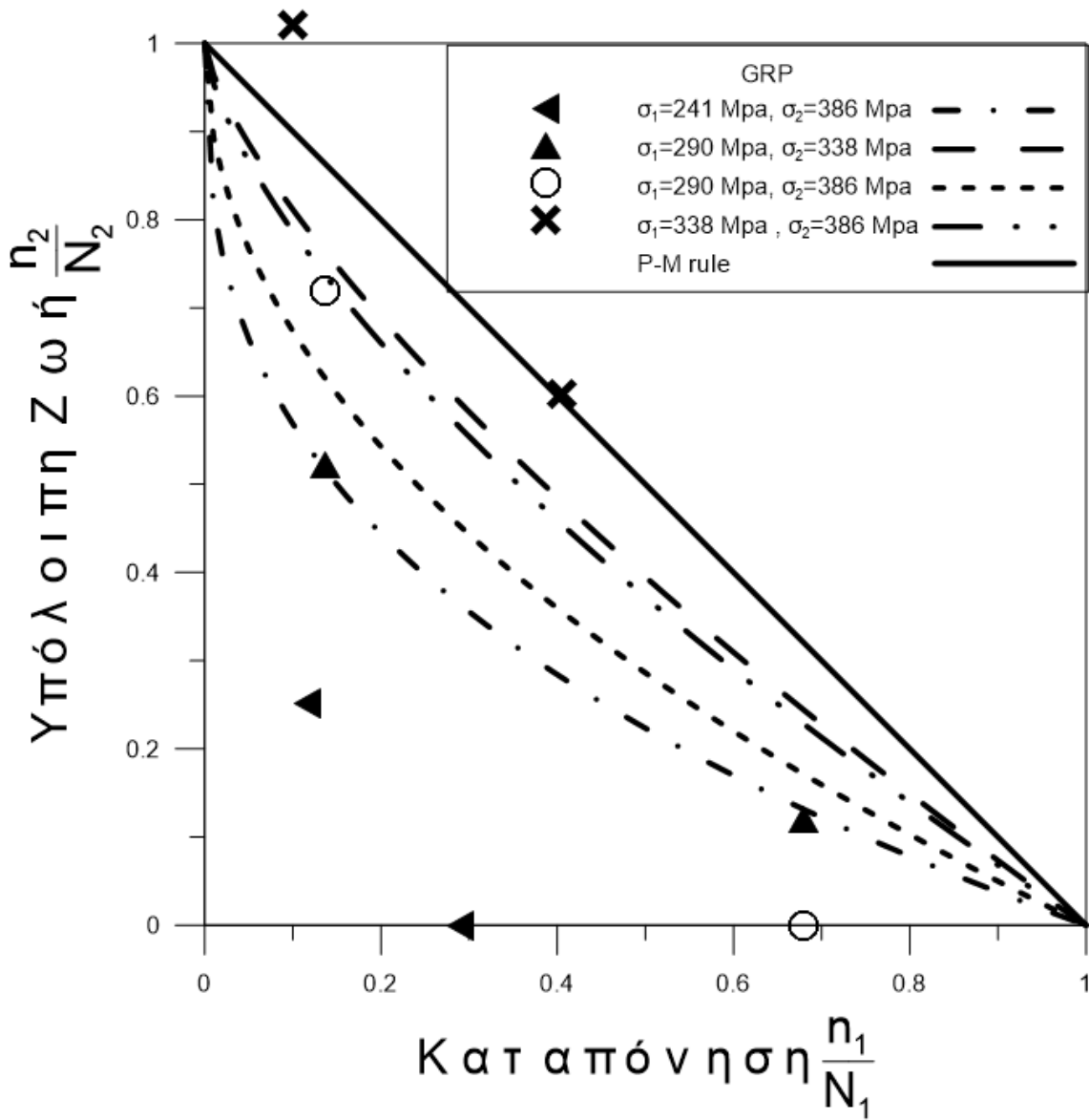
Διάγραμμα 7.1.4α



Διάγραμμα 7.1.4β

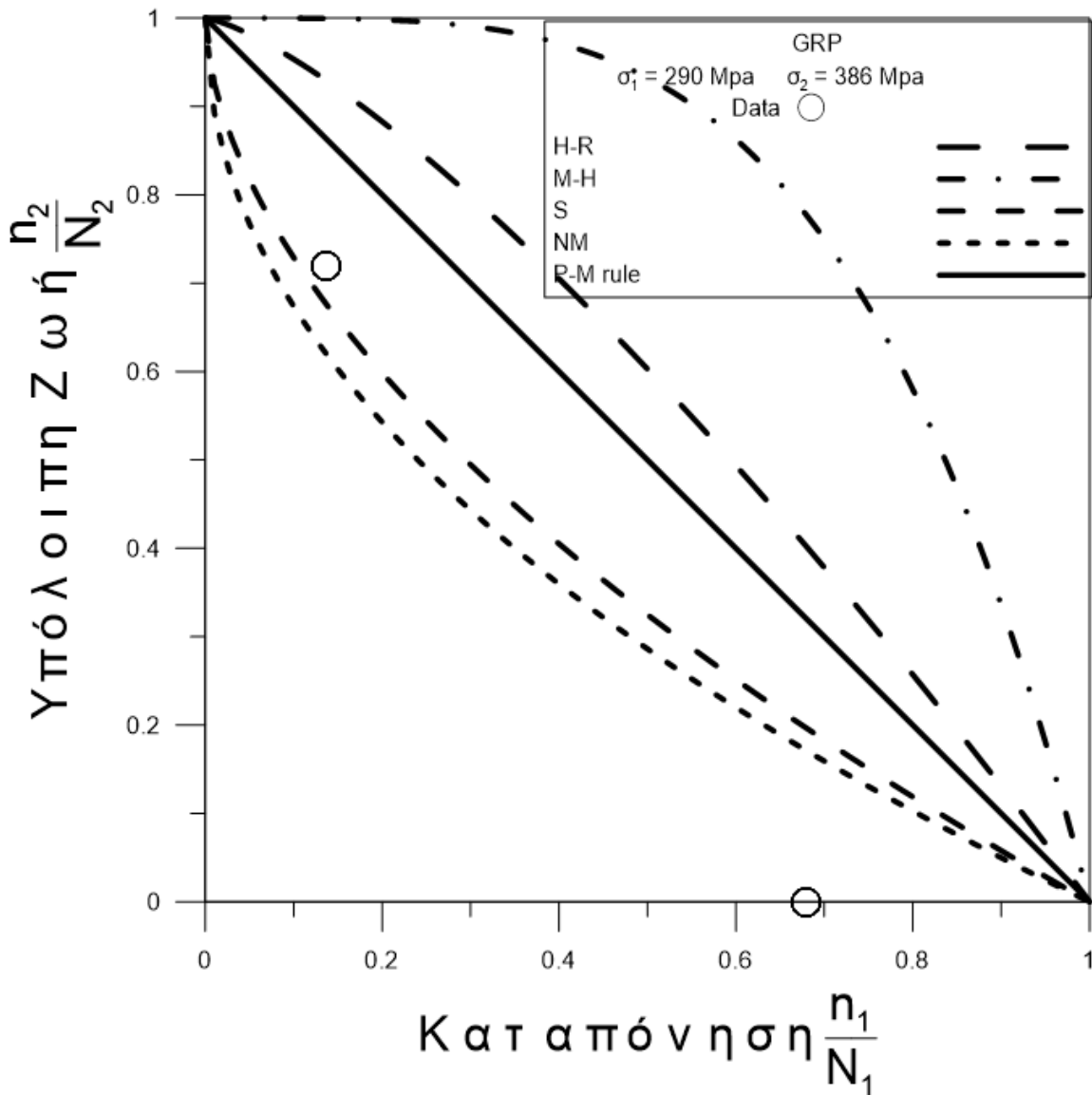


Διάγραμμα 7.1.4γ



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό GRP, παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 290$ Mpa και $\sigma_2 = 386$ Mpa και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.1.

Διάγραμμα 7.1: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.2 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

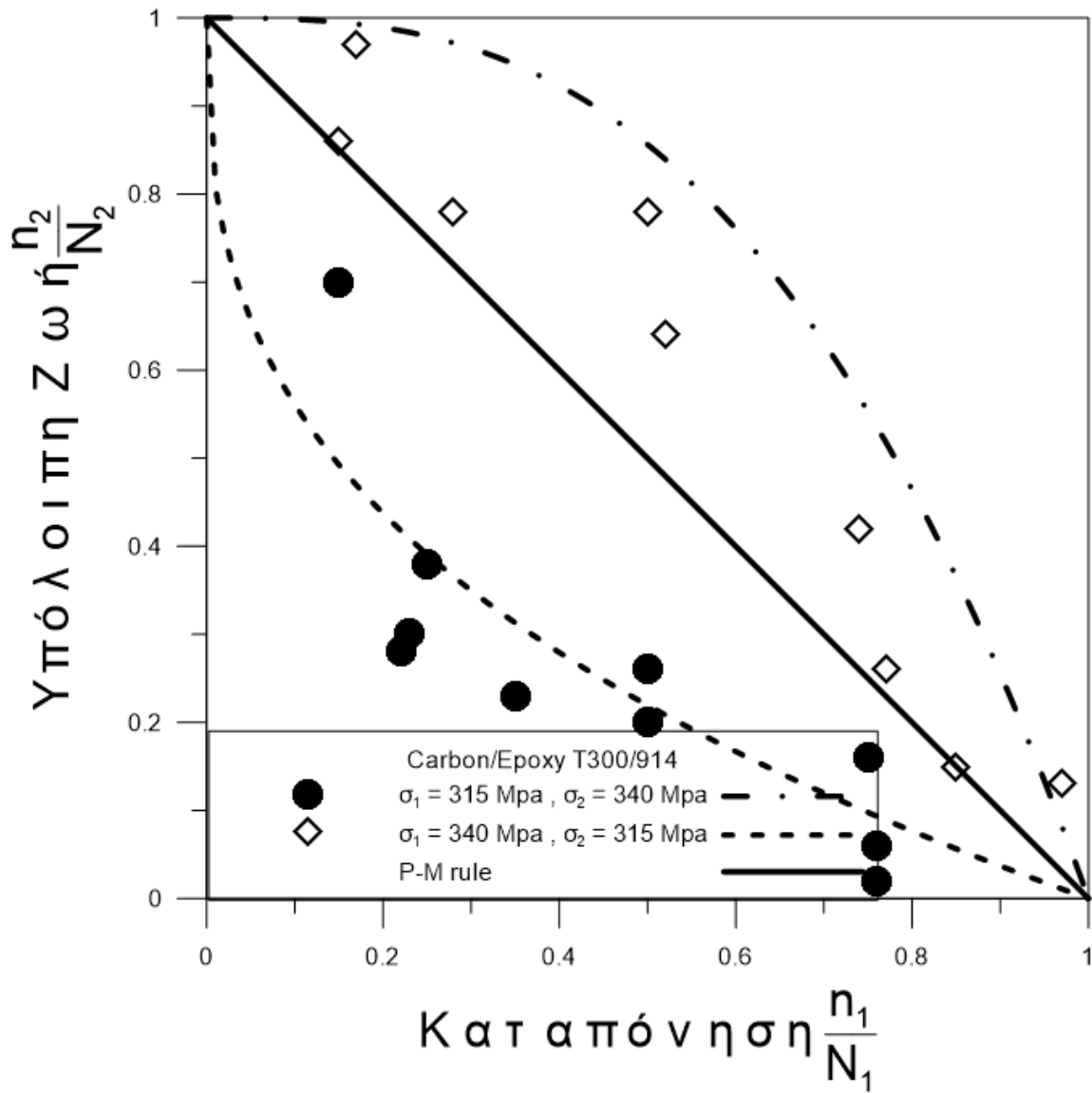
7.2.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.2.1:

Πίνακας 7.2.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
315	340	2.797129078
340	315	0.357509422
σ_{uts} (Mpa) = 422		

Διάγραμμα 7.2.1



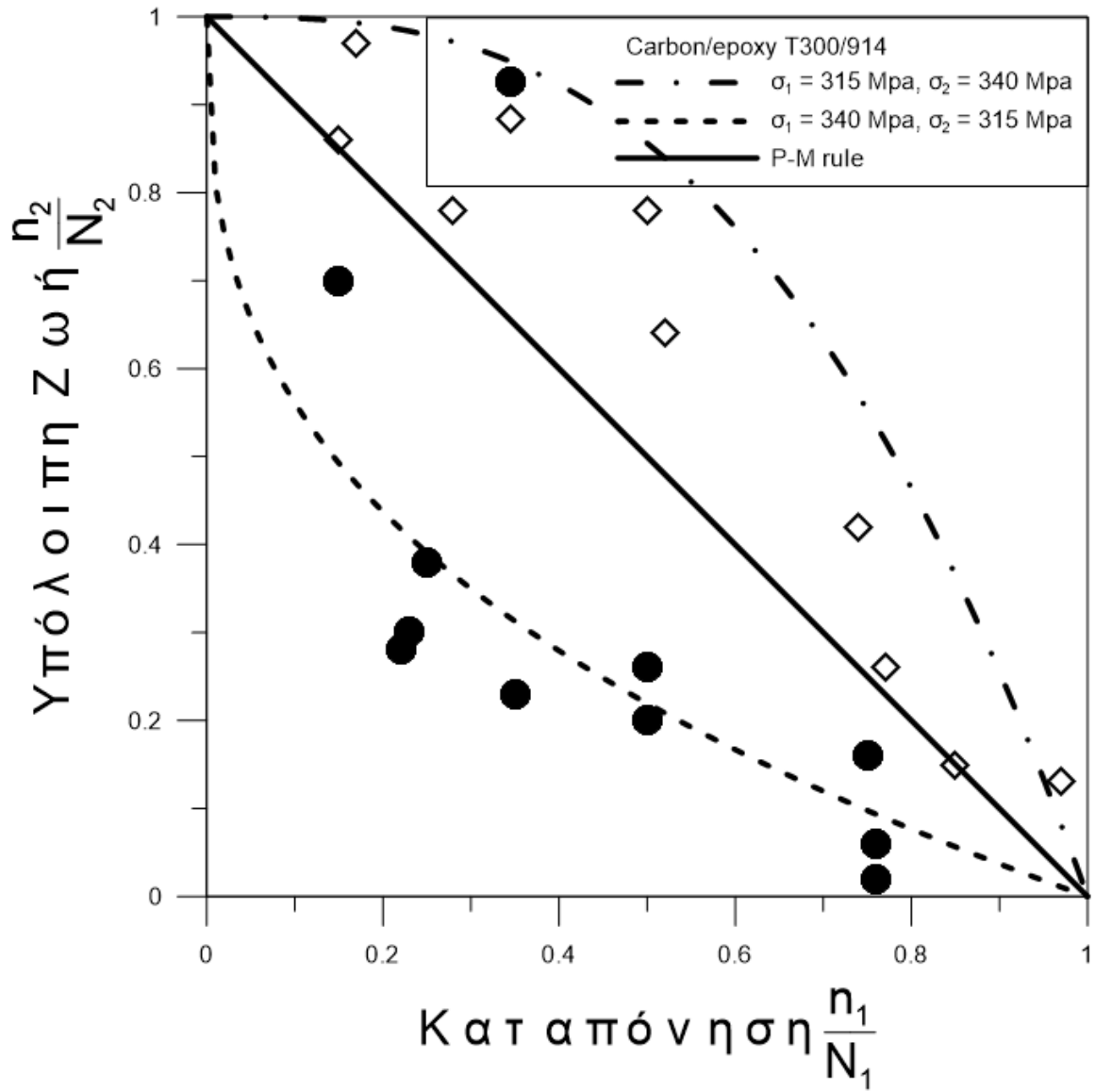
7.2.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.2.2:

Πίνακας 7.2.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
315	340	2.797129078
340	315	0.357509422

Διάγραμμα 7.2.2



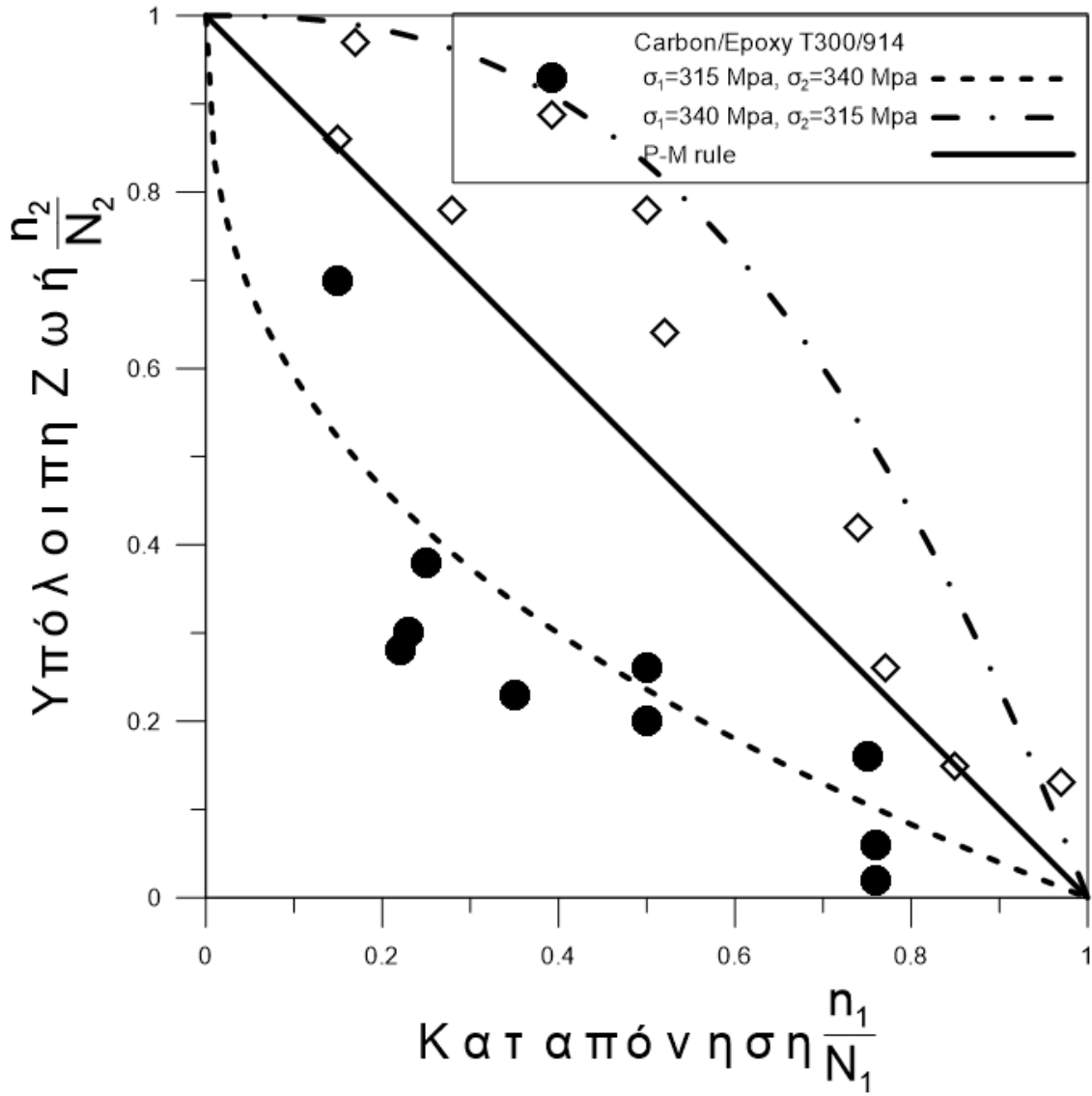
7.2.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.2.3:

Πίνακας 7.2.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
315	340	0.388753056
340	315	2.572327044
σ_d (Mpa) = 299.1		

Διάγραμμα 7.2.3



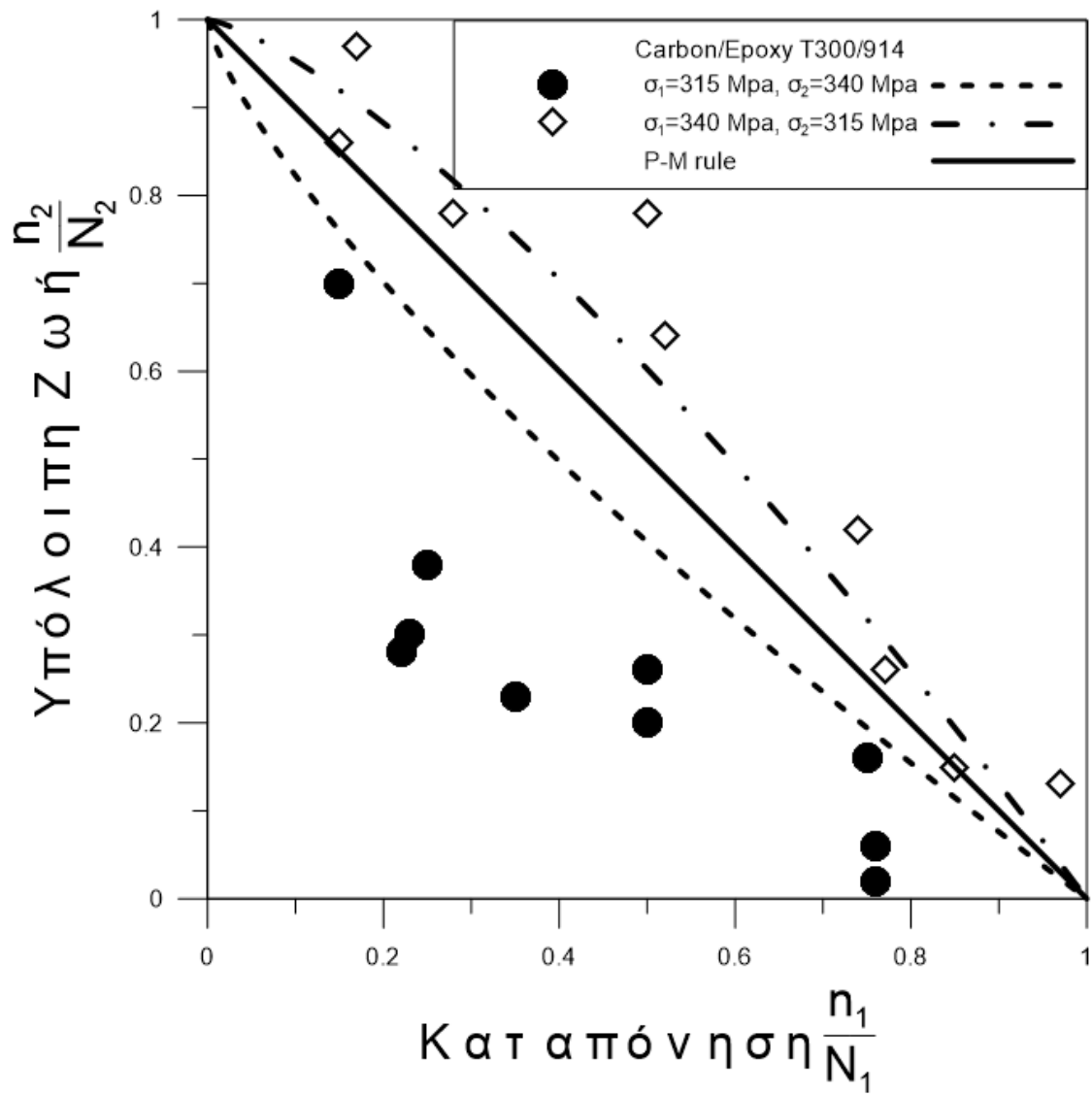
7.2.4 Κανόνας New Model για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_f που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.2.4:

Πίνακας 7.2.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό Carbon/Epoxy (T300/914)

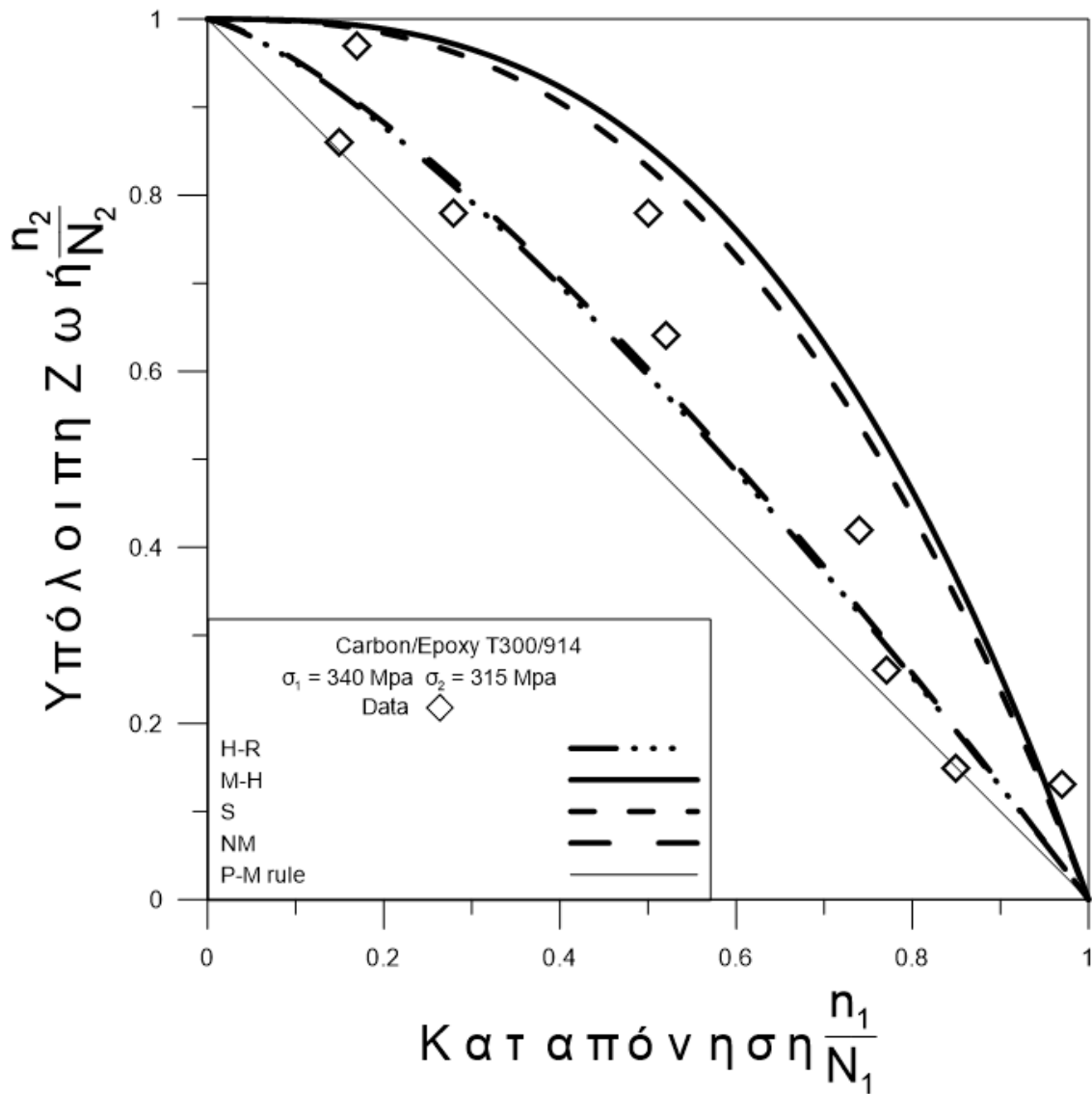
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
315	340	0.751431508
340	315	1.330793278
σ_f (Mpa) = 428.3002513		

Διάγραμμα 7.2.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό Carbon/Epoxy (T300/914), παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 340$ Mpa και $\sigma_2 = 315$ Mpa και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.2.

Διάγραμμα 7.2: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.3 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

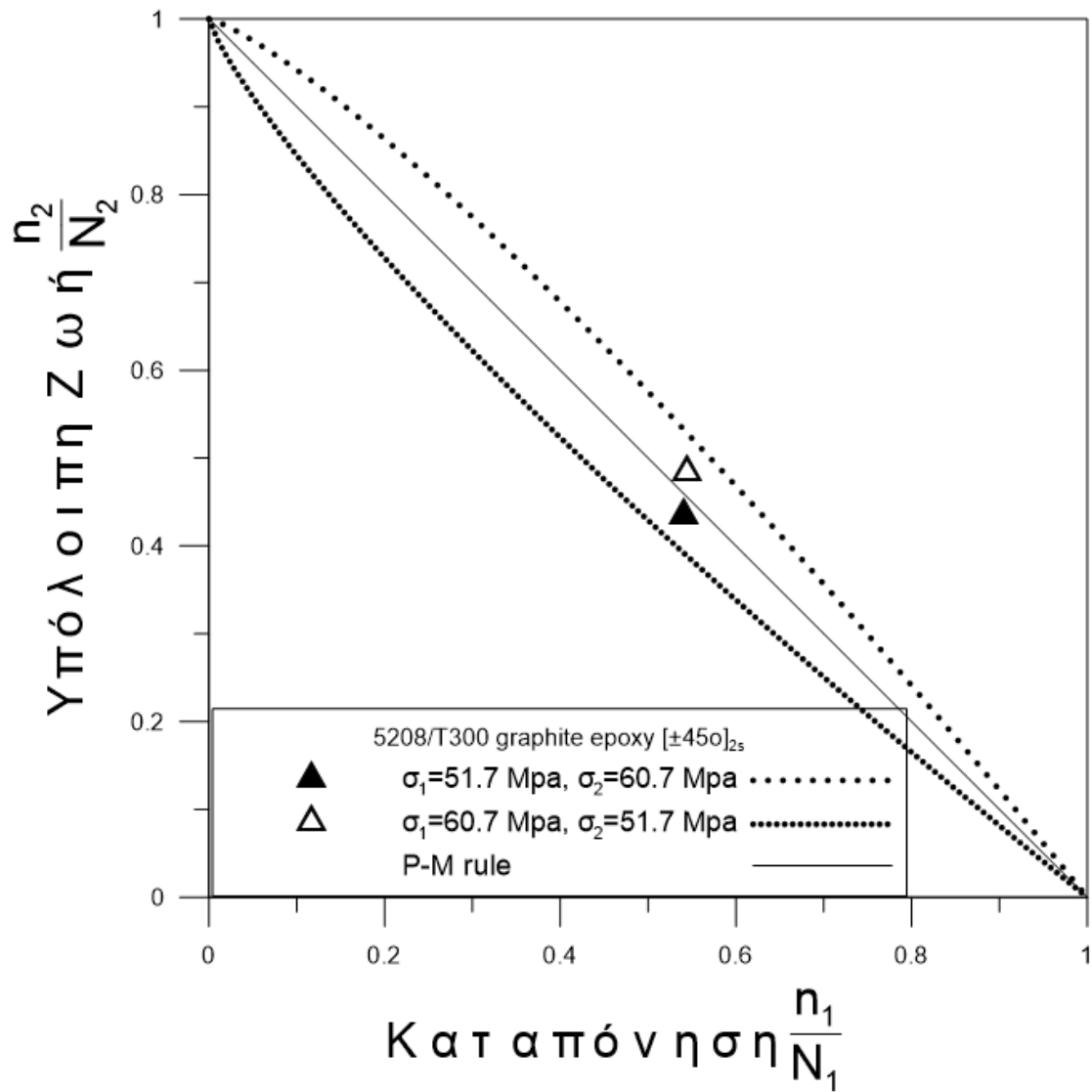
7.3.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.3.1:

Πίνακας 7.3.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
51.7	60.7	1.236371475
60.7	51.7	0.808818401
σ_{uts} (Mpa) = 98.788		

Διάγραμμα 7.3.1



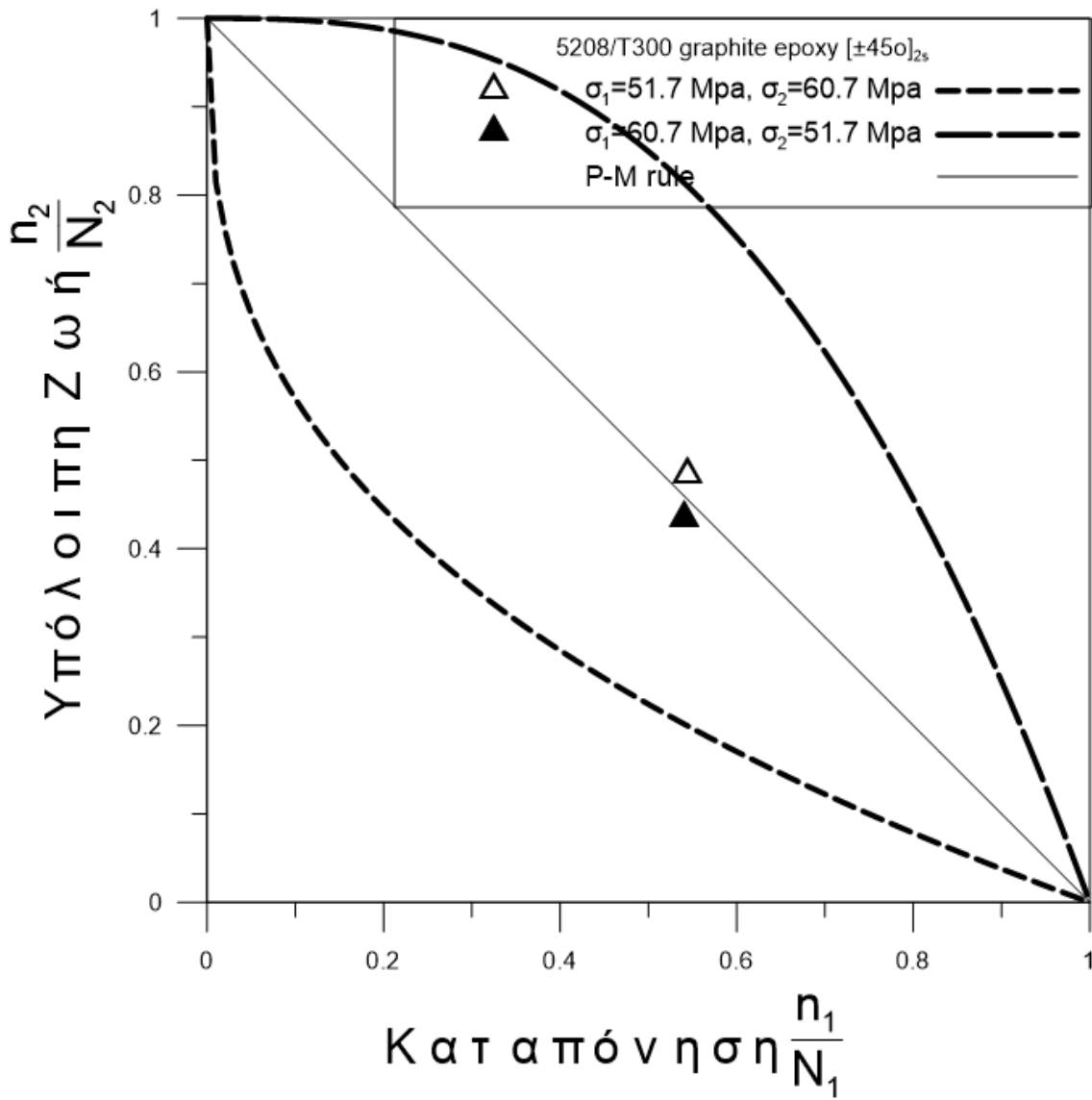
7.3.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.3.2:

Πίνακας 7.3.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
51.7	60.7	0.366049913
60.7	51.7	2.731867878

Διάγραμμα 7.3.2



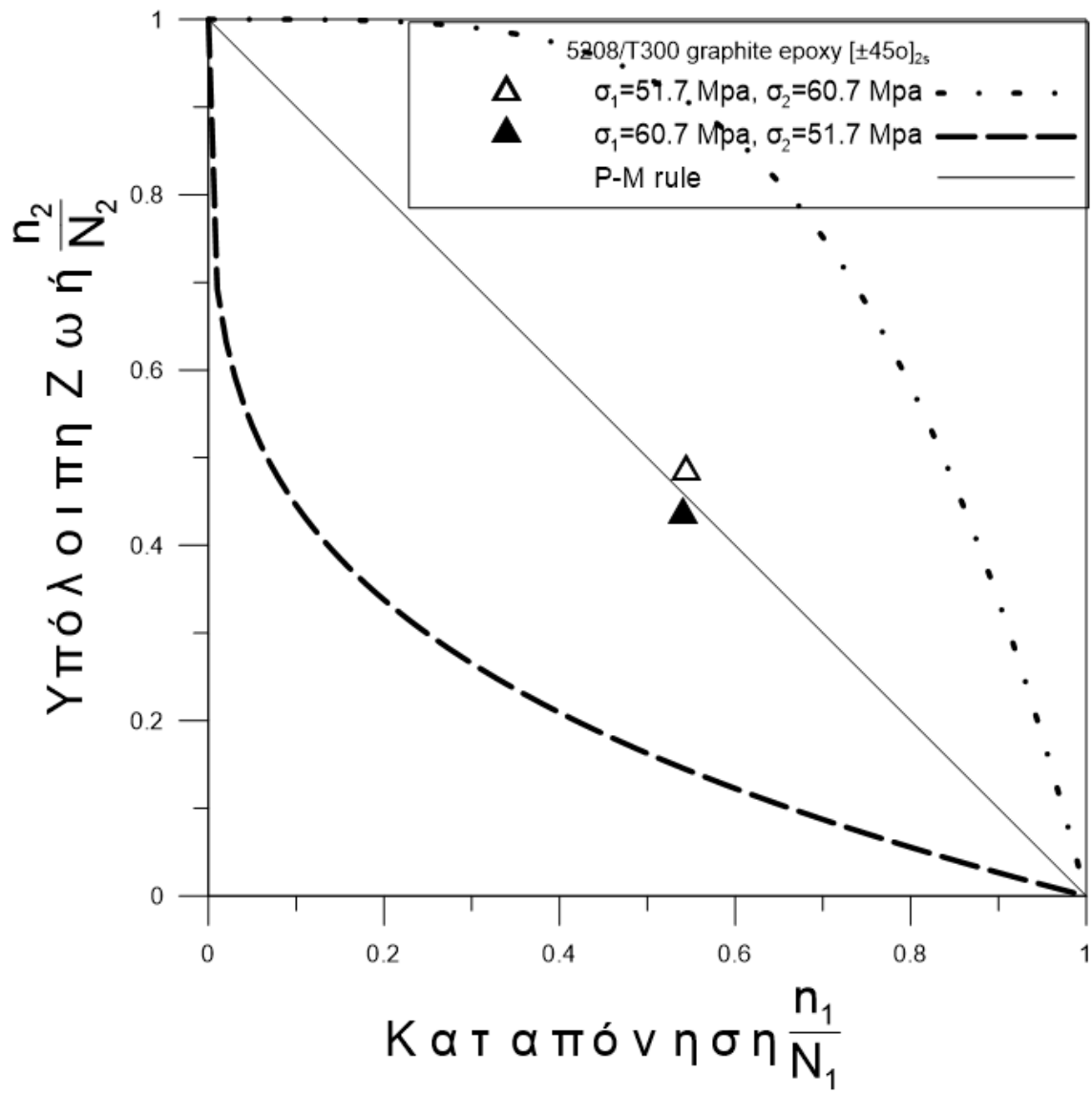
7.3.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.3.3:

Πίνακας 7.3.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
51.7	60.7	3.903225806
60.7	51.7	0.256198347
σ_d (Mpa) = 48.6		

Διάγραμμα 7.3.3



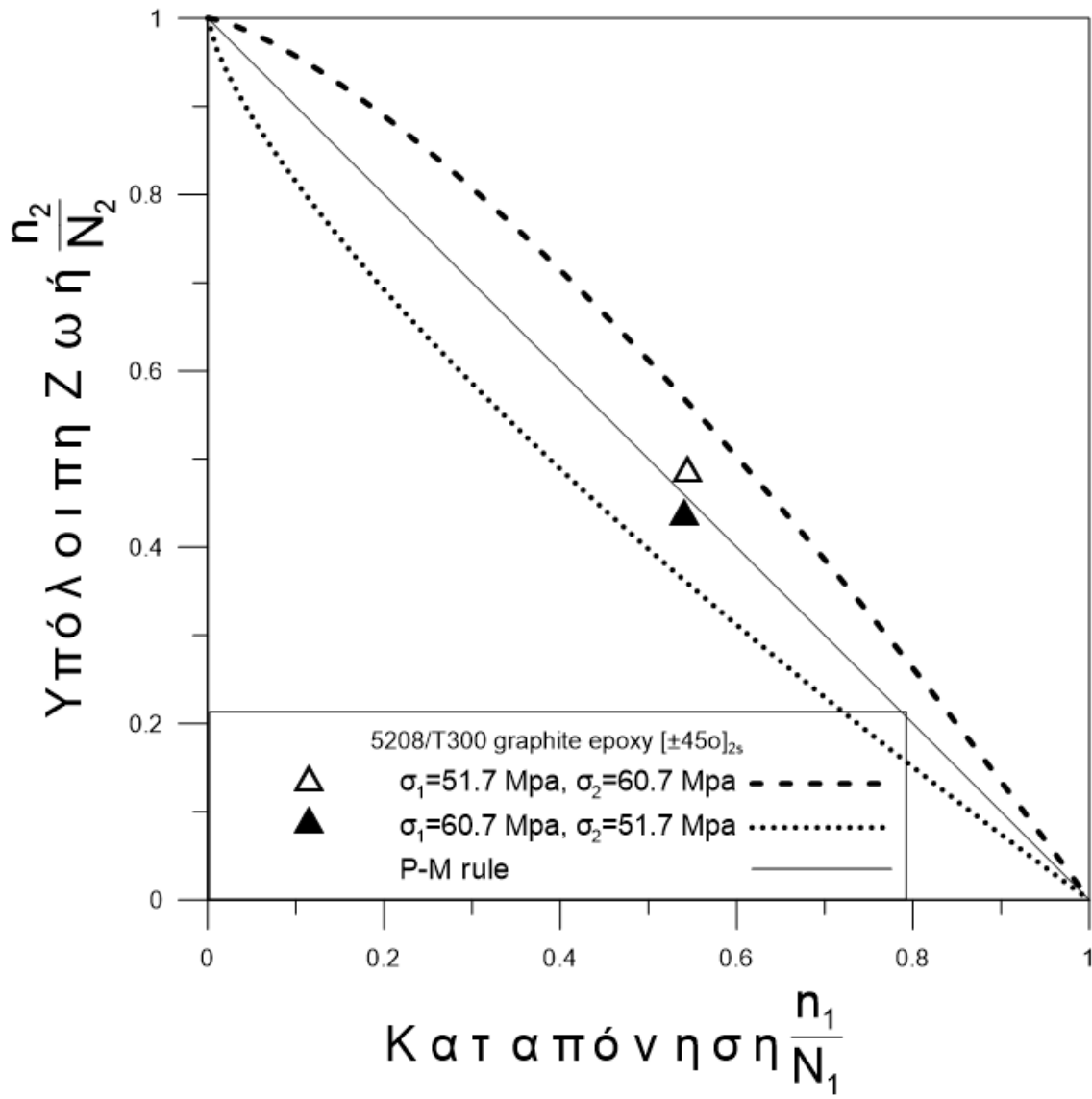
7.3.4 Κανόνας New Model για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_f που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.3.4:

Πίνακας 7.3.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 [$\pm 45^\circ$]_{2s}

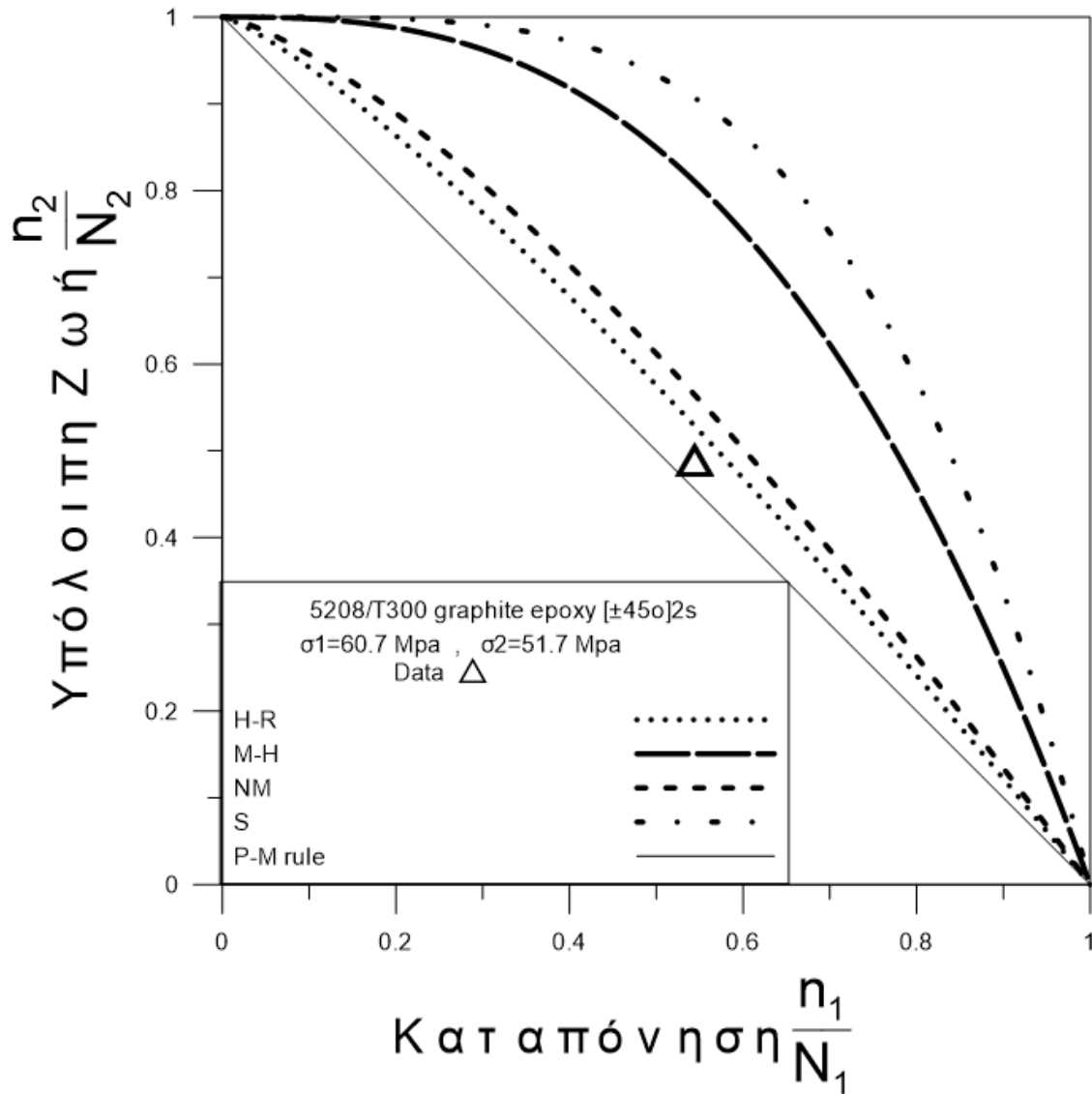
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
51.7	60.7	1.366371184
60.7	51.7	0.731865551
σ_f (Mpa) = 94.06495576		

Διάγραμμα 7.3.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό Graphite/Epoxy 5208/T300 $[\pm 45^\circ]_{2s}$, παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 60.7$ Mpa και $\sigma_2 = 51.7$ Mpa και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.3.

Διάγραμμα 7.3: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.4 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$

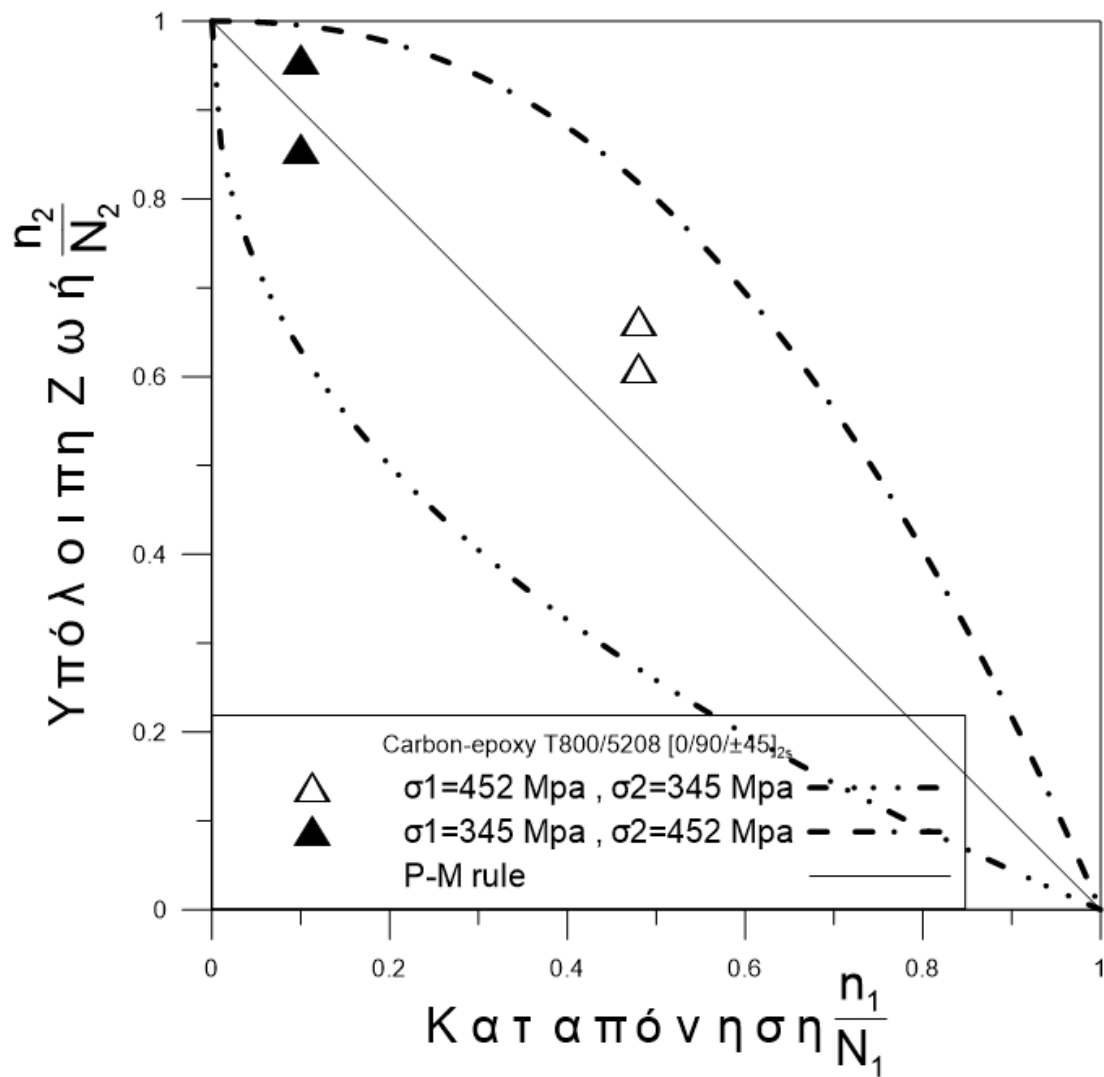
7.4.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.4.1:

Πίνακας 7.4.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
452	345	0.430851065
345	452	2.320987647
σ_{uts} (Mpa) = 533		

Διάγραμμα 7.4.1



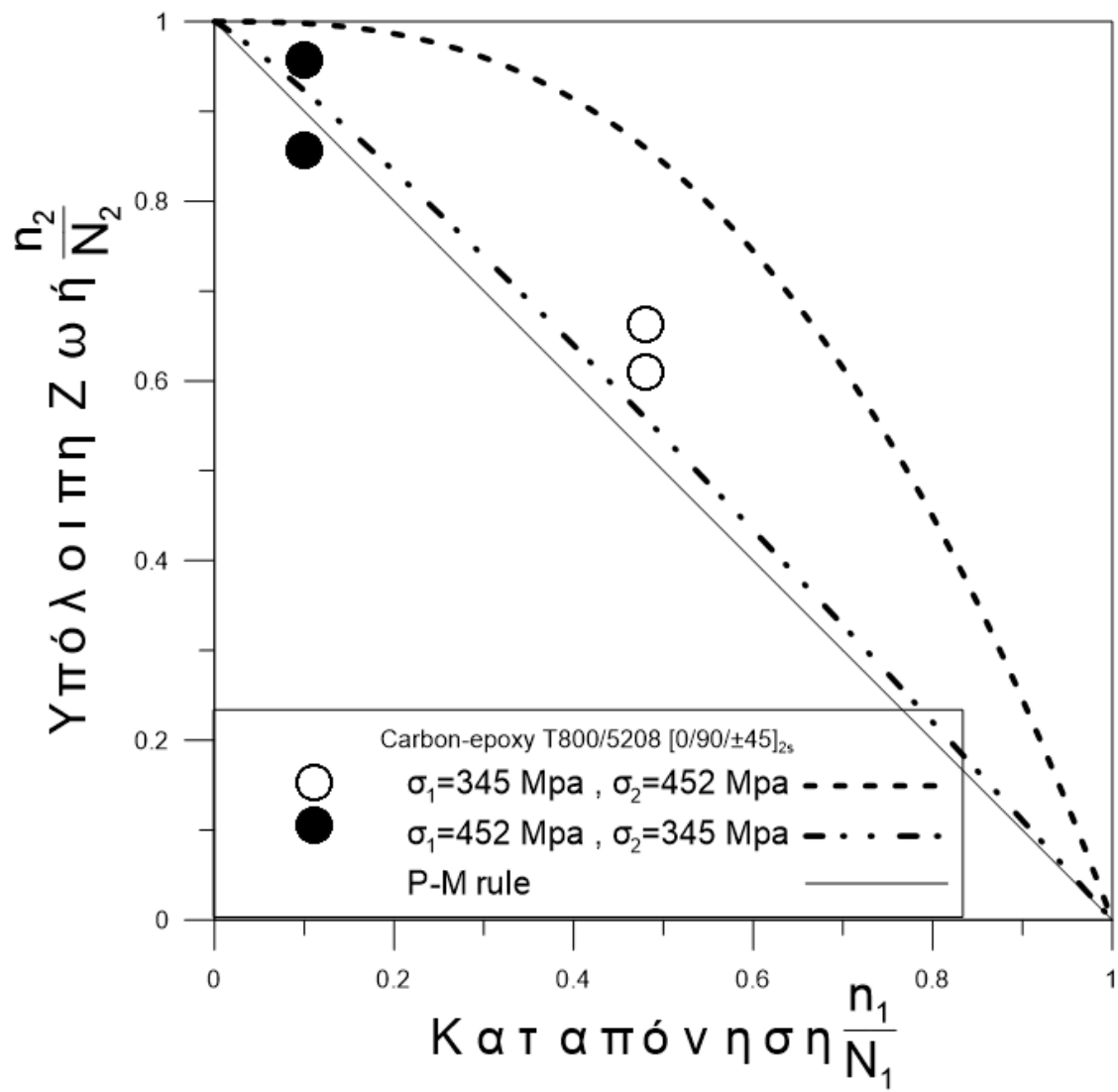
7.4.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.4.2:

Πίνακας 7.4.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
345	452	2.67157355
452	345	1.114109137

Διάγραμμα 7.4.2



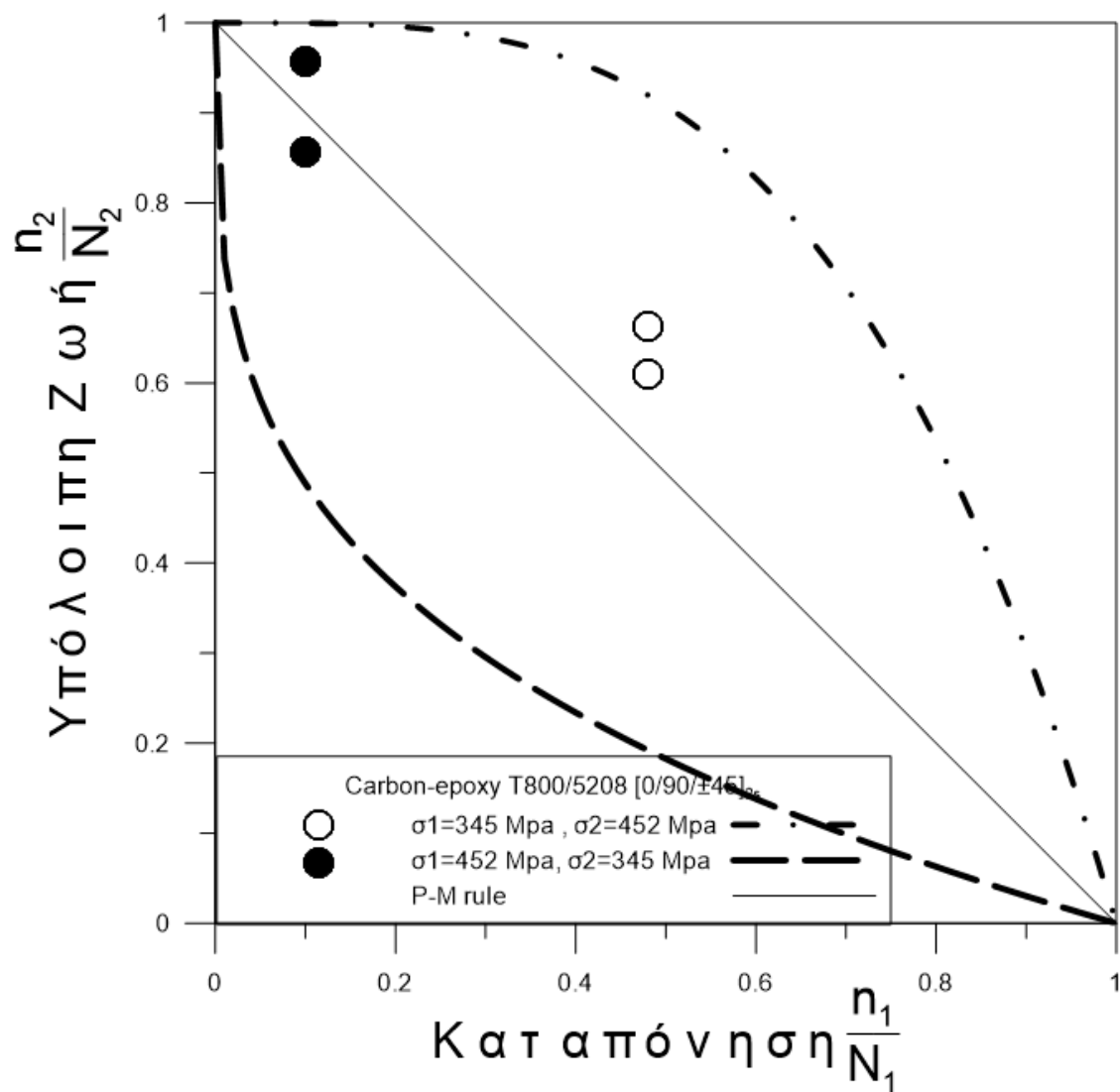
7.4.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.4.3:

Πίνακας 7.4.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
345	452	3.437357631
452	345	0.290921139
σ_d (Mpa) = 301.1		

Διάγραμμα 7.4.3



7.4.4 Κανόνας New Model για το υλικό T800/5208

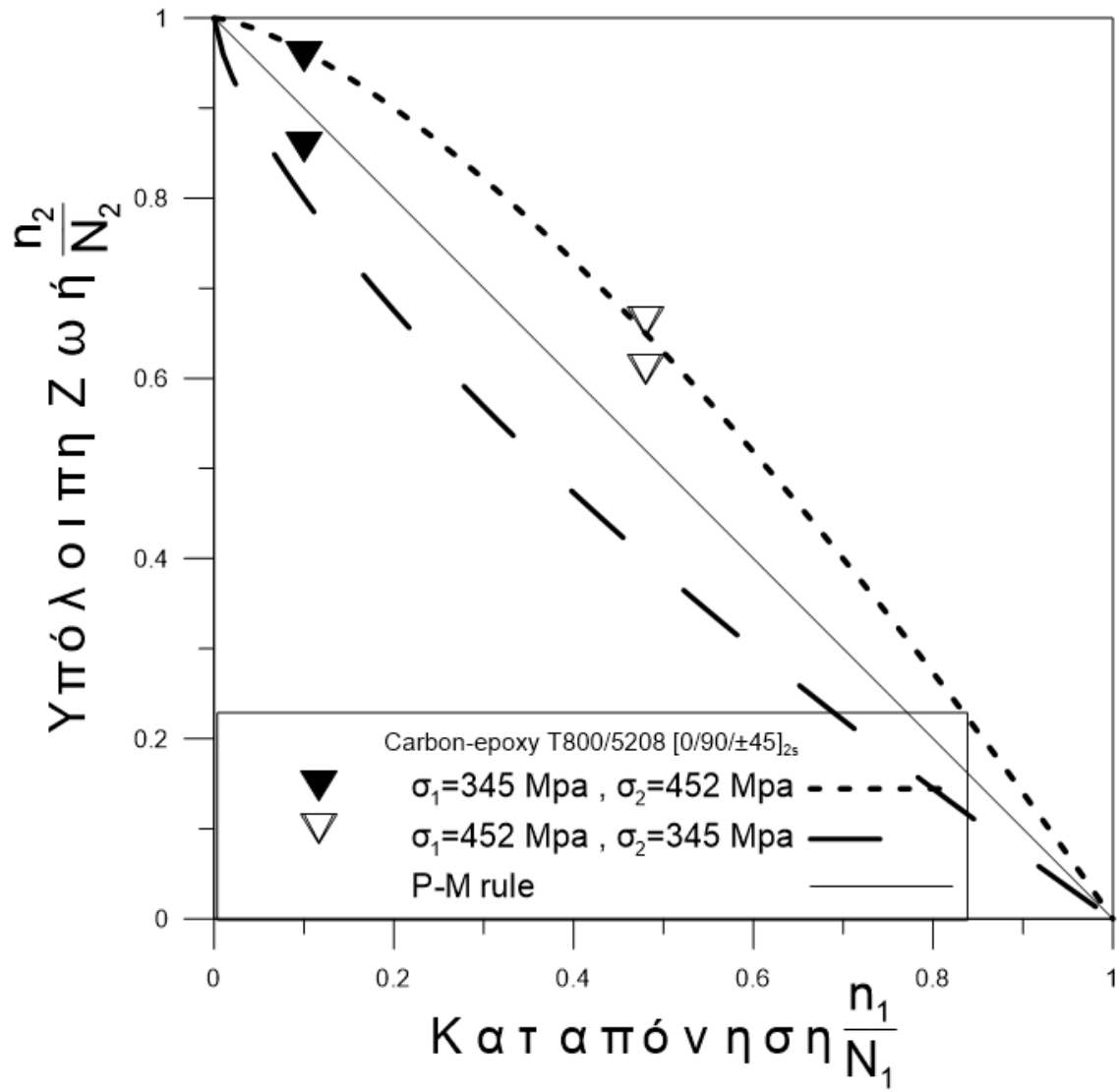
Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_r που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.4.4:

Πίνακας 7.4.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy [0°/90°/±45°]_{2s}

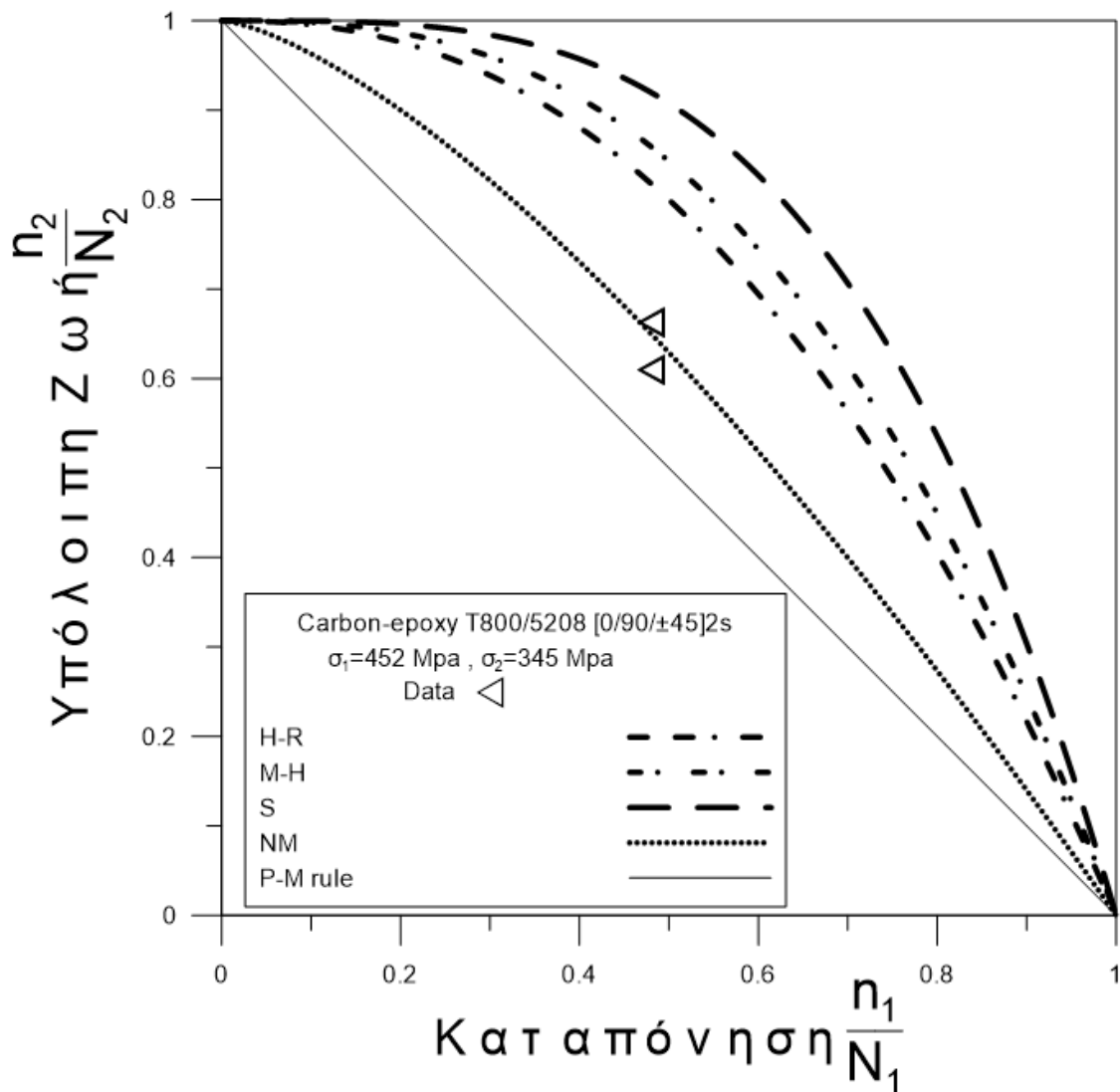
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
345	452	1.430592872
452	345	0.699010892
σ_r (Mpa) = 846.4444235		

Διάγραμμα 7.4.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$, παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 452$ Μpa και $\sigma_2 = 345$ Μpa και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.4.

Διάγραμμα 7.4: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.5 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

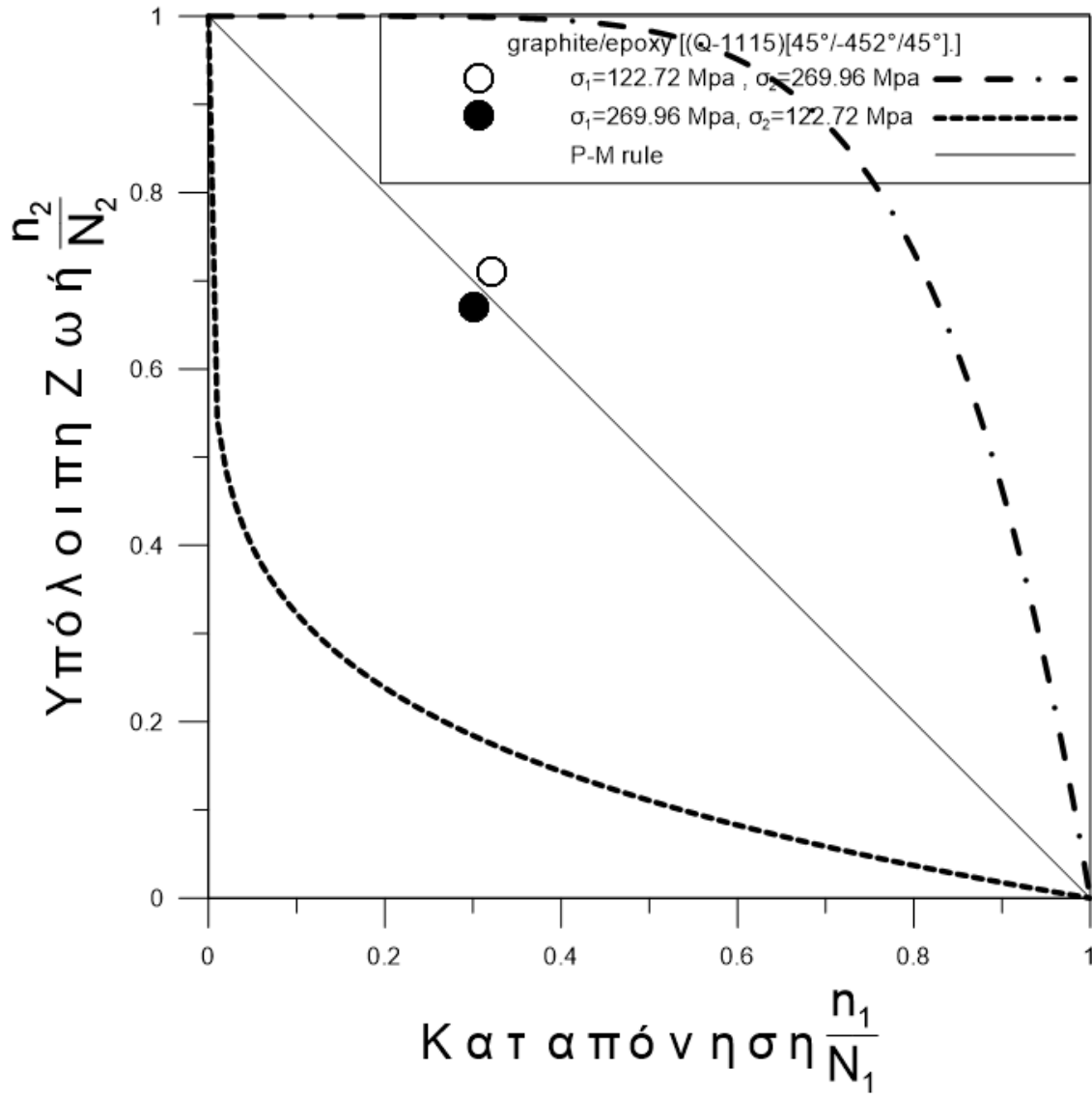
7.5.1 Κανόνας Hashin και Rotem για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.5.1:

**Πίνακας 7.5.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και το υλικό Q-1115
Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}**

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
122.72	269.96	5.907999949
269.96	122.72	0.169262019
σ_{uts} (Mpa) = 299.96		

Διάγραμμα 7.5.1



7.5.2 Κανόνας Manson και Halford για το υλικό Q-1115

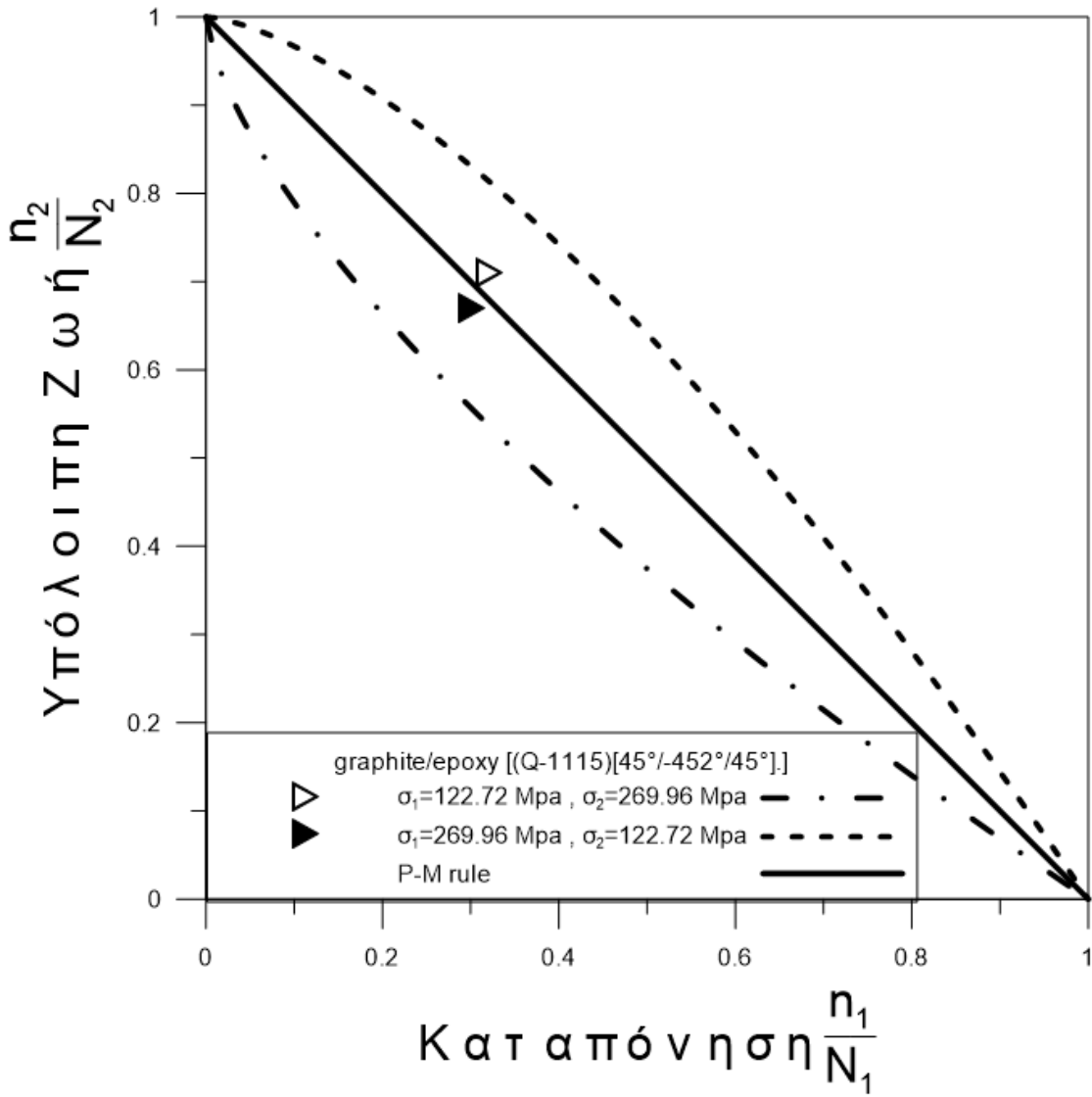
Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.5.2:

Πίνακας 7.5.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
122.72	269.96	0.676695
269.96	122.72	1.477771

Διάγραμμα 7.5.2



7.5.3 Κανόνας Subramanian για το υλικό Q-1115

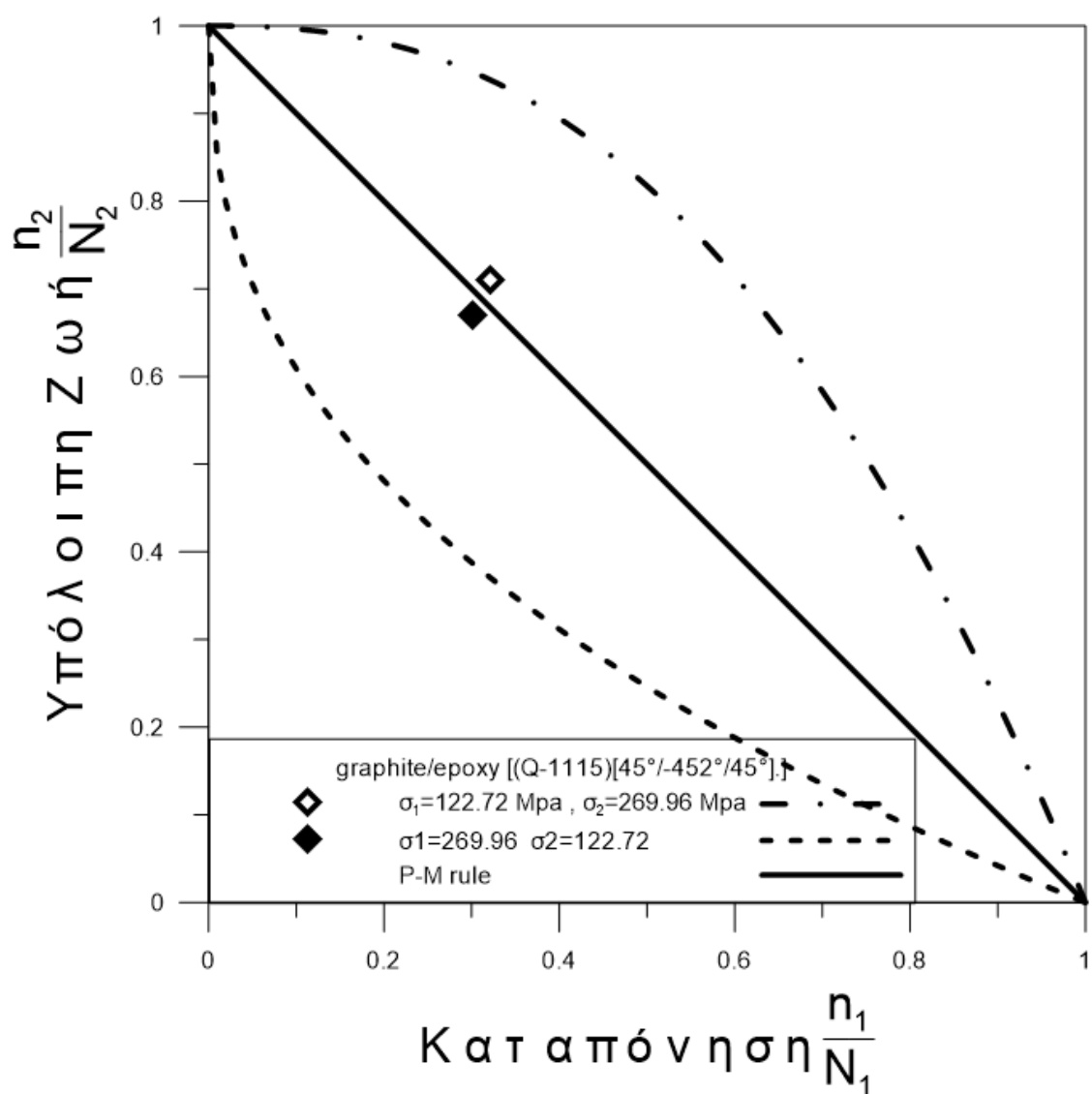
Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.5.3:

Πίνακας 7.5.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
122.72	269.96	2.45322
269.96	122.72	0.40763
σ_d (Mpa) = 21.4		

Διάγραμμα 7.5.3



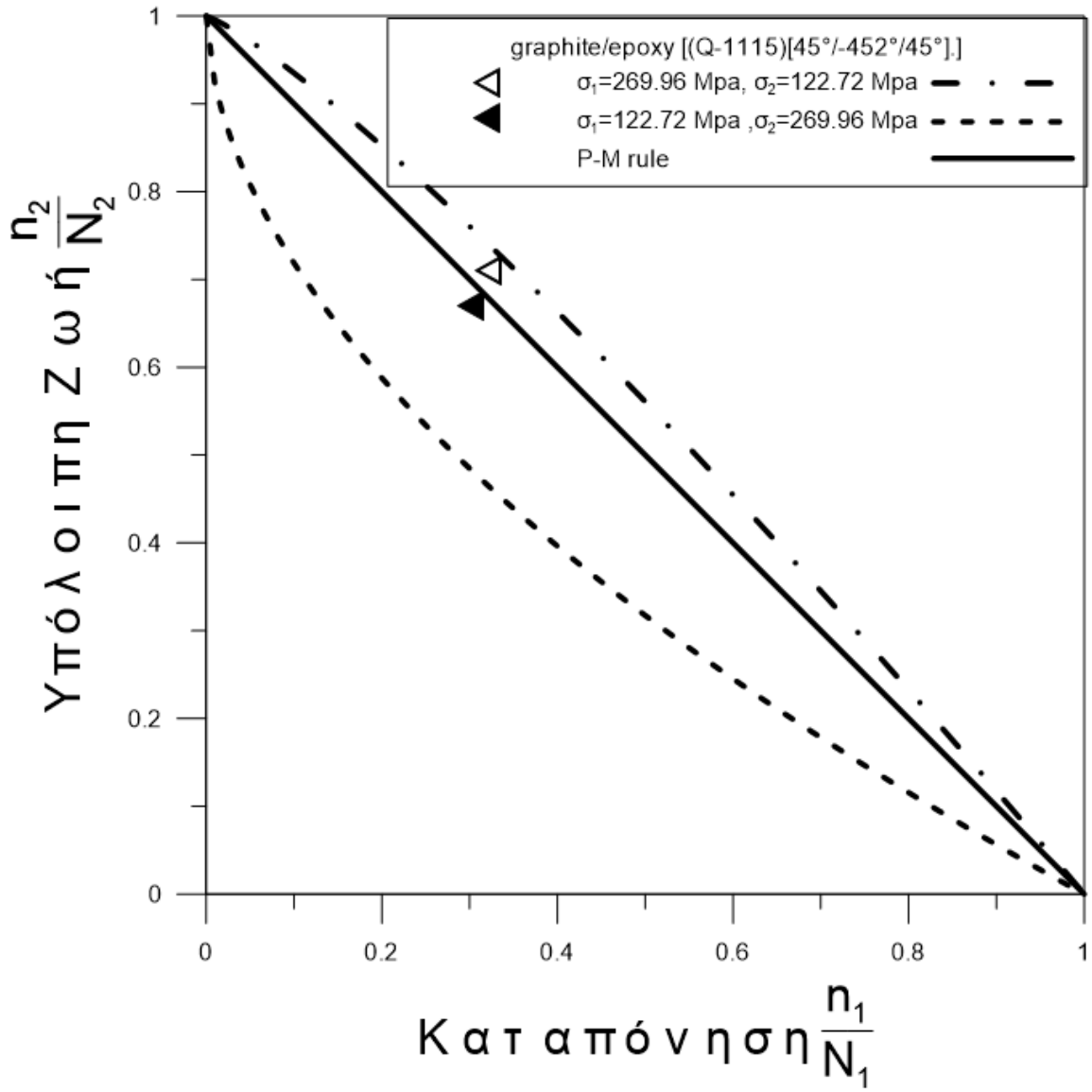
7.5.4 Κανόνας New Model για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_f που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.5.4:

Πίνακας 7.5.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}

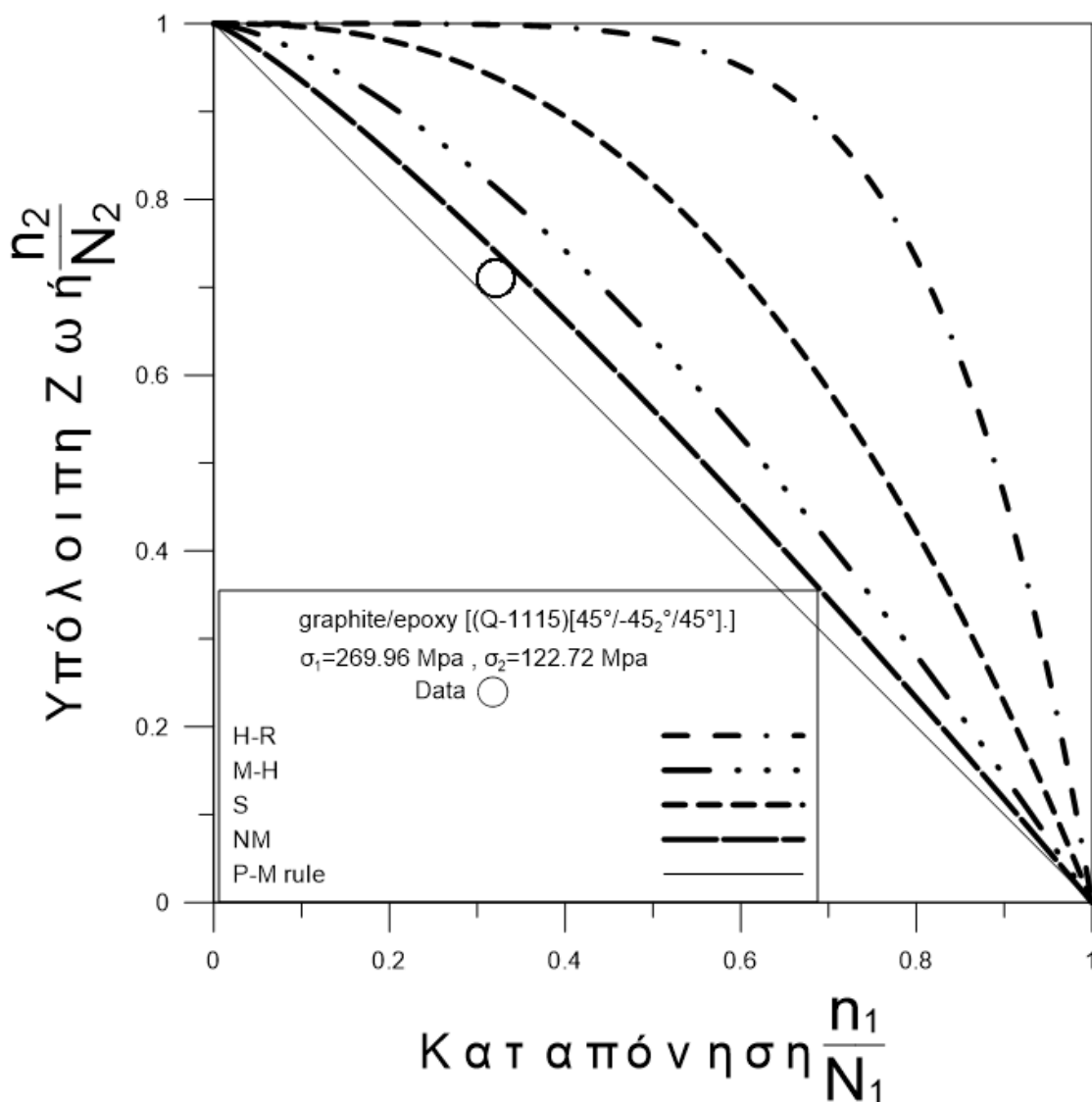
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
122.72	269.96	0.550742
269.96	122.72	1.187109
σ_f (Mpa) = 1102.299929		

Διάγραμμα 7.5.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy [+45°/-45₂°/±45°]_{2s}, παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 269.96$ Μπα και $\sigma_2 = 122.72$ Μπα και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.5.

Διάγραμμα 7.5: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.6 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s)

7.6.1 Κανόνας Hashin και Rotem AS-4PEEK ([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s)

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στους Πίνακες 7.6.1α, 7.6.1β, 7.6.1γ.:

Πίνακας 7.6.1α: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
131.274	154.44	0.909091
154.44	131.274	1.1
σ_{uts} (Mpa) = 386.1		

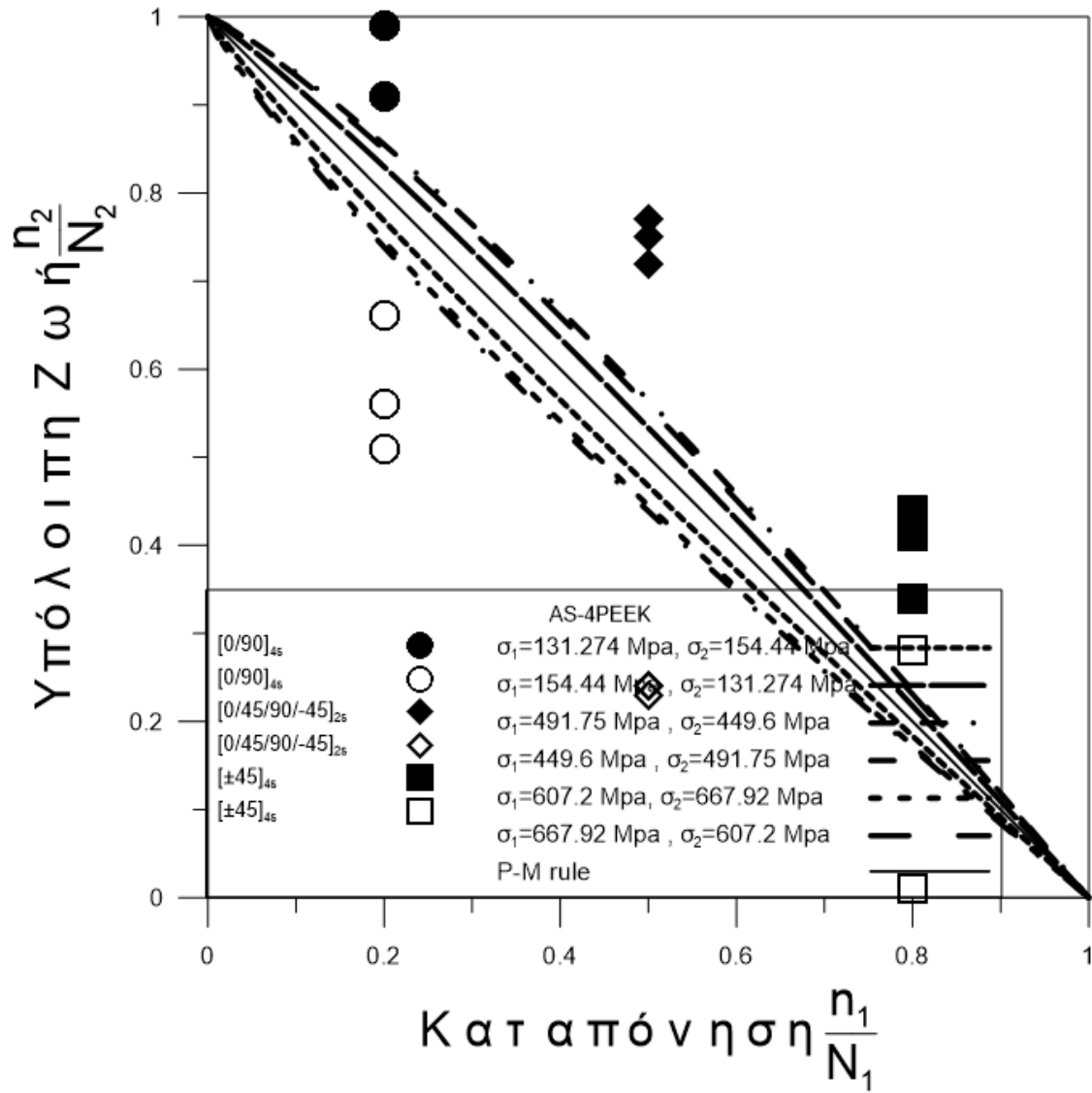
Πίνακας 7.6.1β: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό AS-4PEEK ([0/45/90/-45]2s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
491.75	449.6	1.2
449.6	491.75	0.83333
σ_{uts} (Mpa) = 702.5		

Πίνακας 7.6.1γ: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό AS-4PEEK ([±45]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
607.2	667.92	0.85
667.92	607.2	1.17647
σ_{uts} (Mpa) = 1012		

Διάγραμμα 7.6.1



7.6.2 Κανόνας Manson και Halford AS-4PEEK

([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s)

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στους Πίνακες 7.6.2α, 7.6.2β, 7.6.2γ.:

Πίνακας 7.6.2α: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
131.274	154.44	1.288269
154.44	131.274	0.776235

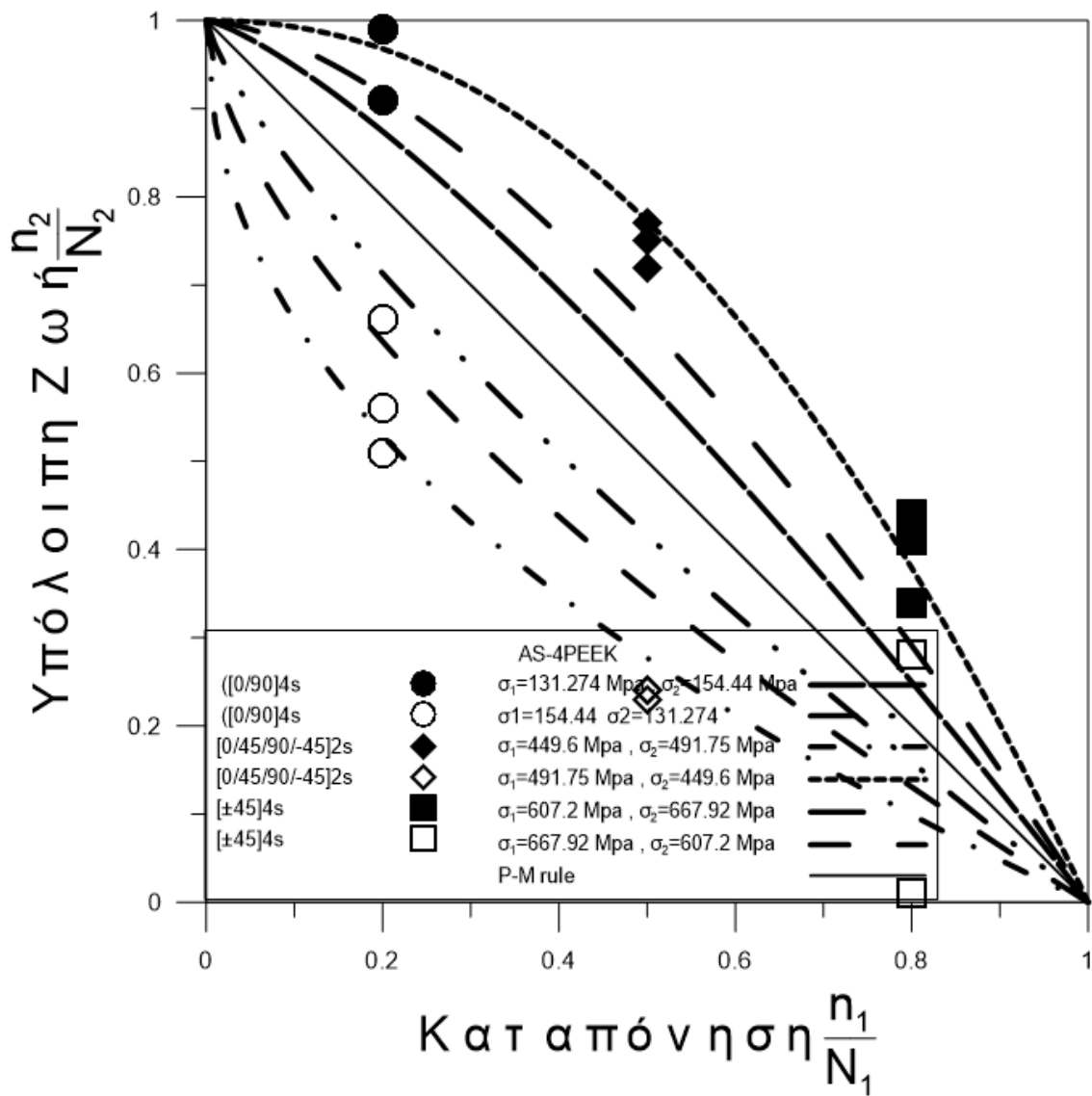
Πίνακας 7.6.2β: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό AS-4PEEK ([0/45/90/-45]2s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
491.75	449.6	2.13581
449.6	491.75	0.46821

Πίνακας 7.6.2γ: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό AS-4PEEK ([±45]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
607.2	667.92	1.54243
667.92	607.2	0.62797

Διάγραμμα 7.6.2



7.6.3 Κανόνας Subramanian AS-4PEEK ([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s)

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στους Πίνακες 7.6.3α, 7.6.3β, 7.6.3γ.:

Πίνακας 7.6.3α: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
131.274	154.44	1.771583
154.44	131.274	0.564467
σ_d (Mpa) = 101.25		

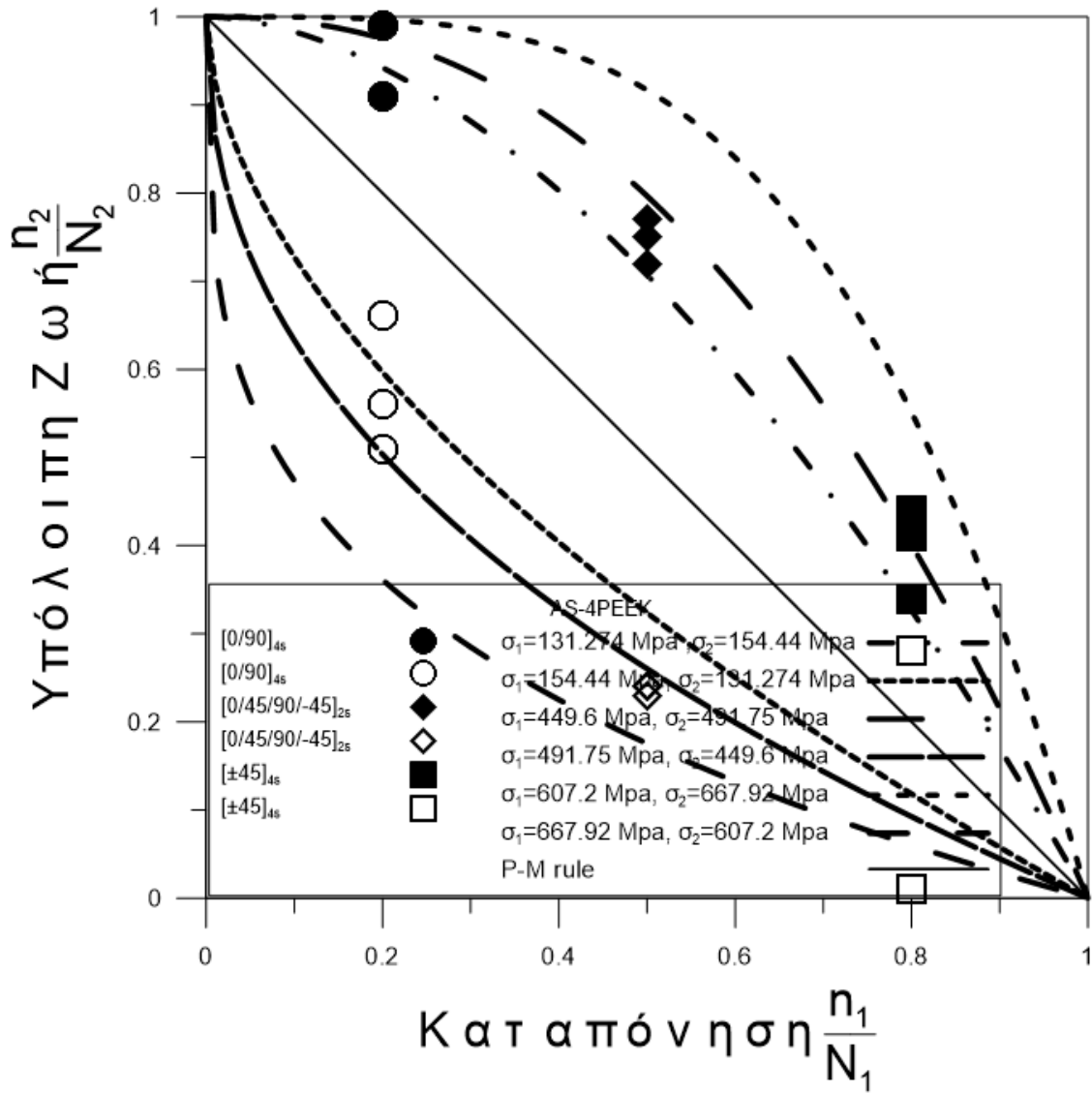
Πίνακας 7.6.3β: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό AS-4PEEK ([0/45/90/-45]2s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
491.75	449.6	0.43514
449.6	491.75	2.29812
σ_d (Mpa) = 417.13		

Πίνακας 7.6.3γ: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό AS-4PEEK ([±45]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
607.2	667.92	3.58934
667.92	607.2	0.2786
σ_d (Mpa) = 583.75		

Διάγραμμα 7.6.3



7.6.4 Κανόνας New Model AS-4PEEK ([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s)

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_f που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στους Πίνακες 7.6.4α, 7.6.4β, 7.6.4γ.:

Πίνακας 7.6.4α: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
131.274	154.44	1.115731
154.44	131.274	0.896273
σ_f (Mpa) = 628.9748014		

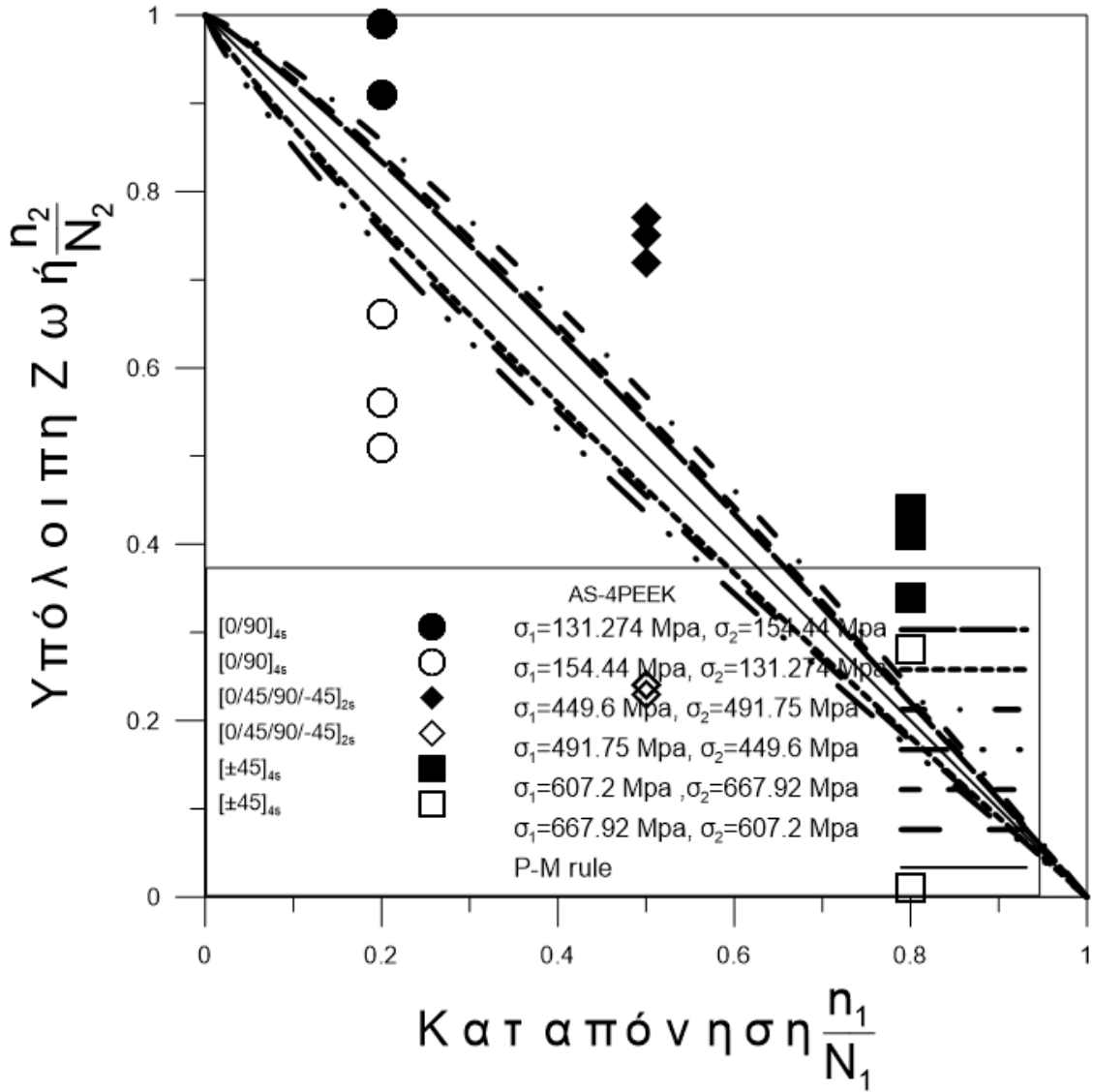
Πίνακας 7.6.4β: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό AS-4PEEK ([0/45/90/-45]2s)

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
491.75	449.6	0.82561
449.6	491.75	1.21123
σ_f (Mpa) = 751.5936925		

Πίνακας 7.6.4γ: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό AS-4PEEK ([±45]4s)

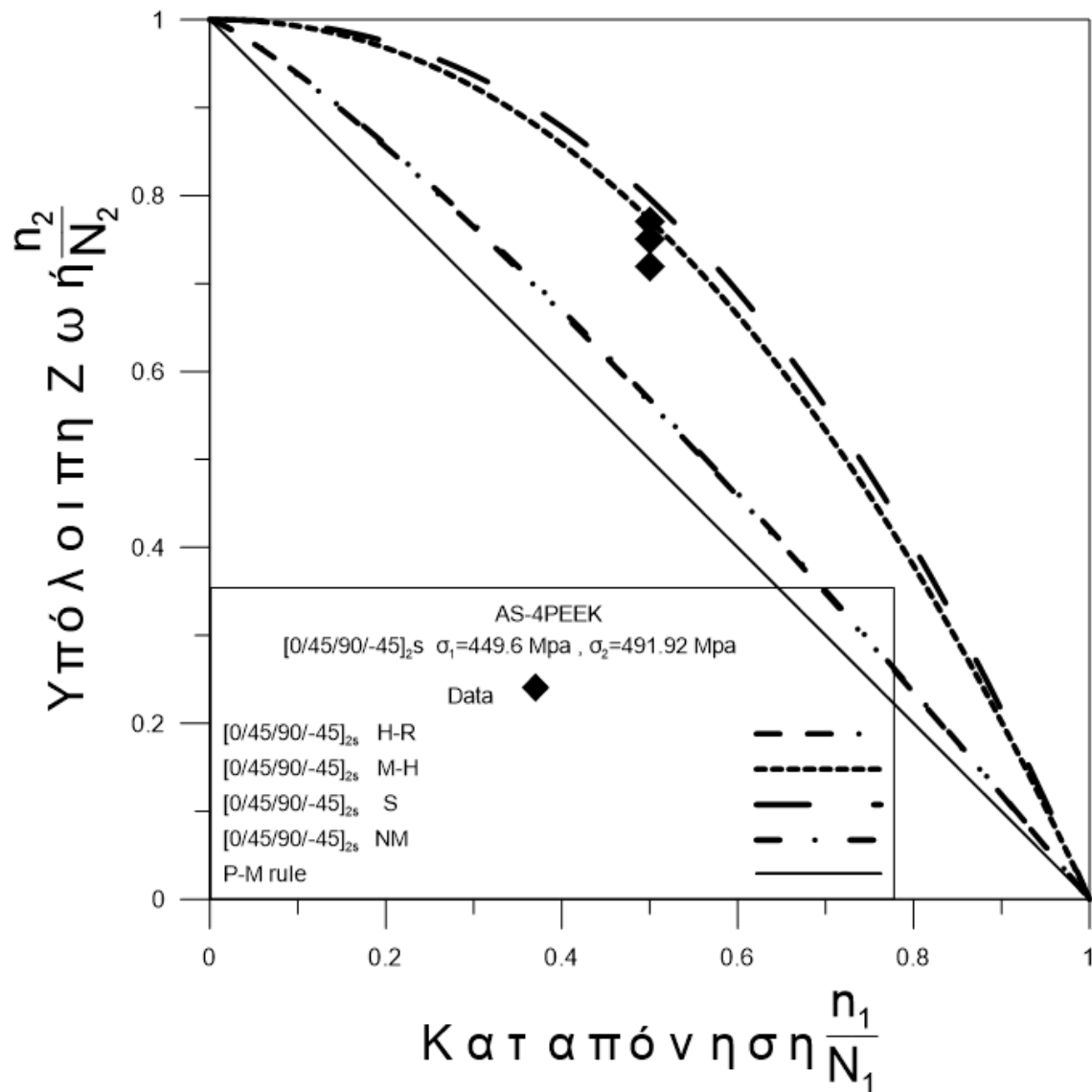
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
607.2	667.92	1.14228
667.92	607.2	0.87544
σ_f (Mpa) = 1305.114012		

Διάγραμμα 7.6.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό AS-4PEEK ([0/90]4s,[0/45/90/-45]2s,[±45]4s), παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 449.6$ Mpa και $\sigma_2 = 491.92$ Mpa και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.6.

Διάγραμμα 7.6: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



7.7 Προβλέψεις των μοντέλων για το υλικό [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

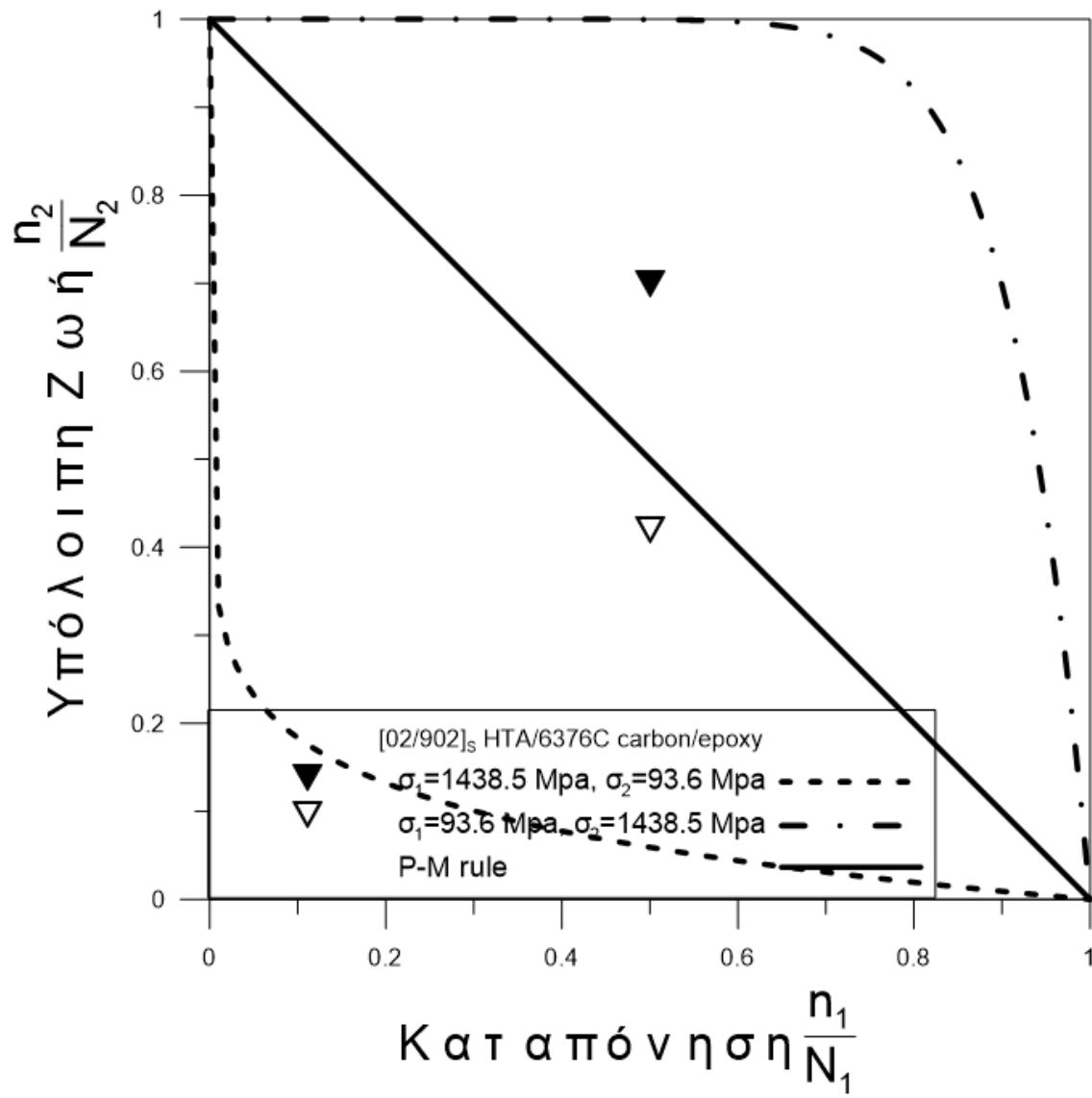
7.7.1 Κανόνας Hashin και Rotem [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

Είναι η σχέση (5.6). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.7) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το όριο θραύσης, που προέκυψε στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.7.1:

Πίνακας 7.7.1: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Hashin-Rotem και για το υλικό [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
1438.5	93.6	0.088105852
93.6	1438.5	11.34998385
σ_{uts} (Mpa) = 1563.587		

Διάγραμμα 7.7.1



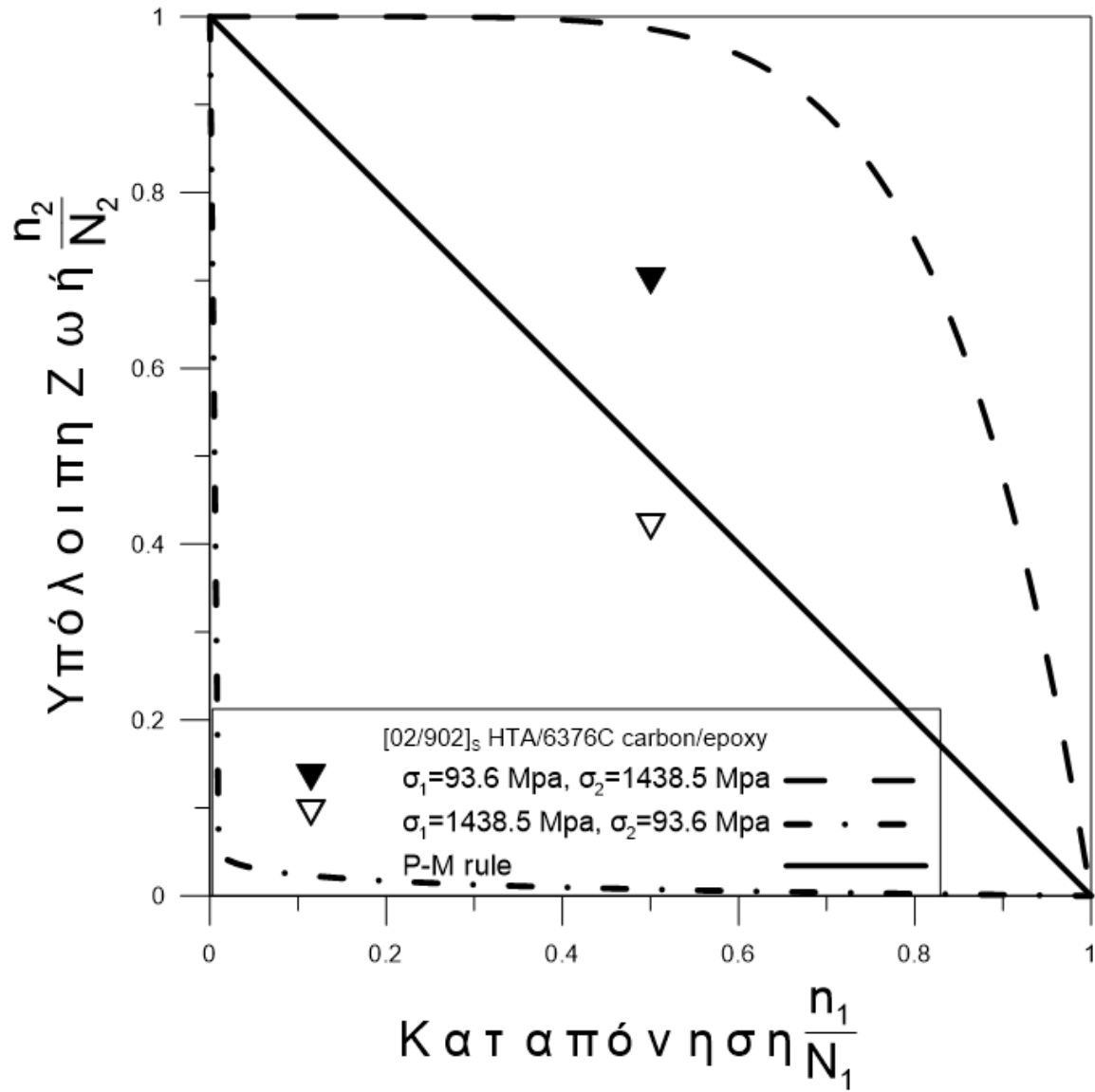
7.7.2 Κανόνας Manson και Halford [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

Είναι η σχέση (5.8). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.9) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε τους κύκλους αστοχίας N_1 και N_2 που αντιστοιχούν στις τάσεις σ_1 και σ_2 και που προέκυψαν στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.7.2:

Πίνακας 7.7.2: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Manson-Halford και για το υλικό [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
93.6	1438.5	6.154421024
1438.5	93.6	0.010642214

Διάγραμμα 7.7.2



7.7.3 Κανόνας Subramanian [02/902]_s HTA/6376C

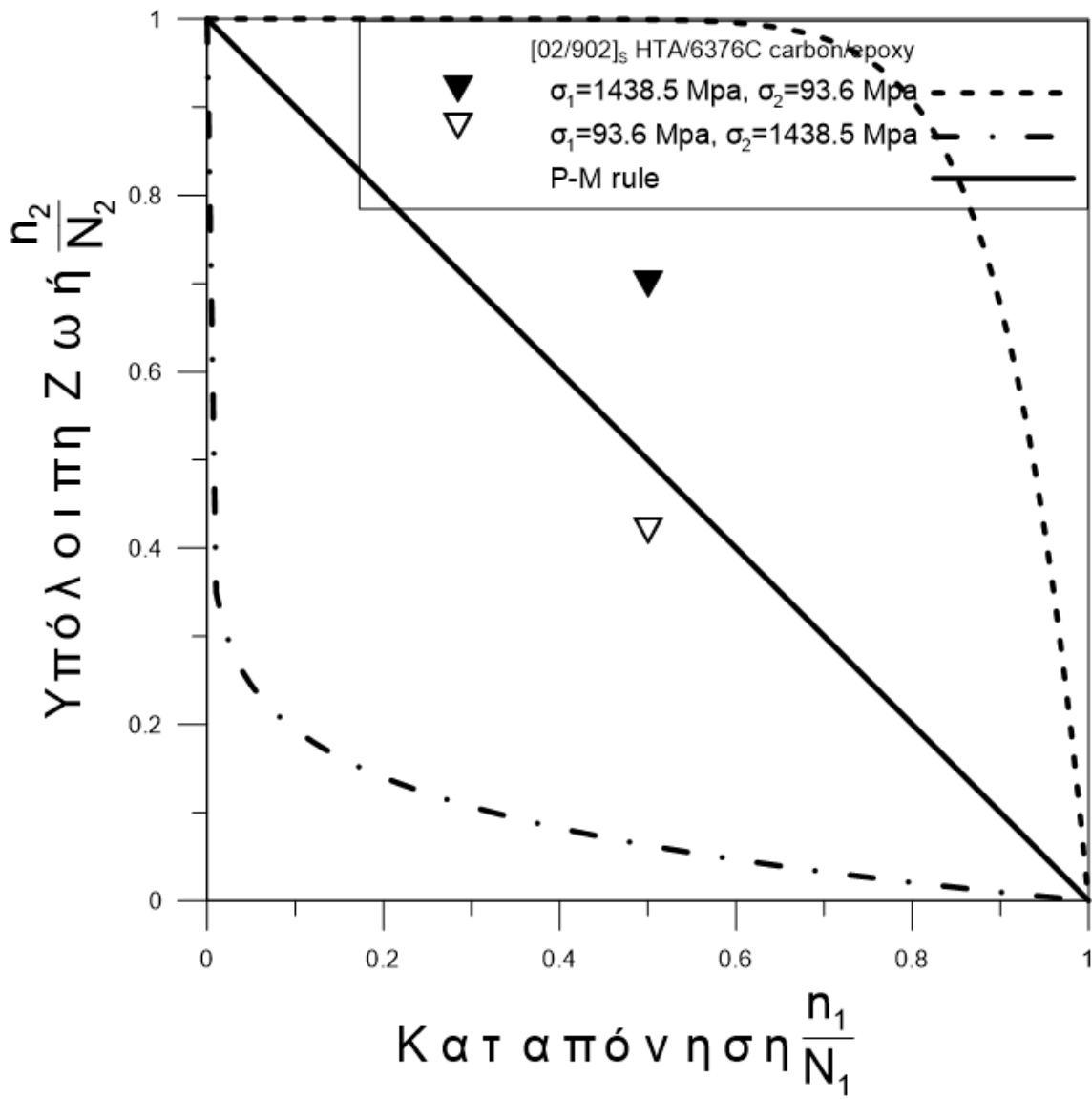
carbon/epoxy

Είναι η σχέση (5.10). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.11) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1, σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_d που είναι το όριο κόπωσης του υλικού που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.7.3:

Πίνακας 7.7.3: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα Subramanian και για το υλικό [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
1438.5	93.6	10.67239447
93.6	1438.5	0.093699684
σ_d (Mpa) = 10		

Διάγραμμα 7.7.3



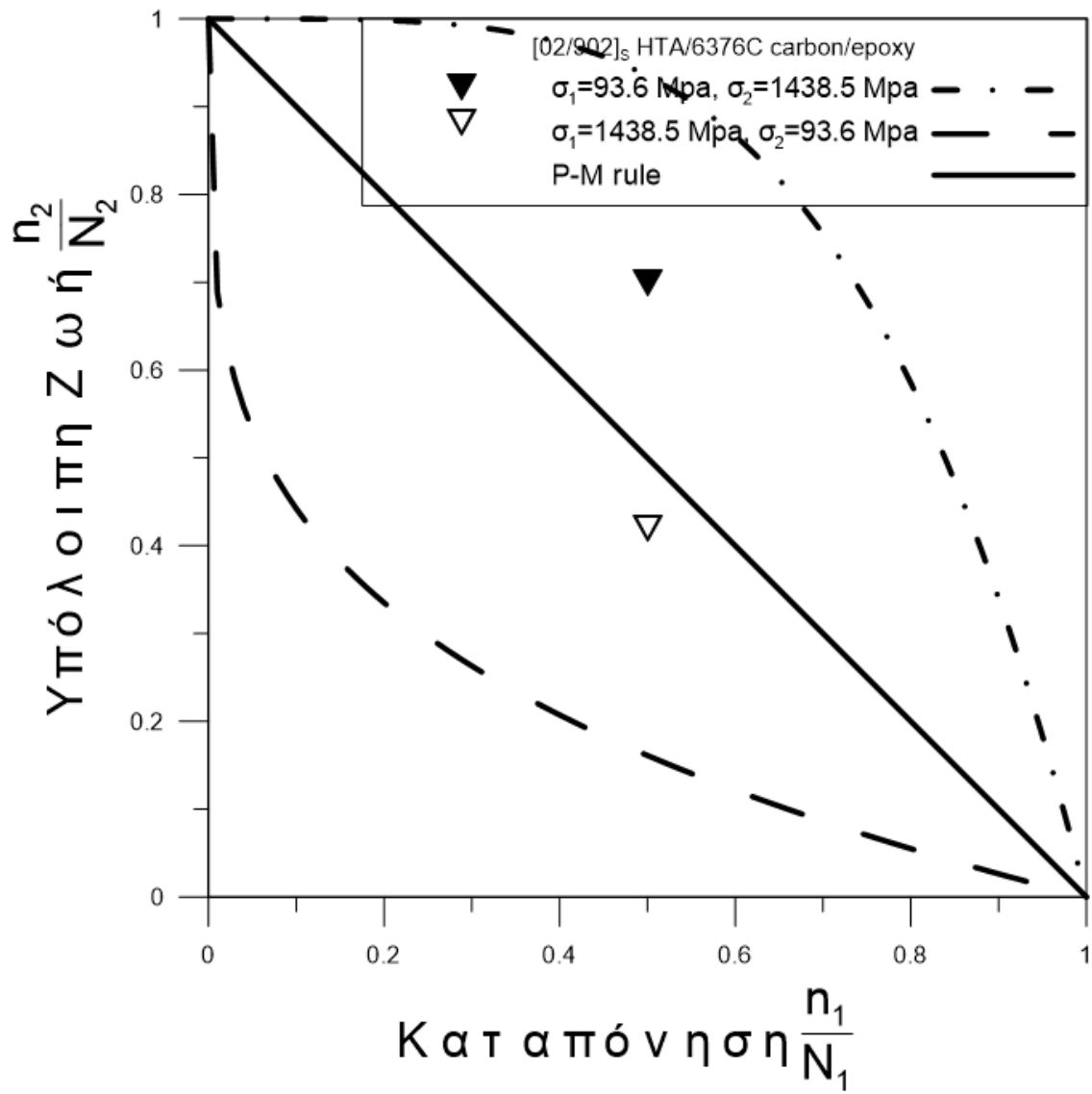
7.7.4 Κανόνας New Model [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

Είναι η σχέση (5.11). Η βασική παράμετρος α σχέση (5.13) υπολογίζεται με βάση την φόρτιση (τάσεις σ_1 , σ_2) και στοιχεία του υλικού που προκύπτουν από μονοτονικά πειράματα. Στην περίπτωση αυτού του κανόνα, χρειαζόμαστε το σ_r που είναι το όριο αντοχής κόπωσης που προέκυψε από την καμπύλη Wohler στο κεφάλαιο 6. Τα παραπάνω φαίνονται στον Πίνακα 7.7.4:

Πίνακας 7.7.4: Τιμές της παραμέτρου για τον κανόνα New Model και για το υλικό [02/902]_s HTA/6376C carbon/epoxy

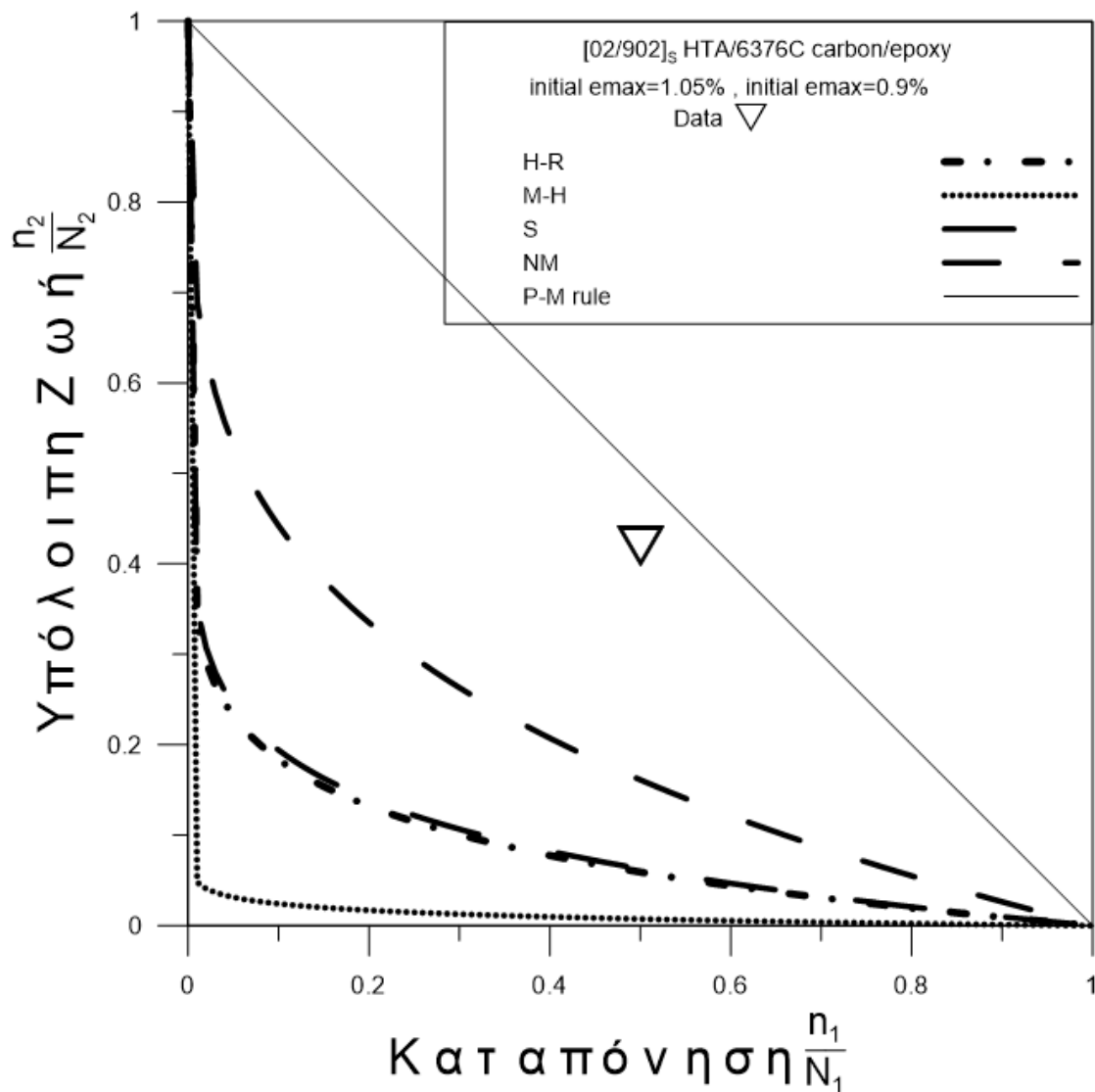
σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	α
93.6	1438.5	3.944502996
1438.5	93.6	0.253517363
σ_r (Mpa) = 3144.312877		

Διάγραμμα 7.7.4



Για την σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων στο υλικό [02/902]_S HTA/6376C carbon/epoxy, παίρνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την φόρτιση με τάσεις $\sigma_1 = 1438.5$ Μρα και $\sigma_2 = 93.6$ Μρα (initial $\epsilon_{max} = 1.05\%$ και initial $\epsilon_{max} = 0.9\%$ αντίστοιχα) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7.7.

Διάγραμμα 7.7: Συγκριτικό Διάγραμμα όλων των μοντέλων



8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κανόνας του Miner χρησιμοποιείται ευρύτατα στον μηχανολογικό σχεδιασμό, λόγω της εξαιρετικής απλότητάς του. Όμως, όπως φάνηκε και από την ανάλυση που προηγήθηκε, έχει απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι εξαιρετικά μεγάλη. Αυτός είναι ο βασικός λόγος, που έχουν προταθεί τα μη γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης κόπωσης σε μεταβλητές συνθήκες καταπόνησης. Σε όλα τα υλικά που εξετάστηκαν: Glass/Epoxy (GRP), Carbon/Epoxy T300/914, το 5208/T300 Graphite/Epoxy [$\pm 45^\circ$]_{2s}, το Carbon/Epoxy T800/5208 [0/90/ ± 45]_{2s}, το graphite/epoxy [(Q-1115)[$45^\circ/-45^\circ/45^\circ$].], το AS-4PEEK ([0/90]_{4s}, [0/45/90/-45]_{2s}, [± 45]_{4s}) και τέλος το [02/90]_{2s} HTA/6376C Carbon/Epoxy, οι μη γραμμικοί κανόνες έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από ότι ο γραμμικός κανόνας του Miner. Βγαίνει, επομένως, αβίαστο το συμπέρασμα ότι ο μηχανολογικός σχεδιασμός κατασκευών με σύνθετα υλικά που καταπονούνται σε κόπωση, πρέπει να γίνεται με τους μη γραμμικούς κανόνες. Τώρα, ειδικότερα, κάποιοι από τους μη γραμμικούς κανόνες μπορεί να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με κάποιους άλλους ανάλογα βέβαια και με το υλικό που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Όταν πρόκειται για κατασκευές που καταπονούνται σε κόπωση σταθερού πλάτους, τότε ο μηχανολογικός σχεδιασμός μπορεί να γίνει με βάση στοιχεία από ένα απλό μονοτονικό πείραμα (καμπύλη Wöhler). Όμως, η περίπτωση αυτή δεν είναι συνηθισμένη στην πράξη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κατασκευές καταπονούνται σε μεταβλητές συνθήκες καταπόνησης. Επειδή, στις συνθήκες αυτές δεν είναι δυνατόν να γίνουν πειράματα κάθε φορά που αλλάζουν οι καταπονήσεις, γι' αυτό είναι απολύτως απαραίτητη η χρήση των κανόνων πρόβλεψης στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Ειδικά, οι μη γραμμικοί κανόνες προσεγγίζουν πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα, και έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν στοιχεία που προέρχονται από απλά μονοτονικά πειράματα σταθερού πλάτους. Έτσι, με απλό τρόπο, μπορούμε να προβλέψουμε μεγάλο εύρος καταπονήσεων σαν αυτές που συναντούμε καθημερινά στην πράξη. Παρακάτω, φαίνεται μια σύγκριση διάφορων επιμέρους μη γραμμικών μοντέλων μεταξύ τους για τα διάφορα υλικά.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.1 που συγκρίνει τα μοντέλα, για το δοκίμιο του σύνθετου υλικού GRP με τάση $\sigma_1 = 290$ Mpa και $\sigma_2 = 386$ Mpa κάνουν καλύτερη προσέγγιση τα μοντέλα New Model και Subramanian. Στο Διάγραμμα 7.2, για το υλικό T300/914

Carbon/Epoxy με τάση $\sigma_1 = 340$ Mpa και $\sigma_2 = 315$ Mpa, καλύτερη προσέγγιση κάνουν τα μοντέλα New Model και Hashin-Rotem. Στο Διάγραμμα 7.3, για το υλικό 5208/T300 Graphite/Epoxy $[\pm 45^\circ]_{2s}$ με τάση $\sigma_1 = 60.7$ Mpa και $\sigma_2 = 51.7$ Mpa, τα μοντέλα που προσεγγίζουν καλύτερα την διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι το New Model και το μοντέλο Hashin-Rotem. Στο Διάγραμμα 7.4, για το υλικό T800/5208 Carbon/Epoxy $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$ με τάση $\sigma_1 = 452$ Mpa και $\sigma_2 = 345$ Mpa, καλύτερη προσέγγιση κάνει το μοντέλο New Model. Στο Διάγραμμα 7.5, το υλικό Q-1115 Graphite/Epoxy $[+45^\circ/-45^\circ/\pm 45^\circ]_{2s}$ με τάση $\sigma_1 = 269.96$ Mpa και $\sigma_2 = 122.72$ Mpa, τα μοντέλα που προσεγγίζουν καλύτερα την διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι το New Model και το μοντέλο Manson-Halford. Στο Διάγραμμα 7.6, το υλικό AS-4PEEK ($[0/90]_{4s}$, $[0/45/90/-45]_{2s}$, $[\pm 45]_{4s}$ με τάση $\sigma_1 = 449.6$ Mpa και $\sigma_2 = 491.92$ Mpa, καλύτερη προσέγγιση κάνουν τα μοντέλα Manson-Halford και Subramanian και στο Διάγραμμα 7.7, το υλικό $[02/902]_s$ HTA/6376C carbon/epoxy με τάση $\sigma_1 = 1438.5$ Mpa και $\sigma_2 = 93.6$ Mpa, καλύτερη προσέγγιση κάνει το μοντέλο New Model.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. RALPH I. STEPHENS, ALI FATEMI, ROBERT R. STEPHENS, HENRY O. FUCHS, Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2000
2. W. D. CALLISTER, Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2004
3. GEORGE E. DIETER, Mechanical metallurgy SI metric edition, Materials Science & Metallurgy, 1989
4. R. TALREJA and J. VARNA, Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 65, 2016 Elsevier Ltd
5. <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/107SNWohler.html>
6. Z. HASHIN, A. ROTEM, A cumulative damage theory for fatigue life prediction, Material Science Engineering, (34)1978, p.147-160
7. S. M. MARCO, W. L. STARKEY, A concept of fatigue damage, Trans. ASME (76)1954, p.627-632
8. A. FISSOLO, C. GOURDIN, Y. CHEN, G. PEREZ, J M. STELMASZYK, Investigations into the cumulative fatigue life of an AISI 304L austenitic stainless steel used for pressure water reactors: Application of a double linear damage rule, International journal of fatigue, (77)2015, p.199-205
9. S. SUBRAMANIAN, Journal of Engineering Materials and Technology, 98(1976), p. 316-321
10. N. BATSOULAS, Cumulative fatigue damage, Steel Research, 87(2016), p. 1600-1609
11. BROUTMAN LJ, SAHU S., A new theory to predict cumulative fatigue damage in fibre-glass reinforced plastics. Composite Materials: Testing and Design (2nd Conference), ASTM STP 497, 1972, p.170-188
12. W. X. YAO, N. HIMMEL, A new cumulative fatigue damage model for

- fibre- reinforced plastics, *Composites Science and Technology*, 60(2000), p.59-64
13. M. S. FOUND, M. QUARESIMIN, Two-stage fatigue loading of woven carbon fibre reinforced laminates, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(2002), p.17-26
 14. J. N. YANG, D. L. JONES, Effect of Load Sequence on the Statistical Fatigue of Composites, *AIAA journal*, (18)1980, p.1525-1531
 15. M.-H.R. JEN, Y.S. KAU, I.C. WU, Fatigue damage in a centrally notched composite laminate due to two-step spectrum loading, *International Journal of Fatigue*, 16(1994), p.193- 201
 16. T.Y. KAM, S.Y. TSAI, K.H. CHU, Fatigue reliability analysis of composite laminates under spectrum stress, *International Journal of Solids and Structures*, 34(1997), p.1441-1461
 17. C. H. LEE, M. H. R. JEN, Fatigue response and modelling of variable stress amplitude and frequency in AS-4/PEEK composite laminates, Part 1: Experiments, *Journal of Composite Materials*, 34(2000), p.906-929
 18. C. H. LEE, M. H. R. JEN, Fatigue response and modelling of variable stress amplitude and frequency in AS-4/PEEK composite laminates, Part 2: Analysis and formulation, *Journal of Composite Materials*, 34(2000), p.930-953
 19. E. K. GAMSTEDT, B. A. SJOGREN, An experimental investigation of the sequence effect in block amplitude loading of cross-ply composite laminates, *International Journal of Fatigue*, 24(2002), p.437-446
 20. D. J. WULPI, *Understanding How Components Fail*, Second edition, ASM International, 1999
 21. Ε.Γ. ΜΑΡΚΕΤΟΥ, *Τεχνική Μηχανική, Τόμος ΙΙ, Αντοχή των υλικών, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992*
 22. F.C. CAMPBELL, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, 2008
 23. ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΕΛΑΩΡΑΣ, *Αντοχή Υλικών, Τρίτη Έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003*

24. THOMAS H. COURTNEY, Mechanical Behavior of Materials, McGRAW International Editions, 1990
25. WALTER D. PILKEY, Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices, Wiley, 1994
26. ΙΩΑΝΝΗΣ ΡΑΦΤΟΓΙΑΝΝΗΣ, Σύνθετα Υλικά, Τόμος 1, Μηχανική συμπεριφορά, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2013
27. JULIE A. BANNANTINE, JESS J. COMMER, JAMES L. HANDROCK, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990
28. S. SHIRI, MUTJABA YAZDANI, MOHAMMAD POURGOL-MOHAMMAD, A fatigue damage accumulation model based on stiffness degradation of composite materials, Materials and Design, 88(2015), p.1290-1295
29. Α. ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Συμπεριφορά των υλικών σε δυναμικές φορτίσεις- κόπωση, ΤΕΙ Σερρών
30. Ν. ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ, Ε. ΚΥΡΙΑΖΗ, Κ. ΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Πειραματική αντοχή των υλικών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1991

