



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Συντήρηση και δοκιμαστική λειτουργία της μηχανής
κόπωσης εφελκυσμού-θλίψης SCHENK του
εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών του ΕΜΠ*

Διπλωματική Εργασία

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Γ. ΤΣΟΥΤΣΗ

Επιβλέπων : Λέκτορας Β. Σπιτάς

Αθήνα 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται η διαδικασία συντήρησης κι επαναλειτουργίας μηχανής κόπωσης, εφελκυσμού-θλίψης Schenk του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση τέτοιου τύπου μηχανημάτων καθώς και σημαντικές λεπτομέρειες της λειτουργίας και των δυνατοτήτων τους. Εν συνεχεία, αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προς αποκατάσταση του υπό εξέταση μηχανήματος της εταιρίας Carl Schenck, με έτος κατασκευής το 1959. Περιγράφεται επίσης η αρχή λειτουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και τα επιμέρους τμήματα που το απαρτίζουν.

Μετά από έρευνα, εντοπίστηκαν όλες οι απαραίτητες τεχνικές οδηγίες, οι οποίες συνέβαλλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της συντήρησης του μηχανήματος, την κατάλληλη ρύθμιση των αυτοματισμών του και την επαναλειτουργία του.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Β. Σπιτά για την καθοδήγησή και στήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον τέως καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, κ. Π. Μακρή, για τη συμβολή του στην κατανόηση της λειτουργίας του μελετώμενου μηχανήματος κι εύρεση των αναγκαίων τεχνικών εγχειριδίων από το προσωπικό του αρχείου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Χ. Προβατίδη για τη συμβολή του στην εύρεση πληροφοριακού υλικού.

Θα ήθελα ακόμη, να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και συνεργάτες μου από το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών για τη βοήθειά τους κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας καθώς και στον ηλεκτρολόγο μηχανικό κ. Γ. Μπενετάτο για τη συμβολή του στην επανασύνδεση του μηχανήματος. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά περί κόπωσης	σελ. 06
1.2 Χαρακτηριστικά των δυναμικών καταπονήσεων	σελ. 09
1.3 Καμπύλες S-N (καμπύλες Wöhler)	σελ. 12
1.4 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S-N	σελ. 14
1.5 Στατιστική εξέταση της Κόπωσης	σελ. 17
1.6 Η επίδραση της μέσης τάσης	σελ. 19
1.7 Πολυκυκλική (HCF) και Ολιγοκυκλική (LCF) Κόπωση	σελ. 22
1.8 Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά σε κόπωση	σελ. 26
1.8.1 Επίδραση Γεωμετρικών Ασυνεχειών	σελ. 26
1.8.2 Επίδραση μεγέθους	σελ. 27
1.8.3 Κατάσταση της Επιφάνειας	σελ. 27
1.9 Η δοκιμή της κόπωσης	σελ. 28
1.10 Μηχανισμός αστοχίας λόγω κόπωσης	σελ. 28
1.10.1 Χαρακτηριστικές περιοχές επιφάνειας θραύσης λόγω κόπωσης	σελ. 28
1.10.2 Εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης	σελ. 30
1.10.3 Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής.	σελ. 30
1.10.4 Τα δοκίμια της δοκιμής κόπωσης.	σελ. 31
1.10.5 Τύποι δοκιμών κόπωσης	σελ. 32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Γενικά περί μηχανών κάμψης για δοκιμή κόπωσης.	σελ.34
2.2 Μηχανή κόπωσης εφελκυσμού-θλίψης Schenck	σελ.35
2.2.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά	σελ.35
2.2.2 Αρχή λειτουργίας	σελ.35
2.2.3 Μέρη Εξεταζόμενης Μηχανής	σελ.36
2.3 Κατάσταση εξεταζόμενης μηχανής	σελ.38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Προετοιμασία μηχανήματος κι εκκίνηση	σελ.43
--	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα	σελ.46
--------------	--------

Βιβλιογραφία	σελ.47
--------------	--------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	σελ.48
-------------	--------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	σελ.53
-------------	--------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	σελ.55
-------------	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά περί κόπωσης

Ήδη από το 1830, είχε διαπιστωθεί ότι τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες ή χρονικά μεταβαλλόμενες (δυναμικές) τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν σε θραύση, ακόμη κι όταν οι τιμές των τάσεων αυτών βρίσκονται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης δυναμικών καταπονήσεων ονομάζεται **κόπωση** (fatigue).

Το βασικό χαρακτηριστικό της κόπωσης είναι ότι απαιτεί μια σημαντική χρονική περίοδο λειτουργίας του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος μιας κατασκευής για να εμφανιστεί. Μάλιστα, καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας έφερε σε χρήση νέα δομικά στοιχεία, τα οποία βρήκαν εφαρμογή σε κατασκευές, όπως αυτοκίνητα, αεροσκάφη, συμπιεστές, στροβίλους, κ.λπ., στα οποία οι μηχανικές καταπονήσεις είναι κατ'εξοχήν δυναμικές, η κόπωση απέκτησε σταδιακά όλο και μεγαλύτερη σημασία ως μηχανισμός αστοχίας. Σήμερα, εκτιμάται ότι το 90% των αστοχιών που προέρχονται από μηχανικά αίτια, οφείλεται σε κόπωση.

Στην πράξη, οι περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές δεν υφίστανται την επίδραση ενός χρονικά σταθερού φορτίου. Τις περισσότερες φορές, ο τύπος και η τιμή του φορτίου μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι πολλά από τα τεχνικά υλικά, υπόκεινται σε χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία ή τάσεις, στις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές στις οποίες συμμετέχουν ως λειτουργικά εξαρτήματα. Αυτές οι τάσεις, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, καταπονούν το υλικό σε εφελκυσμό και σε θλίψη και η μέγιστη τιμή της τάσης δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Τέτοιες

περιοδικές καταπονήσεις, υφίστανται πολλά μεταλλικά εξαρτήματα, όπως ο διωστήρας στις μηχανές εσωτερικής καύσης, τα αμορτισέρ των αυτοκινήτων, τα πτερύγια των αεροσκαφών και πολλά άλλα.

Οι επαναλαμβανόμενες αυτές μηχανικές καταπονήσεις, που αναπτύσσονται σε υλικά-εξαρτήματα μηχανών και κατασκευών, πολύ συχνά οδηγούν, μετά από κάποιες συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, σε αστοχίες, που είναι γνωστές ως **αστοχίες λόγω κόπωσης**. Το όριο διαρροής είναι μέτρο της λεγόμενης στατικής αντοχής του υλικού. Στην περίπτωση της κόπωσης, το αντίστοιχο όριο, είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στη δυναμική αντοχή του υλικού.

Η κόπωση των μεταλλικών υλικών είναι ένας από τους πιο «ύπουλους» μηχανισμούς αστοχίας, καθώς πραγματοποιείται χωρίς να εμφανίζει προειδοποιητικές ενδείξεις. Μια αστοχία λόγω κόπωσης, μπορεί να αναγνωρισθεί, αφότου εκδηλωθεί, από ορισμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης. Ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας 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 στη 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. Ένα ακόμη πιο τυπικό χαρακτηριστικό των επιφανειών θραύσης που προήλθαν από κόπωση, είναι οι γραμμώσεις που δημιουργούνται σε αυτήν. Οι γραμμώσεις αυτές έχουν συνήθως σχήμα τόξων από ομόκεντρους κύκλους, το κέντρο των οποίων υποδεικνύει το σημείο όπου βρισκόταν το αρχικό ρήγμα. Η απόσταση της μιας γραμμώσης από την άλλη, δίνει μια καλή εκτίμηση της ταχύτητας με την οποία προωθήθηκε το ρήγμα μέσα στο υλικό.

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για να εμφανιστεί αστοχία από κόπωση:

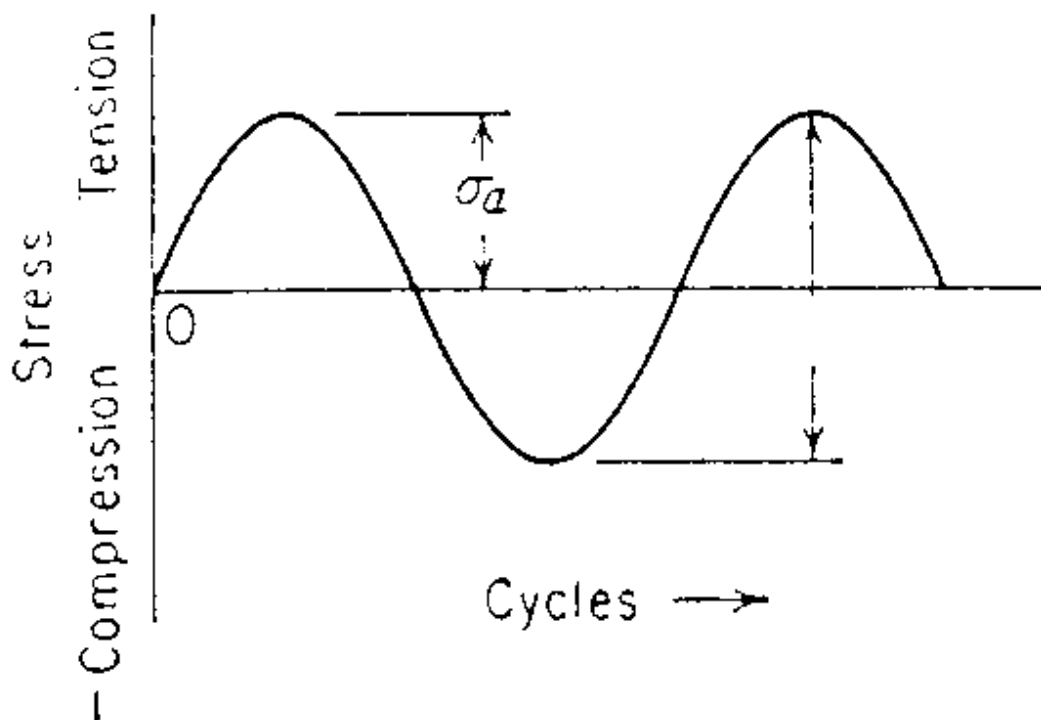
- α) Μια αρκετά υψηλή εφελκυστική τάση
- β) Μια αρκετά μεγάλη κι επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία

γ) Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης.

Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση επηρεάζεται από μια σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό, κ.α. Αυτός είναι ο λόγος που η κόπωση των μεταλλικών υλικών, δεν έχει εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και η ανάλυσή της στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό μέχρι σήμερα, σε πειραματικές κι εμπειρικές παρατηρήσεις.

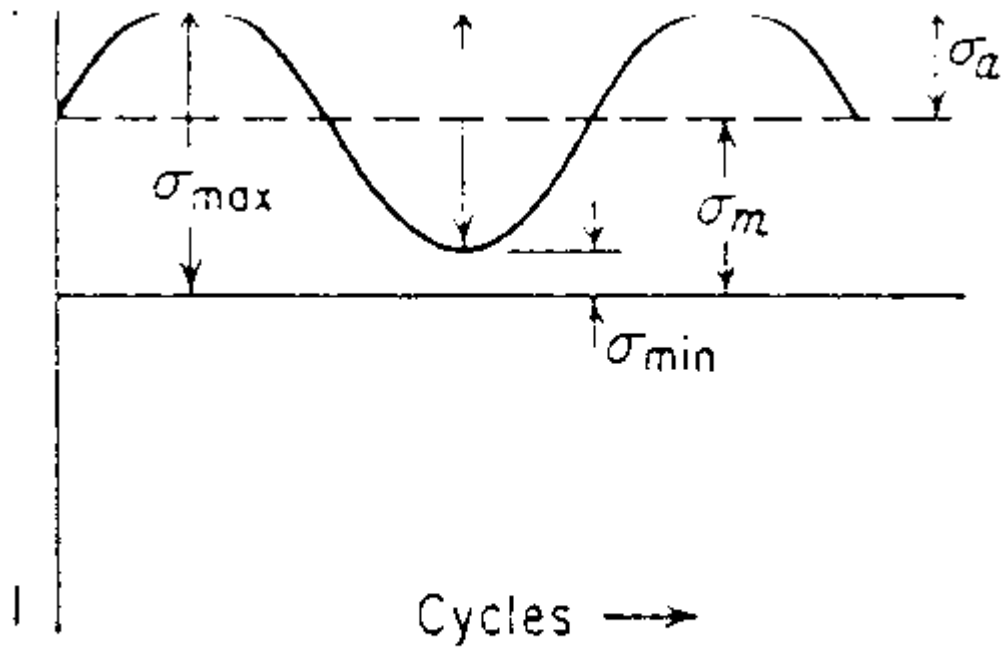
1.2 Χαρακτηριστικά των δυναμικών καταπονήσεων

Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικοί χαρακτηριστικοί τύποι δυναμικών καταπονήσεων, δηλαδή μεταβολής της τάσης σαν συνάρτηση των κύκλων φόρτισης (δηλαδή του χρόνου).



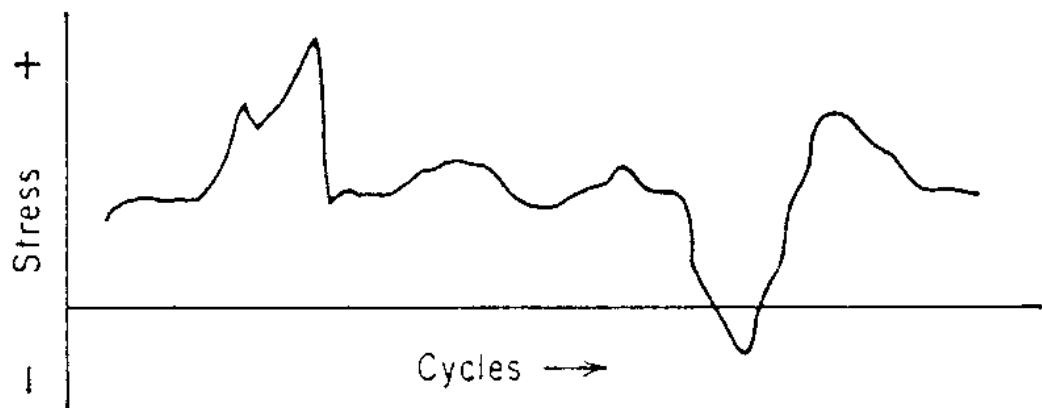
Σχήμα 1.α.

Το Σχ.1.α. απεικονίζει μια πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση ημιτονοειδούς μορφής. Η ημιτονοειδής δυναμική καταπόνηση είναι μια εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία πολύ σπάνια συναντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Ωστόσο, σε επίπεδο εργαστηριακού πειράματος, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με έναν άξονα, ο οποίος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και καταπονείται από ένα σταθερό καμπτικό φορτίο (περιστρεφόμενος πρόβολος). Σε αυτόν τον τύπο δυναμικής καταπόνησης, η απόλυτη τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$, όπου $\sigma_{\max} > 0$ (εφελκυστική) και $\sigma_{\min} < 0$ (θλιπτική).



Σχήμα 1.β.

Στο Σχ.1.β. απεικονίζεται μια περιοδική δυναμική καταπόνηση , στην οποία $|\sigma_{max}| \neq |\sigma_{min}|$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τόσο η $\sigma_{max} > 0$ όσο και η $\sigma_{min} > 0$ (και οι δύο εφελκυστικές). Ωστόσο, θα μπορούσε κάλλιστα και η σ_{max} και η σ_{min} να είναι μία εφελκυστική και μία θλιπτική ή και οι δύο θλιπτικές.



Σχήμα 1.γ.

Τέλος, το Σχ.1.γ. δείχνει μια ακανόνιστη ή τυχαία δυναμική καταπόνηση, η οποία δεν εμφανίζει απολύτως καμία περιοδικότητα. Στην πραγματικότητα, τέτοιας μορφής δυναμικές καταπονήσεις, εμφανίζονται στις περισσότερες εφαρμογές (όπως για παράδειγμα για να περιγράψει την καταπόνηση που δέχεται το φτερό ενός αεροσκάφους όταν δεχθεί ένα ξαφνικό και ισχυρό ρεύμα ανέμου).

Μια δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο «συνιστώσες»: μια μέση (ή σταθερή τάση) σ_m και μία μεταβαλλόμενη σ_a . Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης, πρέπει να λάβουμε υπόψη και το εύρος της τάσης, $\Delta\sigma$, το οποίο ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τάση

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1)$$

Αντίθετα, η μεταβαλλόμενη τάση, σ_a , ορίζεται ως το ήμισυ του εύρους $\Delta\sigma$, δηλαδή:

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (2)$$

Επίσης, πολύ συχνά, στην ανάλυση προβλημάτων δυναμικών καταπονήσεων και κόπωσης χρησιμοποιούνται δύο ακόμη μεγέθη. Το ένα είναι η αναλογία των τάσεων (stress ratio), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (3)$$

Το άλλο μέγεθος είναι η αναλογία εύρους τάσεων A (amplitude ratio):

$$A = \sigma_a / \sigma_m = (1-R)/(1+R) \quad (4)$$

1.3 Καμπύλες S-N (καμπύλες Wöhler)

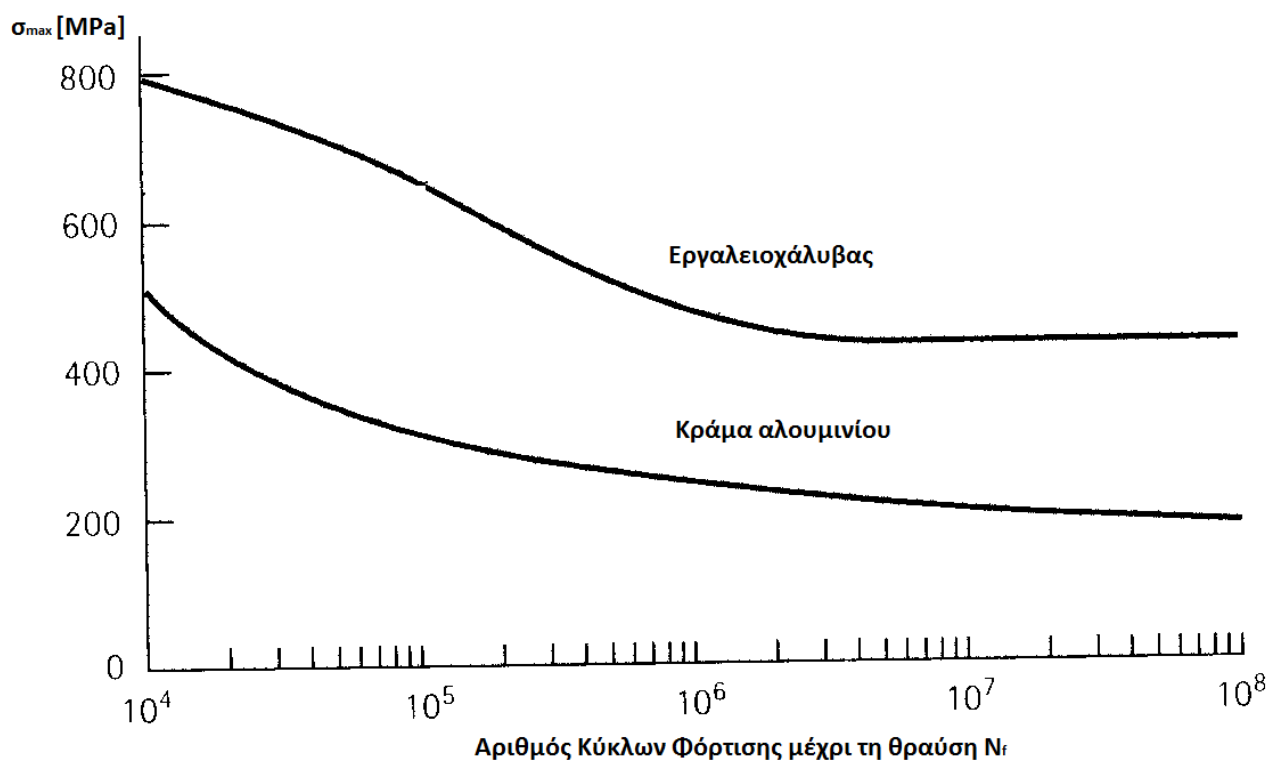
Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία πειραματικά δεδομένα, σχετικά με τη συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι καμπύλε S-N ή όπως είναι πιο γνωστές οι καμπύλες Wöhler.

Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο τους άξονα έχουν ένα μέγεθος S σχετιζόμενο με την τάση ενώ στον οριζόντιο άξονα δείχνουν τον αριθμό κύκλων φόρτισης N_f του υλικού. Ο άξονας του αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, είναι σχεδόν πάντα εκφρασμένος σε λογαριθμική κλίμακα (log). Κάθε καμπύλη S-N ενός υλικού, ισχύει για τη συγκεκριμένη τιμή μέσης τάσης κι αναλογίας τάσεων, στην οποία έχουν διεξαχθεί οι αντίστοιχες δοκιμές κόπωσης.

Αξίζει να προσέξει κανείς, πως οι καμπύλες S-N αναφέρονται σε θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, δηλαδή για $N > 10.000$ κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές, οι τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η κόπωση αυτού του είδους ονομάζεται **πολυκυκλική κόπωση** (HCF). Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση, μειώνεται σημαντικά ($N < 10.000$ κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις

αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η δυναμική καταπόνηση σε όρους τάσεις, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μία προκαθορισμένη μεταβολή τάσης. Αυτό το είδος της κόπωσης λέγεται **ολιγοκυκλική κόπωση (LCF)**.

Επιστρέφοντας στις καμπύλες S-N του παρακάτω Σχήματος 2.



Σχήμα 2. :Καμπύλες Wöhler για σιδηρούχα και μη σιδηρούχα κράματα

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση, δηλαδή ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση, αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Μια δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη μορφή των καμπυλών. Σε μεταλλικά υλικά μεγάλης πρακτικής σημασίας, όπως οι χάλυβες και το τιτάνιο, υπάρχει μια χαρακτηριστική τιμή τάσης (σ_e) κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται

οριζόντια. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σ_e , τότε ουσιαστικά το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Με άλλα λόγια δεν κινδυνεύει να υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Γι' αυτό και η τάση σε ονομάζεται **όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση** (endurance limit).

Η συμπεριφορά αυτή δεν εμφανίζεται σε όλα τα μεταλλικά υλικά. Τα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα, όπως κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού και άλλα, δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής. Το παράδειγμα του κράματος αλουμινίου του Σχήματος 2. (κάτω καμπύλη) είναι χαρακτηριστικό, αφού φαίνεται ότι η καμπύλη δε γίνεται οριζόντια σε καμία τάση, αλλά τείνει ασυμπτωτικά προς τον άξονα Nf όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται στο ότι τα κράματα με τη συγκεκριμένη συμπεριφορά πάντοτε έχουν μια πεπερασμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, άσχετα με το πόσο μικρή είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Για παράδειγμα, το κράμα αλουμινίου του διαγράμματος, κάποια στιγμή, έστω και μετά από πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, θα υποστεί θραύση λόγω κόπωσης, ακόμη και για πολύ μικρού μεγέθους εναλλασσόμενες τάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, για να μπορεί να οριστεί μια τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση και να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδιασμένη κατασκευών, έχει καθιερωθεί η χρήση της **συμβατικής αντοχής σε κόπωση** (fatigue strength). Η συμβατική αντοχή σε κόπωση, είναι η τάση εκείνη, για την οποία το υλικό θα έχει μια προκαθορισμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Συνήθως επιλέγεται μια μεγάλη διάρκεια ζωής της τάξεως των $5 \cdot 10^7$ - 10^8 κύκλων φόρτισης.

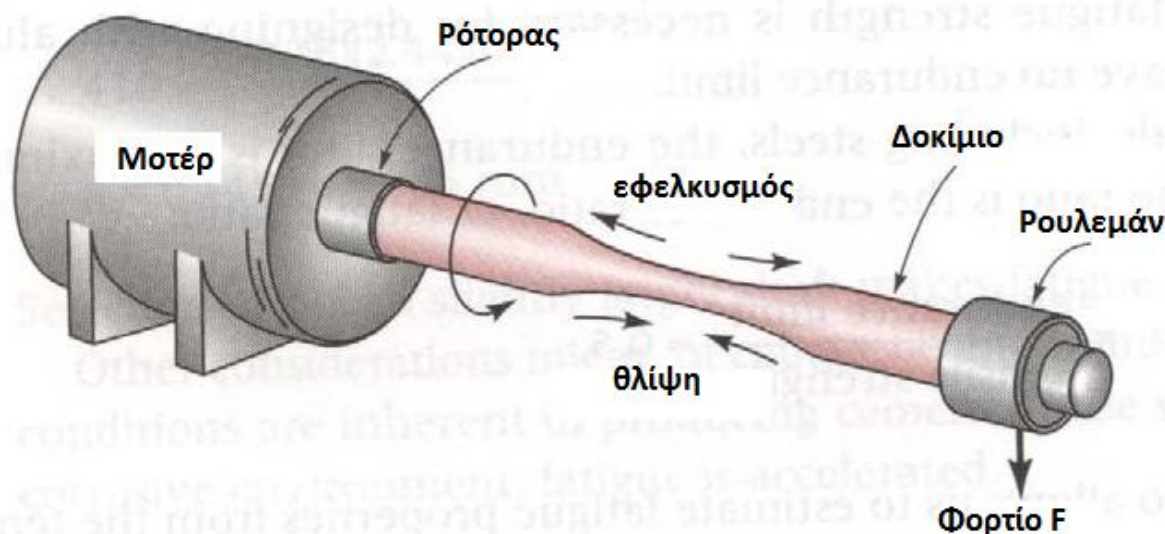
1.4 Πειραματικός Προσδιορισμός των Καμπυλών S-N

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες μπορεί να διερευνηθεί πειραματικά η συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις(κόπωση).

Περισσότερο οικεία είναι πιθανότατα αυτή που πραγματοποιείται σε συνήθη δοκίμια εφελκυσμού. Υπάρχουν τύποι μηχανών εφελκυσμού που διαθέτουν τη δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών κόπωσης, εξασκώντας προκαθορισμένη εναλλασσόμενη φόρτιση στο δοκίμιο. Στις πλέον

σύγχρονες μηχανές εφελκυσμού-κόπωσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου τύπου δυναμικής καταπόνησης (π.χ. ημιτονοειδής), καθώς και των χαρακτηριστικών αυτής (σ_{max} , σ_{min} κ.λπ.), γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών δυναμικής καταπόνησης.

Ένας εναλλακτικός τύπος δοκιμής κόπωσης, που έχει βρει πολύ μεγάλη πρακτική εφαρμογή, είναι η **δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου** (rotating cantilever beam test). Η πειραματική διάταξη της δοκιμής αυτής, είναι σχετικά απλή και απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Στη δοκιμή, υποβάλλεται δοκίμιο κυλινδρικής γεωμετρίας του υπό εξέταση υλικού. Το ένα άκρο του δοκίμιου συγκρατείται σε ένα ρότορα που συνδέεται με έναν ηλεκτρικό κινητήρα ενώ στο άλλο άκρο τοποθετείται ένα εγκάρσιο φορτίο, ασκώντας έτσι κάμψη στο δοκίμιο.



Σχήμα 3: Δοκιμή περιστρεφόμενου προβόλου

Καθώς ο ρότορας τίθεται σε περιστροφική κίνηση, το δοκίμιο αρχίζει να υποβάλλεται σε μια εναλλασσόμενη καταπόνηση. Από τη θεωρία κάμψης φορέων, οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στις εξωτερικές επιφάνειες της δοκού.

Έτσι και στην περίπτωση του περιστρεφόμενου προβόλου, ένα σημείο του υλικού που βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια, δέχεται τη μέγιστη

εφελκυστική τάση. Μετά από περιστροφή 90° το σημείο αυτό, έρχεται σε μία θέση όπου η τάση μηδενίζεται. Μετά από περιστροφή άλλων 90° , (δηλαδή 180° από την αρχή) το σημείο έρχεται στην κάτω επιφάνεια, όπου εκεί δέχεται τη μέγιστη θλιπτική τάση. Σε κάθε περιστροφή του δοκιμίου, επαναλαμβάνεται η ίδια πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση, η οποία μάλιστα για τη συγκεκριμένη δοκιμή κόπωσης έχει ημιτονοειδή μορφή με μέση τάση $\sigma_m=0$ και $R=-1$. Η μέγιστη και η ελάχιστη τάση που καταπονούν το δοκίμιο, υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\sigma_{\max}=-\sigma_{\min}=32FL/\pi D^3 \quad (5)$$

Όπου L και D , το μήκος και η διάμετρος του δοκιμίου, αντίστοιχα και F το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο. Έτσι, μεταβάλλοντας κατάλληλα τα μεγέθη L , F και D , μπορεί να παραχθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος διαφορετικών δυναμικών καταπονήσεων.

Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό μίας καμπύλης S-N ξεκινά υποβάλλοντας το πρώτο δοκίμιο σε μία υψηλή τάση, στην οποία περιμένουμε ότι το δοκίμιο θα υποστεί θραύση μετά από μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης. Συνήθως, για το πρώτο αυτό δοκίμιο, η τάση που επιλέγεται ισοδυναμεί με τα 2/3 της μέγιστης αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό(uts).

Τα επόμενα δοκίμια υποβάλλονται σε όλο και μικρότερες τάσεις και καταγράφεται ο αριθμός κύκλων στον οποίο αστοχούν με θραύση. Η δοκιμή συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο, μέχρις ότου ένα ή δύο δοκίμια, να μην έχουν αστοχήσει μετά από έναν προκαθορισμένο μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης (όπως για παράδειγμα μετά από 10^7 κύκλους φόρτισης). Τότε, ως όριο διαρκούς αντοχής του υλικού ορίζεται η υψηλότερη τάση στην οποία το δοκίμιο δεν αστόχησε. Στα μεταλλικά υλικά που δεν εμφανίζουν όριο διαρκούς αντοχής, οι δοκιμές τερματίζονται όταν το δοκίμιο αντέξει σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων. Η τιμή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο αυτό λαμβάνεται τότε σαν συμβατική αντοχή του υλικού σε κόπωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τον καθορισμό μιας καμπύλης S-N χρησιμοποιούνται συνολικά από 8-12 δοκίμια του υλικού.

Εκείνο που έχει εξαιρετική σημασία να είναι γνωστό, είναι ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό, εμφανίζουν μεγάλη διασπορά (scatter) . Δηλαδή, εάν ληφθούν αρκετά δοκίμια από το ίδιο υλικό και υποβληθούν σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες(σ_{max} , σ_{min} , σ_m κ.λπ.) θα παρατηρηθεί ότι η διάρκεια ζωής του σε κόπωση (δηλαδή ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι να σπάσουν) θα είναι αρκετά διαφορετικός από δοκίμιο σε δοκίμιο. Γι' αυτό το λόγο, τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης υποβάλλονται σε κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, προκειμένου να καταστούν αξιόπιστα κι ασφαλή και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα ενός υλικού κατά το στάδιο σχεδιομελέτης μιας κατασκευής.

1.5 Στατιστική εξέταση της Κόπωσης

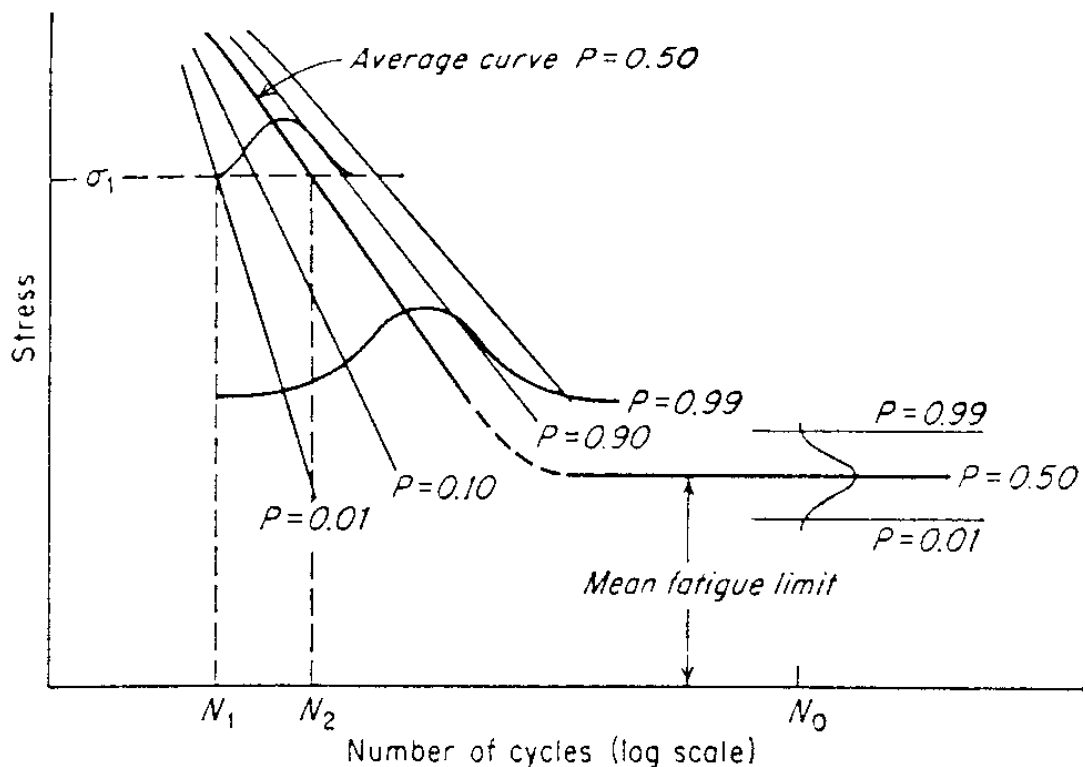
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης σε ένα συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, τόσο όσον αφορά τη διάρκεια ζωής, όσο και το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού. Κατά συνέπεια και τα δύο αυτά μεγέθη, N_f και σ_e , είναι στατιστικές ποσότητες και ως τέτοιες πρέπει να αντιμετωπίζονται. Αυτό βέβαια σημαίνει, πως η καμπύλη S-N ενός υλικού που προκύπτει με τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή με τη διενέργεια δοκιμών κόπωσης σε ένα πλήθος 8-12 δοκιμίων, περιγράφει μία μέση συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση, από την οποία θα πρέπει να αναμένονται αρκετά μεγάλες αποκλίσεις.

Για να γίνει πιο κατανοητή η μεγάλη στατιστική διασπορά που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης, που πραγματοποιούνται με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες σε δοκίμια από το ίδιο υλικό, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί το **πείραμα του Ransom** (1952).

Ο Ransom χρησιμοποίησε μια ράβδο από ένα χάλυβα, από την οποία έκοψε και κατασκεύασε 100 πανομοιότυπα δοκίμια κόπωσης, τα οποία στη συνέχεια χώρισε σε 10 ομάδες (10 δοκίμια ανά ομάδα). Κάθε ομάδα δοκιμίων υπεβλήθη σε δοκιμές κόπωσης με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες. Επομένως, για κάθε ομάδα δοκιμίων προέκυψε η αντίστοιχη καμπύλη S-N. Συνολικά σχηματίστηκαν 10 καμπύλες, η εικόνα των οποίων δικαίωσε τις υποψίες του Ransom.

Πραγματικά, οι 10 καμπύλες S-N όχι μόνο δε συμπίπτουν μεταξύ τους αλλά αντίθετα εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, τόσο ως προς τη διάρκεια ζωής για κάποια δεδομένη τιμή τάσης, όσο και ως προς το όριο διαρκούς αντοχής.

Το εν λόγω θέμα εξηγείται καλύτερα στο Σχήμα 4 που ακολουθεί:



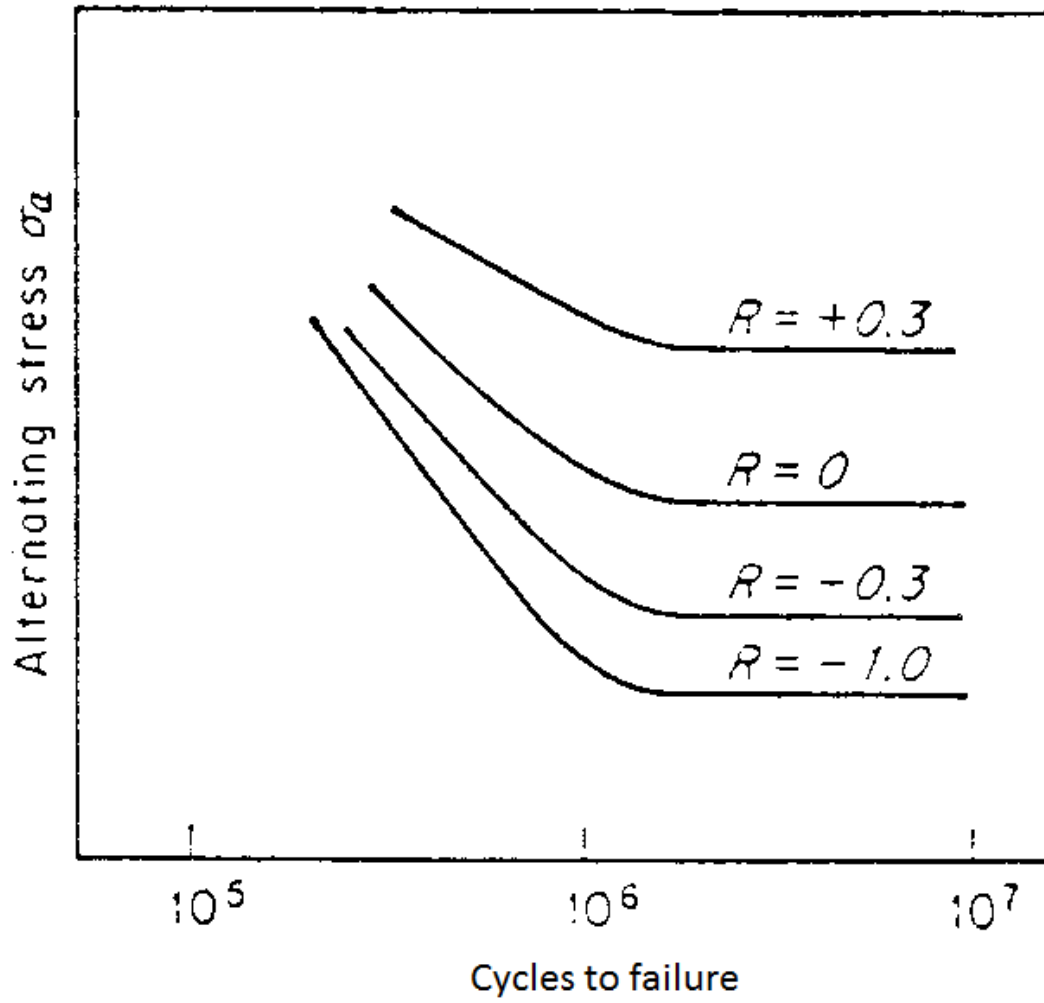
Σχήμα 4.: Καμπύλες S-N

Το διάγραμμα αυτό, περιέχει διάφορες καμπύλες S-N ενός συγκεκριμένου υλικού, όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας P. Για να παραχθεί ένα διάγραμμα αυτού του είδους,

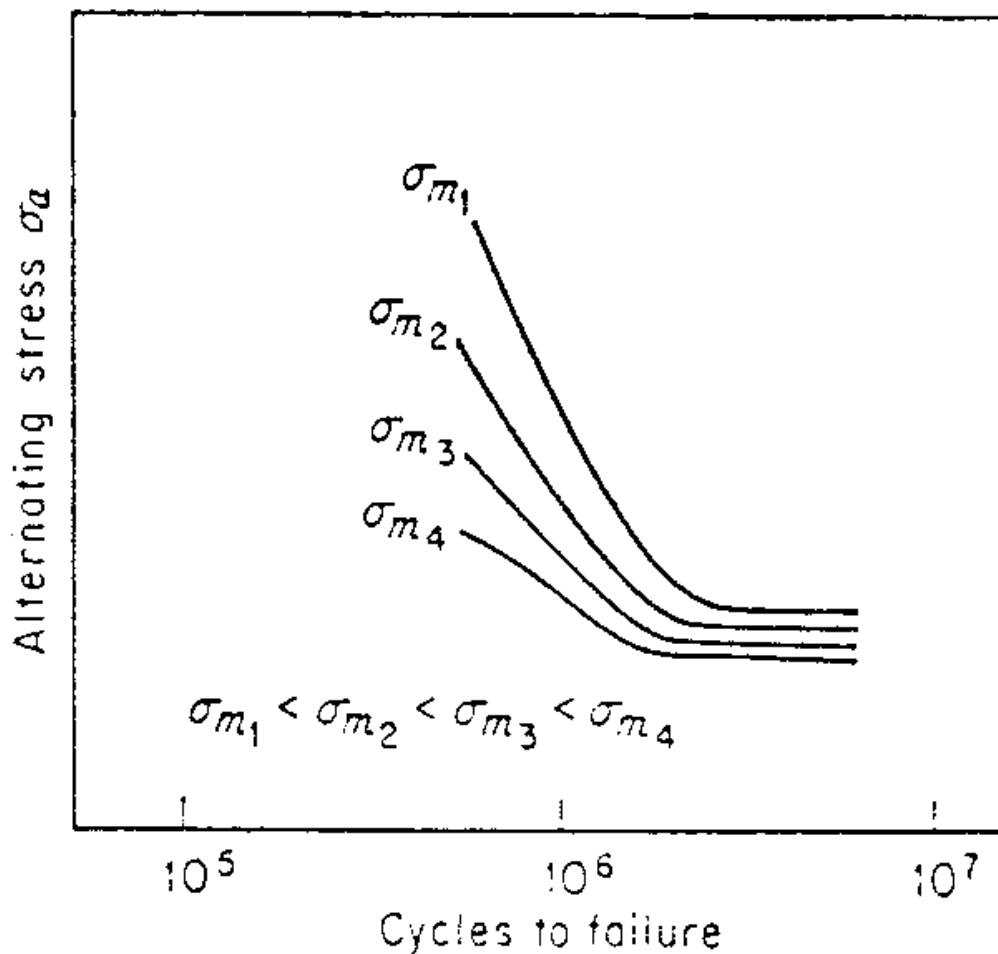
απαιτείται ένα τεράστιο πλήθος δοκιμών του υλικού, που συνήθως φτάνει ή και ξεπερνά τα 1000 συνολικά δοκίμια, καθώς επίσης και η πραγματοποίηση αντίστοιχου αριθμού δοκιμών κόπωσης. Επομένως, το κόστος για τη δημιουργία ενός τέτοιου διαγράμματος είναι αρκετά υψηλό. Αυτός είναι και ο λόγος που πλήρη διαγράμματα σαν αυτό, υπάρχουν ελάχιστα στην πραγματικότητα και αφορούν υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολύ κρίσιμες εφαρμογές. Κάθε καμπύλη S-N αντιπροσωπεύει και την αντίστοιχη πιθανότητα ισχύος της. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως όταν μια κατασκευή είναι πολύ κρίσιμη και πρέπει οπωσδήποτε να αποφύγουμε την αστοχία λόγω κόπωσης, θα πρέπει να δεχτούμε την πρόβλεψη για τη χειρότερη δυνατή συμπεριφορά του υλικού (μικρότερη διάρκεια ζωής και χαμηλότερο όριο διαρκούς αντοχής).

1.6 Η επίδραση της μέσης τάσης

Τα περισσότερα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα κόπωσης στη βιβλιογραφία, έχουν προκύψει από δοκιμές κόπωσης με πλήρως αναστρεφόμενους κύκλους φόρτισης, για τους οποίους ισχύει ότι $\sigma_m=0$. Ωστόσο, στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές, η μέση τάση δεν ισούται με μηδέν. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να καθοριστούν οι καμπύλες S-N όταν $\sigma_m \neq 0$. Στο παρακάτω σχήμα, εμφανίζονται δύο από τους πιο συνήθεις τρόπους παρουσίασης των δεδομένων κόπωσης στις περιπτώσεις αυτές.



Σχήμα 6 α.: Καμπύλες S-N



Σχήμα 6 β.: Καμπύλες S-N

Στο Σχήμα 6.α, οι καμπύλες S-N παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα μέσης τάσης (σ_{\max})-αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (N_f), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια σταθερή τιμή $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Όταν $R = -1$ η τάση είναι πλήρως αναστρεφόμενη ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$), η μέση τάση $\sigma_m = 0$.

Όσο το R γίνεται πιο θετικό, που ισοδυναμεί με το ότι η μέση τάση αυξάνεται, το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού αυξάνεται. Η περίπτωση (β) δείχνει τα ίδια δεδομένα, εκφρασμένα όμως σε ένα διάγραμμα εύρους τάσης (σ_a)-αριθμών κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση (N_f), όπου κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μια σταθερή μέση τάση σ_m . Άξιο προσοχής είναι πως όσο η μέση τάση σ_m αυξάνεται, τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το

εύρος τάσης σ_a για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

1.7 Πολυκυκλική (HCF) και Ολιγοκυκλική (LCF) Κόπωση

Κατά την πολυκυκλική κόπωση (high cycle fatigue-HCF), το επίπεδο των εναλλασσόμενων τάσεων που αναπτύσσονται στο υλικό, βρίσκεται γενικά κάτω από το μακροσκοπικό όριο διαρροής του υλικού. Η καταπόνηση δηλαδή, που υφίσταται το υλικό είναι ελαστικής φύσεως. Συνήθως, οι καμπύλες S-N που προκύπτουν από δοκιμές κόπωσης των μεταλλικών υλικών αναφέρονται σε συνθήκες πολυκυκλικής κόπωσης. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει μια καμπύλη S-N σε καθεστώς πολυκυκλικής κόπωσης ονομάζεται νόμος του Basquin κι έχει την παρακάτω μορφή:

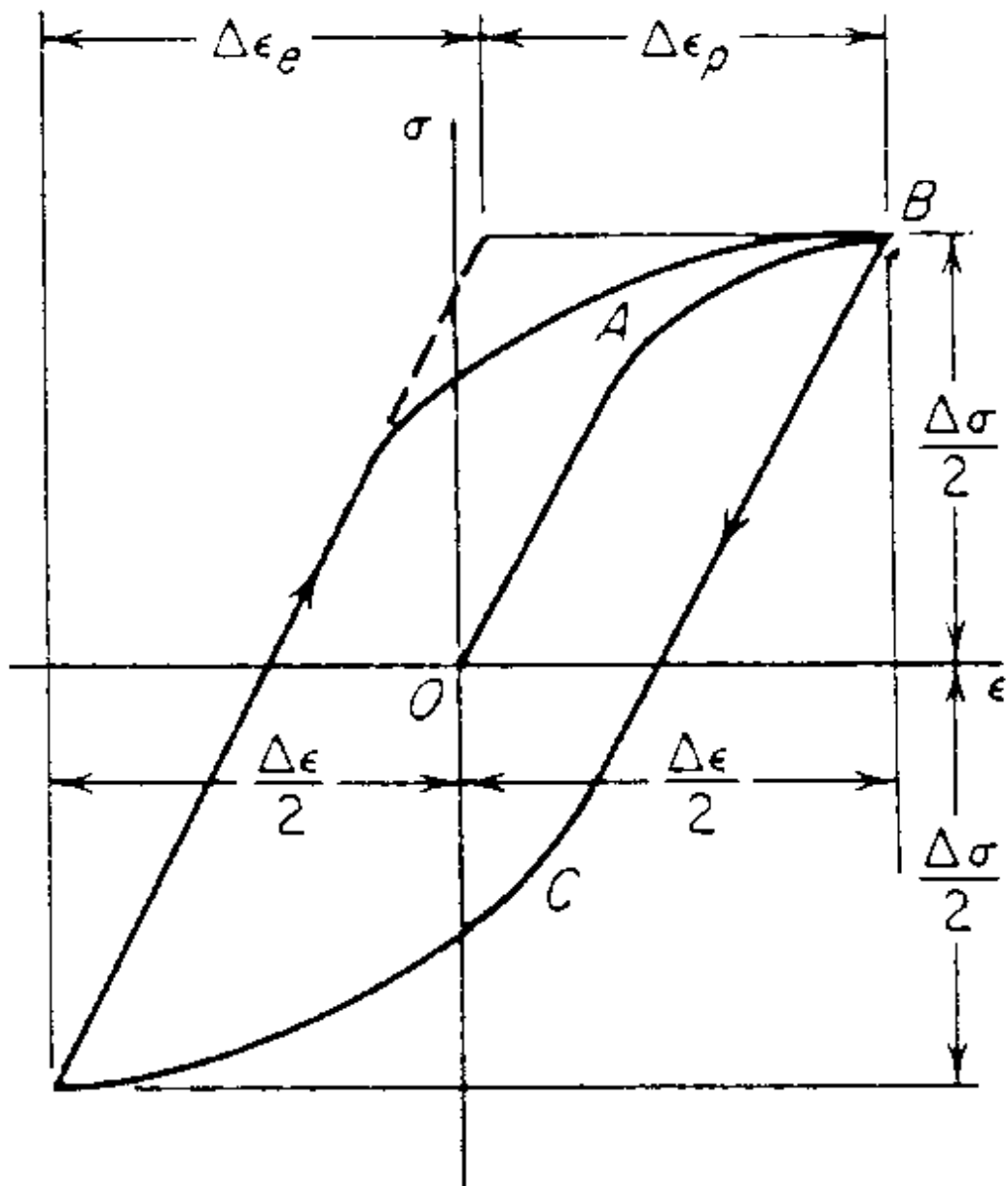
$$N^*(\sigma_a)^p=C \quad (6)$$

Τα p και C είναι εμπειρικές σταθερές και οι τιμές τους εξαρτώνται από το υλικό.

Αντίθετα, όταν οι αναπτυσσόμενες στο υλικό, χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις υπερβαίνουν το μακροσκοπικό όριο διαρροής, τότε σε κάθε κύκλο φόρτισης το υλικό υφίσταται ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Στην κατάσταση αυτή, η διάρκεια ζωής σε κόπωση είναι γενικά χαμηλότερη των 10^4 κύκλων φόρτισης κι έτσι αυτό το είδος κόπωσης, ονομάζεται **ολιγοκυκλική κόπωση** (low cycle fatigue- LCF). Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αυτού του είδους συναντώνται σε εφαρμογές όπου το υλικό αντιμετωπίζει επαναλαμβανόμενες τάσεις θερμικής προέλευσης. Στις περιπτώσεις αυτές είναι φανερό ότι οι τάσεις προέρχονται από τις επαναλαμβανόμενες συστολές και διαστολές του υλικού, γεγονός που υποδεικνύει ότι εδώ η κόπωση προκύπτει περισσότερο λόγω της επαναλαμβανόμενης πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, παρά λόγω των επαναλαμβανόμενων τάσεων.

Προτού αναφερθούν περισσότερες λεπτομέρειες για την ολιγοκυκλική κόπωση, θα εξεταστεί η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών, όταν αυτά υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους σταθερής παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 7 φαίνεται η κυκλική καμπύλη τάσης-

παραμόρφωσης που προκύπτει όταν υποβάλλουμε ένα δοκίμιο του υλικού που εξετάζουμε σε κυκλική φόρτιση, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρήσουμε σταθερή την παραμόρφωση του δοκιμίου σε κάθε κύκλο.



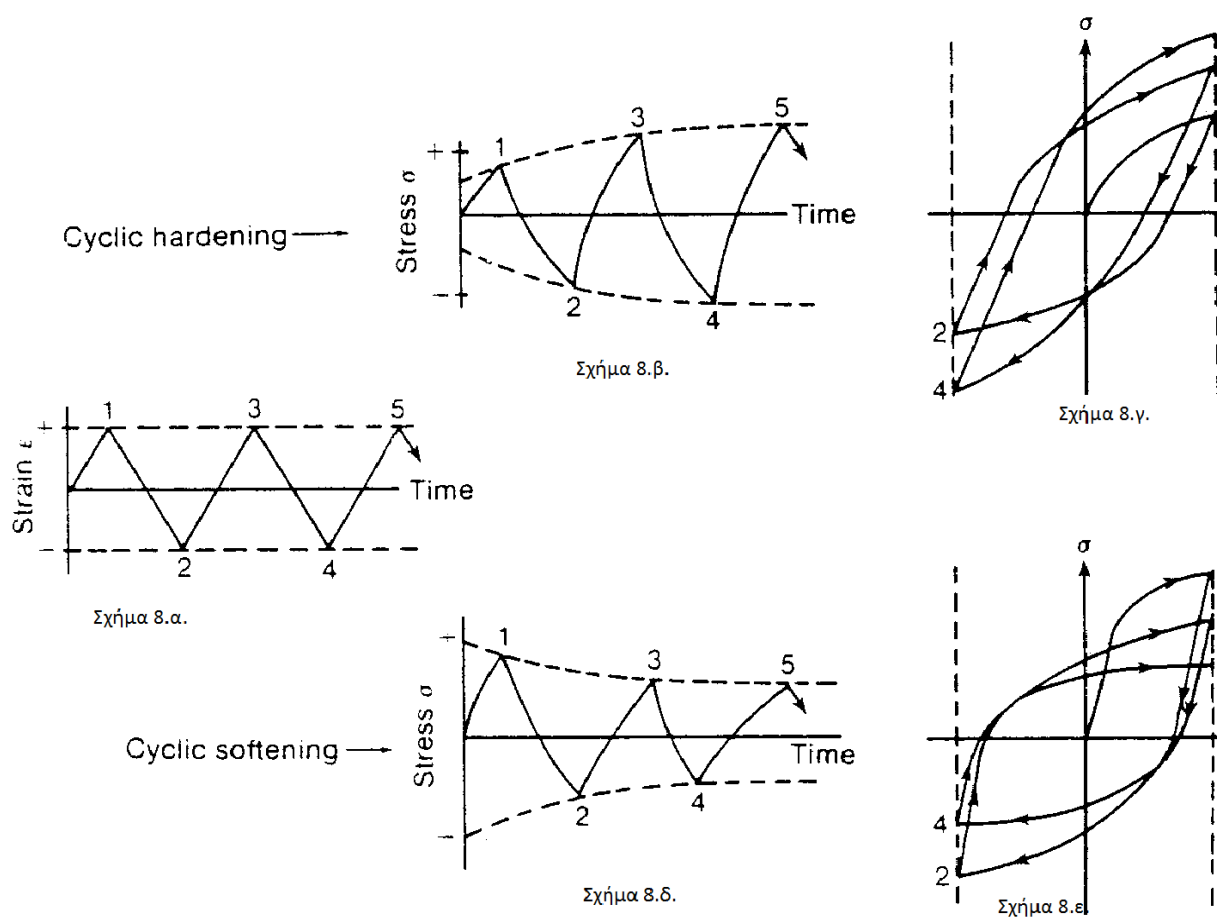
Σχήμα 7: Κυκλική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Δηλαδή, σε μία δοκιμή αυτού του είδους, υποβάλλουμε το δοκίμιο σε εναλλασσόμενους κύκλους εφελκυσμού και θλίψης, φροντίζοντας ώστε σε κάθε κύκλο να προκαλείται η ίδια συνολική (ελαστική και πλαστική) παραμόρφωση στο δοκίμιο. Το εύρος της συνολικής παραμόρφωσης $\Delta\epsilon$, που διατηρείται σταθερό σε κάθε κύκλο κατά τη δοκιμή, αποτελείται από

μία συνιστώσα ελαστικής παραμόρφωσης ($\Delta\epsilon_e$) και μια συνιστώσα πλαστικής παραμόρφωσης ($\Delta\epsilon_p$):

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = (\Delta\sigma/E) + \Delta\epsilon_p = \text{σταθερό} \quad (7)$$

Επειδή η πλαστική παραμόρφωση είναι μη αντιστρεπτή διεργασία και προκαλεί μόνιμες μεταβολές στη μικροδομή του υλικού, η κυκλική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μεταβάλλεται από κύκλο σε κύκλο. Για παράδειγμα η εργοσκήρυνση που υφίστανται τα μεταλλικά υλικά όταν δέχονται πλαστικές παραμορφώσεις θα οδηγούσε σε κυκλική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σαν αυτή του (γ).



Σχήμα 8. : Μεταβολή συνολικής παραμόρφωσης

Εξετάζοντας προσεκτικότερα το παρακάτω σχήμα, βλέπουμε τη μεταβολή της συνολικής παραμόρφωσης που επιβάλλεται στο δοκίμιο σε κάθε κύκλο κι όπως βλέπουμε το εύρος της συνολικής (πλαστικής κι ελαστικής) παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ διατηρείται σκόπιμα σταθερό σε κάθε κύκλο. Όσον αφορά τη διακύμανση της τάσης σε κάθε κύκλο, εδώ εμφανίζονται συνήθως δύο είδη συμπεριφοράς. Το ένα είδος αφορά την περίπτωση που το υλικό εργοσκληρώνεται, κάτι που δείχνει το (β). Όπως φαίνεται, όταν το υλικό εμφανίζει αυτή τη συμπεριφορά, τότε το εύρος της τάσης $\Delta\sigma$ αυξάνεται σε κάθε κύκλο, τότε επίσης σε κάθε κύκλο αυξάνεται η ελαστική συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης κι αντίστοιχα μειώνεται η πλαστική συνιστώσα (αφού $\Delta\varepsilon$ σταθερό). Αυτή η συμπεριφορά ακριβώς περιγράφεται στο (γ).

Το δεύτερο είδος συμπεριφοράς αφορά την περίπτωση όπου το υλικό εμφανίζει μείωση αντοχής κατά την κυκλική καταπόνηση. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο (δ). όπου βλέπουμε ότι το εύρος της τάσης $\Delta\sigma$ μειώνεται από κύκλο σε κύκλο. Έτσι σε κάθε κύκλο μειώνεται η ελαστική συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης κι αντίστοιχα αυξάνεται η πλαστική συνιστώσα (αφού και πάλι η συνολική παραμόρφωση παραμένει σταθερή). Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στην κυκλική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του (ε).

Για τη μαθηματική περιγραφή της σχέσης μεταξύ διάρκειας ζωής σε ολιγοκυκλική κόπωση κι εύρους πλαστικής παραμόρφωσης, χρησιμοποιείται ο νόμος Coffin-Manson: $\Delta\varepsilon_p/2 = C(2N)^b$ (8)

Το C στην παραπάνω εξίσωση, είναι μια σταθερά, η οποία για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά ισούται με την παραμόρφωση θραύσης (εκφρασμένη σε τιμές πραγματικής παραμόρφωσης) σε απλό εφελκυσμό. Ο εκθέτης b στα περισσότερα μεταλλικά υλικά κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ του -0.5 και του -0.7.

1.8 Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά σε κόπωση

Η συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου υλικού σε δυναμικές καταπονήσεις, δεν εξαρτάται απόλυτα μόνο από το ίδιο το υλικό, αλλά από μια σειρά άλλων παραγόντων. Ακόμη και σήμερα δεν έχει γίνει εφικτή πλήρως η επίδραση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωση. Οι βασικότεροι από τους παράγοντες αυτούς, έχουν να κάνουν με την ύπαρξη γεωμετρικών ασυνεχειών (π.χ. εγχοπών) στο υλικό, με το μέγεθος του δομικού στοιχείου που υφίσταται δυναμική καταπόνηση, με την κατάσταση της επιφάνειάς του. Κλείνοντας την ενότητα αυτή, θα αναφερθούμε επιγραμματικά στην επίδραση ορισμένων από τους παράγοντες αυτούς.

1.8.1 Επίδραση Γεωμετρικών Ασυνεχειών

Η ύπαρξη γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως οπές, εγχοπές, σφηναύλακες κ.α., έχουν μεγάλη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, για δύο κυρίως λόγους:

α) κοντά στην ασυνέχεια υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, δηλαδή οι τάσεις που επικρατούν τοπικά κοντά στην ασυνέχεια, είναι πολύ υψηλότερες από ότι στο υπόλοιπο υλικό

και

β) η εντατική κατάσταση που επικρατεί γύρω από μια ασυνέχεια, εμφανίζει τριαξονικότητα, δηλαδή γύρω από την ασυνέχεια επικρατεί μια σύνθετη εντατική κατάσταση.

Η επίδραση τέτοιου είδους γεωμετρικών ασυνεχειών στη συμπεριφορά ενός υλικού σε κόπωση, είναι μεγάλη. Για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση αυτή, κατασκευάζονται δοκίμια του υλικού στα οποία δημιουργείται εσκεμμένα μια εγχοπή και τα οποία στη συνέχεια υποβάλλονται σε δοκιμές κόπωσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου υλικού, αλλά από δοκιμές σε δοκίμια χωρίς εγχοπή. Η σύγκριση τέτοιων πειραματικών αποτελεσμάτων έχει δείξει ότι η ύπαρξη της εγχοπής μειώνει δραματικά το όριο διαρκούς αντοχής του

υλικού σε, αλλά και την διάρκεια ζωής σε κόπωση για ένα δεδομένο επίπεδο δυναμικής καταπόνησης.

1.8.2 Επίδραση μεγέθους

Ένα σημαντικό πρακτικό πρόβλημα στην αντιμετώπιση της κόπωσης, είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε κόπωση ενός ογκώδους εξαρτήματος, έχοντας σαν δεδομένο τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης του υλικού του εξαρτήματος, τα οποία όμως προέρχονται από δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια μικρού μεγέθους.

Η εμπειρία, έχει δείξει ότι το μέγεθος ενός εξαρτήματος έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή σε κόπωση, δηλαδή η αντοχή σε κόπωση ογκώδων εξαρτημάτων είναι μικρότερη από εκείνη μικρού μεγέθους εξαρτημάτων ίδιου υλικού. Η εξέταση της επίδρασης του μεγέθους είναι καθαρά εμπειρική και δεν έχει αναπτυχθεί μια θεωρία που να καλύπτει όλα τα μεταλλικά υλικά. Αντίθετα έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης αυτής.

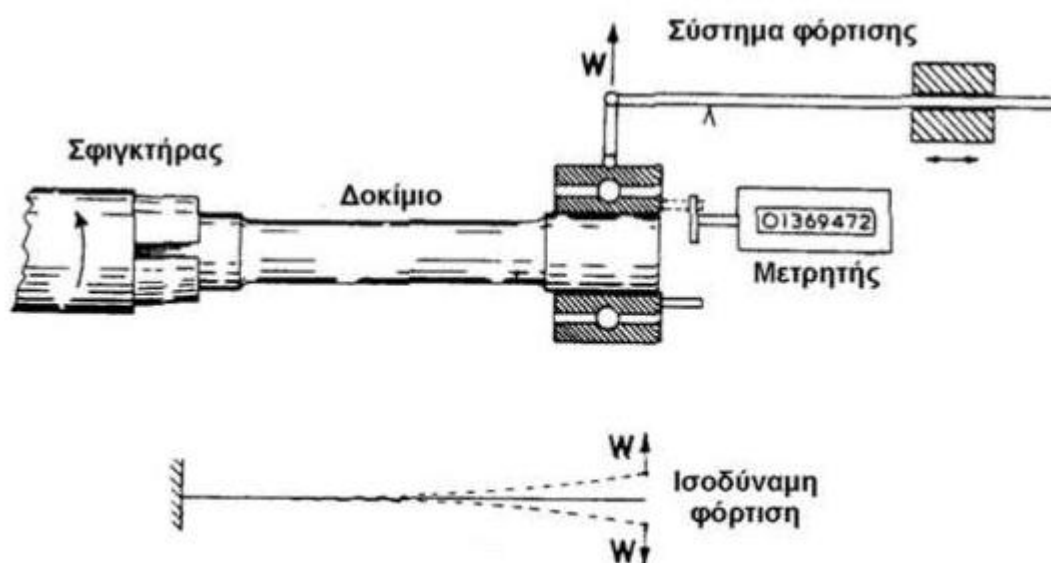
1.8.3 Κατάσταση της Επιφάνειας

Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι όλες οι αστοχίες λόγω κόπωσης, ξεκινούν από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμη και μικρές ανωμαλίες της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα η τραχύτητα, μπορούν να λειτουργήσουν σαν σημεία πυρήνωσης ρηγμάτων, τα οποία στη συνέχεια αναπτύσσονται και προκαλούν την τελική θραύση του υλικού.

Η επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας είναι καταλυτική κατά τη διάρκεια ζωής σε κόπωση ενός μεταλλικού υλικού. Συγκεκριμένα, όπως αποδεικνύεται με πειραματικές μεθόδους, όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα (δηλαδή όσο πιο ανώμαλη η επιφάνεια) τόσο μικρότερη η διάρκεια ζωής σε κόπωση.

1.9 Η δοκιμή της κόπωσης

Οι μηχανές δοκιμής κόπωσης, βασίζονται στην παρακάτω διάταξη:



Σχήμα 9: Διάταξη μηχανών δοκιμής κόπωσης

Το δοκίμιο υπό μορφή προβόλου, περιστρέφεται μέσω κατάλληλου σφιγκτήρα και φορτίζεται με κατακόρυφο φορτίο W στο ελεύθερο άκρο. Για κάθε περιστροφή 180° το φορτίο W αλλάζει φορά. Προκειμένου να καταρτιστεί το διάγραμμα S-N του υλικού, πραγματοποιούνται πολλές δοκιμές με διαφορετικό φορτίο W και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές ο αριθμός των κύκλων φόρτισης (N) που απαιτείται για την αστοχία (θραύση) του υλικού.

1.10 Μηχανισμός αστοχίας λόγω κόπωσης

1.10.1 Χαρακτηριστικές περιοχές επιφάνειας θραύσης λόγω κόπωσης

Η αστοχία λόγω κόπωσης έχει αφετηρία κάποια επιφανειακή ατέλεια του υλικού, όπως π.χ. από επιφανειακή ρωγμή, χαραγή κ.λπ. Η ρωγμή που διαδίδεται λόγω κόπωσης, δημιουργεί ραβδώσεις στην επιφάνεια φόρτισης του μετάλλου, που η κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε έναν κύκλο εναλλαγής της τάσης. Η επιφάνεια θραύσης λόγω κόπωσης περιλαμβάνει συνήθως τρεις χαρακτηριστικές περιοχές

1. **Την περιοχή Α** , που είναι η περιοχή έναρξης της ρωγμής κόπωσης (συνήθως είναι μια επιφανειακή ατέλεια). Παρουσιάζεται ένας λαιμός στην επέκταση της ρωγμής κόπωσης, ο οποίος ανταποκρίνεται στο πεδίο τιμών του K κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται προώθηση της ρωγμής. Πρόκειται για την αποκαλούμενη **περιοχή χαμηλής επέκτασης της ρωγμής**. (low-growth regime).
2. **Την περιοχή Β**, που αποτελεί την επιφάνεια διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης και η οποία έχει μορφολογία παρόμοια με την εξωτερική επιφάνεια αχιβάδας.
Και τέλος,
3. **Την περιοχή Γ**, που αποτελεί την επιφάνεια τελική θραύσης με χαρακτηριστική κοκκώδη (τραχιά) μορφολογία, η οποία προκαλείται από την ασταθή διάδοση της ρωγμής γύρω από τα όρια των κόκκων του μετάλλου. Συγκεκριμένα, σε υψηλές τιμές του ΔK παρατηρείται ασταθής συμπεριφορά, η οποία οδηγεί σε ταχεία επέκταση της ρωγμής, μέχρι την τελική θραύση.

Οι έντονες μηχανικές καταπονήσεις αλλά και η παρουσία διαβρωτικών συνθηκών του περιβάλλοντος, υποβοηθούν το φαινόμενο της κόπωσης, με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία πολλών υλικών. Ο ελλιπής σχεδιασμός μεταλλικών εξαρτημάτων (ύπαρξη γωνιών και γενικά εγκοπών) δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων και μείωση της αντοχής τους σε κόπωση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση επιτυγχάνεται με την εξάλειψη επιφανειακών ατελειών (υποψήφιος θέσεις έναρξης της ρωγμής) με λείανση και με μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης, όπως για παράδειγμα με αμμοβολή-υαλοβολή, ενανθράκωση, εναζώτωση, κ.λπ.

1.10.2 Εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης

Οι εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης, ομαδοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. **Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής:** Σε αυτές το δοκίμιο υπόκειται σε μεγάλο κύκλο εναλλασσόμενων φορτίσεων, σε επίπεδα τάσεων τέτοια ώστε να επέλθει έναρξη και κατ' επέκταση προώθηση ρωγμών μέχρι τη θραύση.
2. **Δοκιμές εστιασμένες στην προώθηση της ρωγμής:** Σε αυτές εφαρμόζονται μοντέλα της θραυστομηχανικής ικανά να υπολογίσουν την ταχύτητα προώθησης της ρωγμής με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις αλλά σε προρωγματωμένα δοκίμια (pre-cracked specimen).

Στην περίπτωση αυτή, μπορεί το περιβάλλον δοκιμής, να είναι από χημικής πλευράς ήπιο. Μπορεί όμως το φαινόμενο να μελετηθεί και σε επιθετικό από χημική άποψη περιβάλλον, οπότε γίνεται λόγος για κόπωση σε διαβρωτικό περιβάλλον (corrosion fatigue). Σε μεγάλες κατασκευές, η ύπαρξη μιας ρωγμής δε συνεπάγεται αυτόματα άμεση ευστοχία με θραύση μετά από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Μπορεί να κρύβεται αρκετός χρόνος ζωής της κατασκευής μέχρις ότου η ρωγμή αποκτήσει μέγεθος ικανό (κρίσιμο) για να επέλθει αστοχία. Ο στόχος της μελέτης προώθησης της ρωγμής κόπωσης είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού προώθησης των υπο-κρίσιμων ρωγμών πριν αυτές αποκτήσουν το κρίσιμο μέγεθος που οδηγεί στην τελική ευστοχία. Μέχρι τότε η κατασκευή είναι σε λειτουργία.

1.10.3 Δοκιμές εστιασμένες στην έναρξη της ρωγμής.

Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει αρχική διάκριση κόπωσης μικρού αριθμού κύκλων φόρτισης (low-cycle fatigue, LCF) και κόπωσης υψηλού αριθμού κύκλων φόρτισης (high-cycle fatigue, HCF).

Το μέγεθος της ονομαστικής τάσης (nominal stress) η οποία εφαρμόζεται κυκλικά σε κάποιο δοκίμιο μετράται με το μέγεθος της

υπέρτασης. (overstress). Αυτή είναι το ποσό της τάσης κατά το οποίο η κανονικοποιημένη τάση ξεπερνά το όριο κόπωσης ή αλλιώς την αντοχή σε κόπωση του υλικού. Έτσι:

1. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης τους οποίους μπορεί να αντέξει (endure) ένα υλικό υπό χαμηλή υπέρταση είναι υψηλός. Στην περίπτωση αυτή γίνεται λόγος για HCF.
2. Όσο το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης μεγαλώνει είναι πιθανή η ύπαρξη πολλαπλών ρωγμών. Το μέγεθος της επιφάνειας τελικής αποκόλλησης του δοκιμίου μεγαλώνει επίσης. Η υπέρταση είναι μεγάλη και γίνεται λόγος για LCF.

Αυθαίρετο, εν τούτοις όμως κοινά αποδεκτό, όριο διαχωρισμού των δύο πεδίων (HCF και LCF) είναι το διάστημα μεταξύ 10^4 και 10^5 κύκλων φόρτισης.

Στην πράξη, ο διαχωρισμός αυτός υλοποιείται με τον προσδιορισμό του επικρατούντος χαρακτήρα παραμόρφωσης, η οποία επιβάλλεται στο δοκίμιο με τις κυκλικές φορτίσεις. Στην περίπτωση που είναι ελαστική παραμόρφωση, γίνεται λόγος για HCF. Αν πάλι είναι πλαστική, για LCF. Κι αυτό όμως με τη σειρά του εξαρτάται από τις ιδιότητες του μετάλλου όπως επίσης από το μέγεθος της κανονικοποιημένης τάσης.

1.10.4 Τα δοκίμια της δοκιμής κόπωσης.

Για τη δοκιμασία αυτή έχουν προταθεί και κατασκευασθεί πολλές διατάξεις (σε αντίθεση με άλλες μηχανικές καταστροφικές δοκιμές μετάλλων, όπου η φιλοσοφία δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό στα πλαίσια ενός τύπου δοκιμών).

Τα δοκίμια της δοκιμής κόπωσης περιγράφονται αρχικά από τον τύπο φόρτισής τους:

- Καθαρή αξονική φόρτιση
- Επίπεδος λυγισμός
- Περιστρεφόμενη ράβδος
- Εναλλασσόμενη στρέψη

- Συνδυασμός των τάσεων

Οι μηχανές κόπωσης πολλές φορές είναι universal και μπορούν έτσι να εκτελέσουν όλους τους παραπάνω τύπους φόρτισης. Οι μηχανές λοιπόν ομαδοποιούνται με βάση τις διαφορές φιλοσοφίες κατασκευής φιλοσοφίες κατασκευής τους:

- i. Από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά τους (αξονικής φόρτισης, επίπεδου λυγισμού, περιστρεφόμενης ράβδου κ.λπ.)
- ii. Από τις παραμέτρους ελέγχου της δοκιμής (φορτίο, παραμόρφωση, ροπή κ.λπ.)
- iii. Από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (ηλεκτρομηχανικές, σερβοϋδραυλικές, ηλεκτρομαγνητικές κ.λπ.).

Εν συνεχεία θα γίνει εστίαση σε δύο κρίσιμα σημεία της δοκιμής, τα οποία επηρεάζουν ριζικά τη συμπεριφορά του υλικού: Στις αρπάγες πάκτωσης των δοκιμίων στις μηχανές και στη μορφή των δοκιμίων.

Οι δύο αυτές παράμετροι θα πρέπει να μελετώνται προσεκτικά πριν επιχειρηθεί δοκιμή σε κόπωση και μεταφορά των δεδομένων της από το δοκίμιο σε πιο σύνθετη κατασκευή.

1.10.5 Τρόποι μέτρησης του μεγέθους της ρωγμής.

Στο δοκίμιο που υποβάλλεται σε κόπωση, το μέγεθος της προώθησης της ρωγμής μετράται με τρεις μεθόδους:

1. Με την **οπτική μέθοδο** (optical technique) με ένα μετακινούμενο οπτικό μικροσκόπιο χαμηλής ισχύος και με μεγέθυνση 20 έως 50x. Οι μετρήσεις του μήκους γίνονται κατά τακτά χρονικά διαστήματα (ελάχιστο ποσό επέκτασης της ρωγμής μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων, τα 0.2mm).
2. Με τη **μέθοδο μέτρησης του ανοίγματος της ρωγμής** (compliance method of crack extension). Ο συμβιβασμός στην περίπτωση ενός ελαστικά καταπονούμενου μετάλλου που έχει μια αρχική ρωγμή,

εκφράζεται ως ο λόγος της μετατόπισης (άνοιγμα στο χείλος της ρωγμής) προς το εφαρμοζόμενο φορτίο.

3. Με τη **μέθοδο ρύθμισης του ηλεκτρικού δυναμικού** (electric potential crack monitoring technique). Η μέθοδος αυτή κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια έναντι των δύο προηγούμενων. Η αρχή της βασίζεται στο γεγονός ότι επέρχεται μια παραμόρφωση στην κατανομή του πεδίου του ηλεκτρικού δυναμικού γύρω από κάθε ασυνέχεια ενός ηλεκτρικά φορτισμένου μετάλλου, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται ευθέως από το σχήμα και το μέγεθος της ασυνέχειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Γενικά περί μηχανών κάμψης για δοκιμή κόπωσης.

Είναι δύσκολο να πει κανείς, ποιός είναι ο πιο κοινός τύπος μηχανής κόπωσης: της **περιστρεφόμενης μηχανής** (rotating beam) ή της **επαναλαμβανόμενης κάμψης** (repeated bend). Βεβαίως, για πολύ μεγάλο αριθμό μηχανών, οι δύο αυτοί τύποι με αναρίθμητες παραλλαγές, αποτελούν τους δύο πιο διαδεδομένους τύπους μηχανών κάμψης.

Οι μηχανές κάμψης για κόπωση, συνήθως θεωρούνται κατάλληλες για μελέτες στην επιφάνεια του δοκιμίου, επειδή αυτή παραμορφώνεται το μέγιστο. Επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως για υλικά τα οποία είναι σε μορφή φύλλου ή πλάκας. Επειδή η ροπή κάμψης μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος του προβόλου, τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στην κάμψη, συνήθως λεπταίνουν γραμμικά ως προς το πάχος ούτως ώστε να επιτραπεί σε μια διατομή του δοκιμίου να αποκτήσει ομοιόμορφα μέγιστη παραμόρφωση ινών. Στις μηχανές κάμψης το κυρίως πρόβλημα βρίσκεται στην περιοχή των σφιγκτήρων (gripping). Η σύσφιξη αυτή, συχνά προκαλεί υπερβολική φθορά λόγω τριβής (fretting) και συνεπώς η αστοχία μπορεί να γίνει στα σφιγμένα άκρα του δοκιμίου. Ένα πείραμα λοιπόν, μπορεί να αποτύχει, αν το δοκίμιο δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένο (fatigue design). Επίσης μικρά ποσά στρέψης (twist) του δοκιμίου που οφείλονται στη μη ευθυγράμμιση των σφιγκτήρων μπορεί να προκαλέσουν μη επιπλέον καταπόνηση. Η μείωση της φθοράς λόγω τριβής (γδάρισμα) στους σφιγκτήρες, γίνεται με κατάλληλα παρεμβύσματα (antichafing inserts). Η τροποποίηση αυτή, πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε η στερεότητά του σφιγκτήρα να μην αλλάξει.

2.2 Μηχανή κόπωσης εφελκυσμού-θλίψης Schenck

2.2.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη, συντήρηση κι επαναλειτουργία μηχανής δοκιμών αντοχής σε κόπωση. Πρόκειται για μηχανήμα της γερμανικής εταιρίας Carl Schenck, έτους κατασκευής 1959, το οποίο λειτουργεί με επαναλαμβανόμενη κάμψη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έχουν ως εξής:

Εναλλασσόμενο Φορτίο: 80-1000Kp

Μέσο φορτίο: 0-1200Kp

Μηχ. Συνολικό Φορτίο: 2000Kp

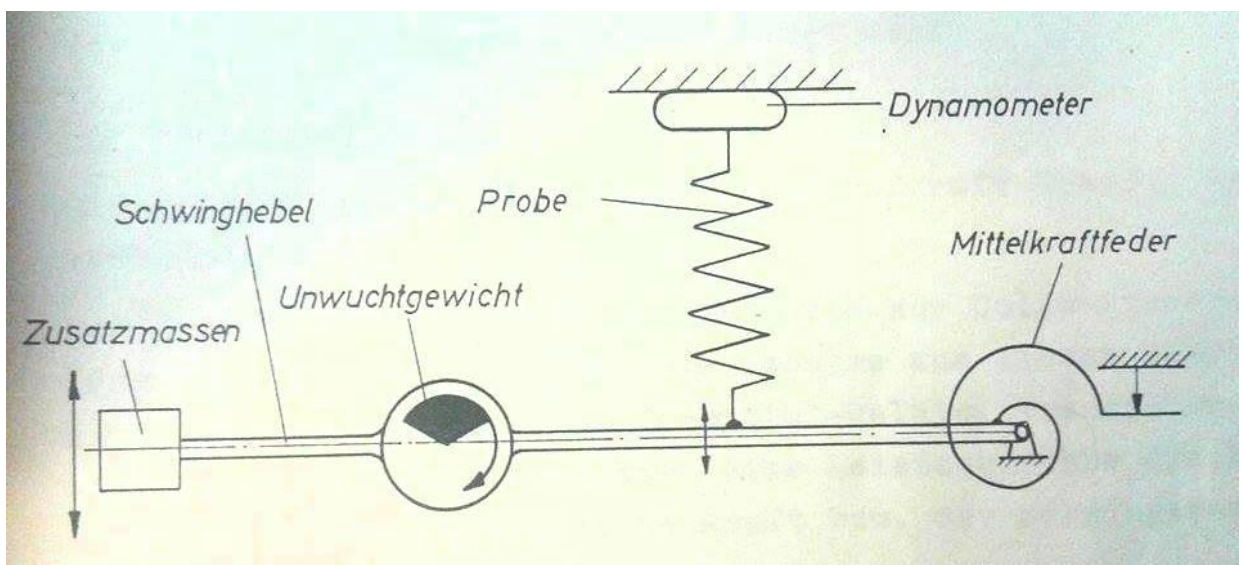
Πλάτος Παραμόρφωσης: 10mm

Συχνότητα Φορτίου: 700-6000RPM

Σφάλμα: 1/1-1/5 Μεγίστου συνολικού Φορτίου 1-3% του φορτίου για φορτία μικρότερα του 0.01t.

2.2.2 Αρχή λειτουργίας

Το μηχανήμα λειτουργεί με βάση την αρχή του συντονισμού. Συγκεκριμένα, βασίζεται στον συντονισμό από περιστρεφόμενες έκκεντρα μάζες ενός κλειστού βρόχου αποτελούμενου από μία μεγάλη σχεδόν άκαμπτη μάζα και από το ελαστικό δοκίμιο.



2.2.3 Μέρη Εξεταζόμενης Μηχανής

Η μηχανή αποτελείται από τα εξής τμήματα:

1. **Σώμα της μηχανής:** Το σώμα της μηχανής είναι ιδιαίτερα στιβαρό. Αποτελείται από ένα δύσκαμπτο «κορμό» αποτελούμενο από συγκολλητά φύλλα. Στα πόδια της μηχανής υπάρχουν ελαστικοί σύνδεσμοι για την απομόνωση των κραδασμών.

Υπάρχουν δύο στρογγυλές τρύπες σε κάθε πλευρά της βάσης περιβλήματος, ελαφρώς κάτω από το τραπέζι. Για τη μεταφορά της μηχανής, μπαίνει σε κάθε ένα από τα ανοίγματα αυτά, στρογγυλή χαλύβδινη ράβδος, διαμέτρου 40 mm και μήκους 660mm.

Στο κάτω μέρος της βάσης, υπάρχουν έξι αποσπώμενες θύρες επισκεψιμότητας. Τρεις στο μπροστά μέρος και τρεις στην πίσω πλευρά. Στη μεσαία πίσω θύρα, υπάρχει ειδικός αισθητήρας, ο οποίος θέτει ως προϋπόθεση, για λόγους ασφαλείας, να είναι κλειστή ώστε να λειτουργήσει το μηχάνημα.

2. **Ταλαντευόμενη διάταξη φορτίου:** Στην πίσω δεξιά πλευρά βρίσκεται η ηλεκτρική μονάδα που ρυθμίζει την ταλάντωση του δοκιμίου. Αποτελείται από κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος λειτουργεί με εξωτερική τροφοδότηση από ζεύγος, έναν ιμάντα μετάδοσης κίνησης, αντικραδασμικό κι έναν εύκαμπτο άξονα που κινεί την ταλαντευόμενη συσκευή φορτίου. Ο ιμάντας μετάδοσης της κίνησης, έχει δύο ταχύτητες.

Στην πίσω κεντρική θύρα, βρίσκεται η συσκευή συντονισμού του φορτίου. Αυτή αποτελείται από:

- Ένα βραχίονα rocket (ποδομοχλό) ο οποίος ρυθμίζει τη διέγερση του AC ηλεκτροκινητήρα που υπάρχει επίσης στο κύριο στέλεχος της μηχανής. Ο ποδομοχλός επενεργεί στη σύμπλεξη και ρυθμίζει την αύξηση ή τη μείωση της δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο.

- Ένα φυγοκεντρικό διεγέρτη, ο οποίος αναφέρεται στον εύκαμπτο άξονα.
 - Μία ταλαντευόμενη κεφαλή, η οποία μεταδίδει τις δονήσεις της ταλάντωσης μέσω του χειρισμού του ποδομοχλού, στο προσδεμένο πειραματικό δοκίμιο. Με την προσθήκη αντιβάρων, τα οποία συναρμολογούνται επί του μοχλού ταλάντωσης, μεταβάλλεται η φυσική συχνότητα, οπότε και η συχνότητα ταλάντωσης του δοκιμίου.
3. **Μεσαία συσκευή φορτίου:** Αποτελείται από το οδηγούμενο άνω τμήμα(κεφαλή) της μηχανής, το οποίο εκτελεί κατακόρυφη κίνηση μέσω οδοντωτού κανόνα κι ασφαλίζει κατάλληλα με κοχλίες. Το άνω οδηγούμενο τμήμα, μετακινείται κατάλληλα ώστε να εφαρμόζει πλήρως και να προσδένεται η άνω πλευρά του πειραματικού δοκιμίου.
 4. **Ιδιοσυσκευές σταθεροποίησης δοκιμίου για το πείραμα κόπωσης:** Το πειραματικό δοκίμιο πακτώνεται και στις δύο πλευρές του με δύο ζεύγη αρπάγων και συνοδευτικούς κοχλίες. Το κάτω τμήμα του προσδένεται στην ταλαντευόμενη κεφαλή της βάσης της μηχανής και το άνω τμήμα στην κινούμενη κεφαλή της, αφού το ύψος αυτής ρυθμιστεί κατάλληλα και ασφαλιστεί από τους κοχλίες συγκράτησης.
 5. **Μετρητές:** Στην κινούμενη άνω κεφαλή της μηχανής υπάρχει ενσωματωμένο δυναμόμετρο. Όταν εφαρμοστεί δυναμικό φορτίο στο δοκίμιο, μέσω ενός περιστρεφόμενου κατόπτρου και του φωτός που υπάρχει στην κεφαλή, σχηματίζεται φωτεινή λωρίδα, η οποία μας δίνει και την ένδειξη που ζητάμε(ακριβώς στο κέντρο).

Αν πρέπει να περιοριστεί, πρέπει να πλησιάσουν οι δύο ακροδέκτες που υπάρχουν, βλέποντας μέσα από το ειδικό «μάτι» που υπάρχει. Έτσι διορθώνεται η μέση τιμή της καταπόνησης από τον DC κινητήρα. Επίσης, στο αριστερό τμήμα του κορμού της μηχανής υπάρχει μετρητής των κύκλων φόρτισης της μηχανής.

6. Πίνακας ελέγχου: Από εδώ γίνεται ο χειρισμός του μηχανήματος. Συγκεκριμένα, το Control Panel απαρτίζεται από:

- Διαφορικό ρελέ εύρους ταλάντωσης.
- Διαφορικό ρελέ μέσης δύναμης
- Διακόπτες εναλλαγής εύρους και μέσης δύναμης.
- Button εκκίνησης.
- Διακοπή εφαρμογής φορτίου.
- Κεντρικός διακόπτης on-off μηχανήματος.
- Διακόπτης ρύθμισης κυμαινόμενου φορτίου (3 mode λειτουργίας).
- Θέση χαμηλότερης δυνατής συχνότητας.
- Θέση υψηλότερης δυνατής συχνότητας.

2.3 Κατάσταση εξεταζόμενης μηχανής

Σύμφωνα με μαρτυρίες, η μηχανή εκτελούσε κανονική λειτουργία στο συγκρότημα Πατησίων. Όταν χρειάστηκε να μεταφερθεί, αποσυνδέθηκε πρόχειρα και μεταφέρθηκε στο τωρινό εργαστήριο των Στοιχείων Μηχανών. Έκτοτε, δε λειτούργησε ποτέ ξανά. Τα καλώδια που συνέδεαν το Control Panel με το κύριο τμήμα της μηχανής, ήταν κομμένα κι είχαν πρόχειρα τοποθετημένες αυτοκόλλητες ετικέτες που τα αντιστοιχίζαν. Η δε φθορά των καλωδίων ήταν προχωρημένη, καθώς για μεγάλο χρονικό διάστημα ακουμπούσαν σε γράσα και λάδια με τα οποία ήταν λερωμένο το δάπεδο της μηχανής. Το control ποδός είχε δύο σπασμένα button και η κινούμενη κεφαλή της μηχανής δύο σπασμένους μοχλούς. Είχαν αφαιρεθεί οι αρπάγες και οι κοχλίες συγκράτησης του δοκιμίου. Γενικά η όλη εικόνα έδειχνε τη χρόνια παύση λειτουργίας (Παράρτημα 2)

2.4 Προκαταρκτική μελέτη και διαδικασία συντήρησης

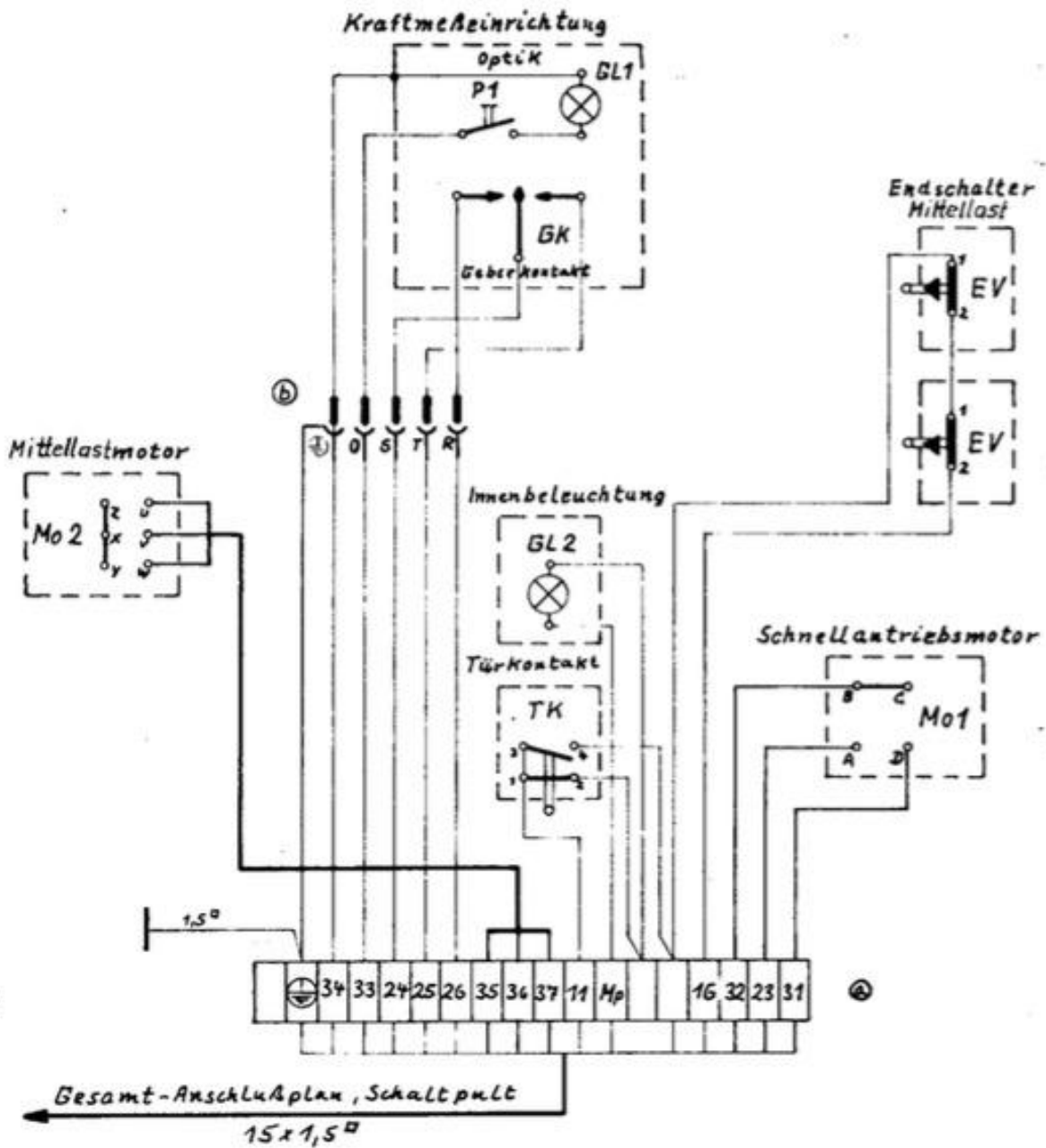
Τα πρώτα βήματα που διενεργήθηκαν, αφορούσαν τη σχετική έρευνα για το μηχάνημα. Η επισταμένη αναζήτηση στην κατασκευάστρια γερμανική εταιρία για την εύρεση τεχνικών περιγραφών και εγχειριδίου χρήσης, στέφθηκε με πλήρη αποτυχία, καθώς λόγω παλαιότητας δεν υπήρχε κανένα αρχείο. Σε συνεργασία με συνεργείο ηλεκτρολόγων, έγινε προσπάθεια να δοκιμαστεί η μηχανή και να αναγνωριστεί διερευνητικά η λειτουργία της, έστω και χωρίς εγχειρίδιο. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Άνοιγμα θυρίδων επίσκεψης και αφαίρεση πλαισίων πάνελ για τον πλήρη οπτικό έλεγχο.
2. Έλεγχος συνδέσεων κλεμμοσειρών.
3. Καταγραφή υλικών του Control Panel και του μηχανήματος.
4. Αποσύνδεση ρελέ ισχύος , θερμικού, μετασχηματιστή και λοιπών υλικών ώστε να εφαρμοστεί μονομερώς η τάση λειτουργίας τους και να ελεγχθούν όσον αφορά την λειτουργία τους. Προέκυψε δυσλειτουργία σε δύο ρελέ, τα οποία αφαιρέθηκαν, λύθηκαν και καθαρίστηκαν .
5. Μετά την ολοκλήρωση των επί μέρους λειτουργιών απομονώθηκε και ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία των ασφαλειών των κυκλωμάτων. Προέκυψε δυσλειτουργία σε 3 ασφάλειες οι οποίες καθαρίστηκαν και επανατοποθετήθηκαν.
6. Ελέγχθηκαν οι κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενης ρεύματος του μηχανήματος με εφαρμογή της απαιτούμενης τάσης.
7. Ελέγχθηκαν τα κυκλώματα των τερματικών διακοπών και των λοιπών στοιχείων του μηχανήματος όσον αφορά την ορθή τους λειτουργία. Επισκευάστηκε ένας τερματικός διακόπτης.
8. Αποτυπώθηκε σε σχέδιο το κύκλωμα αυτοματισμού του πάνελ .
9. Αποτυπώθηκε σε σχέδιο το κύκλωμα του μηχανήματος. Βάσει της αποτύπωσης που σχηματίστηκε κι ακολουθεί, προέκυψε πως:

Μεμονωμένα τα στοιχεία της πλάτης του Control Panel λειτουργούσαν κανονικά. Ωστόσο δεν υπήρχε έναυση, καθώς δεν προέκυπτε η απαιτούμενη ανορθωμένη τάση λειτουργίας. Δεδομένης της ορθής λειτουργίας των μεμονωμένων στοιχείων και της παραδοχής πως η αντιστοίχιση των κομμένων καλωδίων από το Control Panel στο κύριο μέρος της μηχανής ήταν 1 προς 1, έγινε η σύνδεση. Αφού αυτή ολοκληρώθηκε, παρουσιάστηκε πρόβλημα με την παροχή του τριφασικού ρευματοδότη, καθώς από τον ηλεκτρολογικό πίνακα έλειπε ο ουδέτερος. Αυτό διορθώθηκε κι ενισχύθηκε επίσης ο πίνακας του εργαστηρίου ώστε να «αντέχει» τη λειτουργία του μηχανήματος. Ωστόσο ήταν αδύνατη η εκκίνησή του.

Στο κομβικό αυτό σημείο, ύστερα από πρωτοβουλία του επιβλέποντος καθηγητή, ζητήθηκε η βοήθεια του τέως καθηγητή κ. Π. Μακρή, ο οποίος ήταν και ο τελευταίος που πραγματοποίησε πείραμα στο εν λόγω μηχάνημα, στα πλαίσια ερευνητικού έργου. Με την τεράστια συμβολή του, βρέθηκαν στο προσωπικό του αρχείο 2 αντίγραφα των επίσημων τεχνικών εγχειριδίων της κατασκευάστριας εταιρίας, τα οποία επεξηγούσαν πλήρως τόσο τις σχετικές τεχνικές λεπτομέρειες όσο και τη λειτουργία του. Ο κ. Μακρής μάλιστα, απάντησε σε πολλές διευκρινιστικές ερωτήσεις, τόσο για τη λειτουργία όσο και για τη διαδικασία διενέργειας πειραμάτων, πραγματοποιώντας επίσκεψη, ύστερα από σχετική πρόσκληση, στο εργαστήριο. Έχοντας πλέον κάθε απαραίτητη τεχνική περιγραφή, προχώρησε η συντήρηση του μηχανήματος μέσα από συγκεκριμένα βήματα. Αυτά, ως συνέχεια των αρχικών κινήσεων, ήταν: 10. Συγκρίθηκε και μελετήθηκε η κλεμμοσειρά του Control Panel με του μηχανήματος και προέκυψε η αντιστοίχιση της απαιτούμενης συνδεσμολογίας.

11. Υλοποιήθηκε η απαιτούμενη διασύνδεση Control Panel και μηχανήματος



12. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτοματισμού που αποτυπώθηκε, προέκυψε η απαίτηση συνεχούς κι εναλλασσόμενης τάσης για την λειτουργία του. Κατόπιν αυτού, εφαρμόστηκε η τριφασική τάση από το πεδίο και χρησιμοποιήθηκε κύκλωμα ανόρθωσης για την συνεχή τάση.

13. Αφού εφαρμόστηκαν οι απαιτούμενες τάσεις (AC & DC), μετρήθηκαν οι τάσεις σε συνδυασμό με τους διακόπτες και τα μπουτόν και κατόπιν οι λειτουργίες των ρελέ και λοιπών στοιχείων καθώς και η λειτουργία των μοτέρ. Λόγω ολίσθησης του ιμάντα του DC μοτέρ, αυτός αφαιρέθηκε κι αντικαταστάθηκε με νέο.

14. Να σημειωθεί ότι εκτός της τροποποίησης ελαφρώς της συνδεσμολογίας του πάνελ, χρησιμοποιήθηκαν νέα καλώδια για την διασύνδεση και στο εσωτερικό όλων των συνδέσεων της μηχανής και αντικαταστάθηκαν δύο μπουτόν χειρισμού.

15. Έγινε καθαρισμός όλων των ηλεκτρολογικών στοιχείων.

Κατόπιν όλων αυτών, καθαρίστηκε διεξοδικά με ειδικά χημικά υλικά το μηχάνημα, λιπάνθηκε στο υποδειγμένα σημεία με «γραφιτόγρασσο» κι ετοιμάστηκε για τον έλεγχο της ορθή λειτουργίας του, μέσω διενέργειας πειράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Προετοιμασία μηχανήματος κι εκκίνηση

Μεγίστης σημασίας, αποδείχτηκε η σωστή προετοιμασία της μηχανής πριν την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας. Από τον κατασκευαστή ακόμη, υπάρχουν συγκεκριμένα βήματα τα οποία πρέπει να τηρούνται με ακρίβεια, για την αποφυγή σφαλμάτων, αστοχιών και φυσικά πιθανών βλαβών κι ατυχημάτων.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθείται για την προετοιμασία του πειράματος, έχει ως εξής:

1. Σωστή πρόσδεση του πειραματικού δοκιμίου στις αρπάγες συγκράτησής του. Η επιφάνεια πρέπει να είναι καθαρή και να φροντιστεί η κατά το δυνατό πλήρης εφαρμογή του δοκιμίου στη μηχανή.
2. Επιβεβαίωση πως οι θύρες επισκεψιμότητας του κάτω τμήματος του μηχανήματος είναι σφραγισμένες. Ειδικά η πίσω μεσαία θύρα, η οποία διαθέτει τον αισθητήρα που κλείνει κύκλωμα.
3. Σωστή ρύθμιση στο Control Panel πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας. Αυτή περιλαμβάνει:
 - Οι δείκτες «Anlasser» και «Feldregler» να βρίσκονται στη θέση «0». Αν το «Anlasser» δεν είναι στο «0», δεν εκκινεί το μηχάνημα.
 - Οι τέσσερεις διακόπτες εναλλαγής, κάτω από τα δύο διαφορετικά ρελέ πρέπει να είναι στη θέση «0».
 - Στην κάτω πλευρά του Control Panel, επιλέγεται το 3^ο mode λειτουργίας για το κυμαινόμενο φορτίο.
4. Ο σερβομηχανισμός του άνω τμήματος της μηχανής, μέσω των δύο ακροδεκτών του, να είναι προσαρμοσμένος στο εκάστοτε φορτίο.
5. Τα χειροστρόφαλα, αριστερά και δεξιά του κυρίου τμήματος της μηχανής πρέπει να είναι ανοιχτά κατά την επιβολή του φορτίου ενώ κατόπιν ασφαρίζονται.
6. Με το διακόπτη στο πλαϊνό τμήμα του Control Panel γυρισμένο στο «1», ενεργοποιείται η μηχανή.

7. Ενεργοποιώντας το «**Antrieb Ein**» η φυγόκεντρη διέγερση ξεκινά.
8. Με την ενεργοποίηση του αντίστοιχου button στον ποδομοχλό (Θλίψη ή Εφελκυσμό) επιβάλλεται στο δοκίμιο η επιθυμητή μέση δύναμη.
9. Για την επιβολή του εναλλασσόμενου φορτίου χρησιμοποιούνται οι καμπύλες διόρθωσης του δυναμομέτρου, ανάλογα με την περίπτωση (θλίψη ή εφελκυσμός).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας, πέραν του πρακτικού αποτελέσματος που προσέφερε, μέσω της επαναλειτουργίας της μηχανής Schenck, συντέλεσε και σε κάτι ακόμη, πιο σημαντικό: Στην αναγνώριση, μέσω της μελέτης των δυνατοτήτων και των τεχνικών χαρακτηριστικών αυτής της κατηγορίας των μηχανημάτων, της σπουδαιότητας χρήσης τους σε πειραματικές δοκιμές.

Συγκεκριμένα, αποδεικνύονται χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης λειτουργίας συγκριτικά με τις σύγχρονες τους σερβο-υδραυλικές μηχανές. Η οικονομία αυτή που παρέχουν, είναι κι ένας από τους σημαντικούς λόγους που προτιμούνται για την πραγματοποίηση πολυκυκλικών δοκιμών κόπωσης. Σε πειράματα πολλών κύκλων, όπου οι χρόνοι πραγματοποίησης είναι ιδιαίτερα μεγάλοι, θα ήταν απλησίαστο από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης και κατά συνέπεια κόστους, η χρησιμοποίηση μιας σερβομηχανής.

Επίσης, οι οπτικοί μετρητές που φέρουν τα εν λόγω μηχανήματα, παρουσιάζουν μηδενική αδράνεια κι απείρως μεγαλύτερη αντοχή από τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς μετρητές. Η χρήση τους λοιπόν αξίζει και σε μετρητικό επίπεδο, τόσο λόγω χρόνου ζωής όσο κι ως προς την ευκολία επιδιόρθωσης κάποιας βλάβης, χωρίς να χρειαστεί να διακοπεί ένα πολυκυκλικό πείραμα κόπωσης που θα λαμβάνει χώρα στη μηχανή.

Από πλευράς ερευνητικού ενδιαφέροντος, μπορούν να λάβουν χώρα πειράματα τα οποία θα μελετούν την αντοχή σε κόπωση:

-Νέων υλικών

-Συνδυασμού υλικών (διμεταλλικά ελάσματα)

-Σύνθετων υλικών (τα οποία θα διαφοροποιούνται ανάλογα με τις ίνες τους)

-Νέων γεωμετριών δοκιμίων

-Ελαστομερών υλικών ή ακόμη κι

-Ολόκληρων κατασκευών που όμως θα έχουν το κατάλληλο μέγεθος, ώστε να μη διαταράσσουν την αρχή λειτουργίας των εν λόγω μηχανημάτων.

Από όλα τα παραπάνω επομένως, συμπεραίνουμε λοιπόν, πως το πεδίο αξιοποίησής τους αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευρύ και πολλά υποσχόμενο.

Βιβλιογραφία

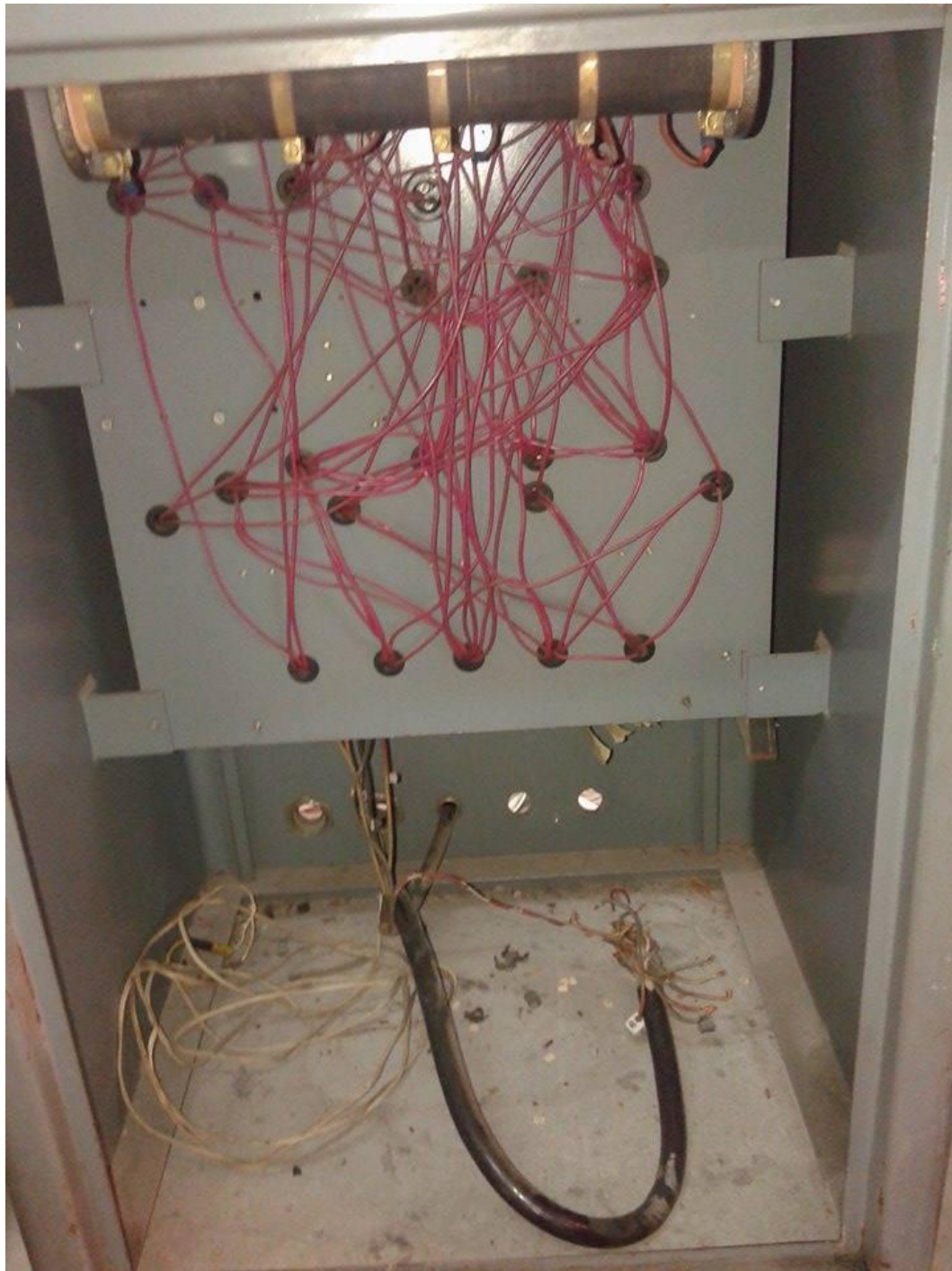
- [1] Manual for “Resonanz Pulser” PVM 002 in German Language, SCHENCK
- [2] Bedienungsanleitung zum Universalpulser in vertikaler Bauart , SCHENCK
- [3] Τσαμασφύρος Γ.Τ., Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων Ι, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1990
- [4] S.TIMOSHENKO, Μηχανική, εκδόσεις Α.Καράβια, Αθήνα 1964
- [5] Κίτσιος Κ., Εφαρμογή Ηλεκτρικής Μεθόδου στη Μηχανική Ανάπτυξη Ρωγμών Κόπωσης, Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1991
- [6]<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/3%20MHXANIKH%20SYMPERIFORAw.pdf>
- [7] http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VIII.pdf
- [8] http://philon.cheng.auth.gr/lmt/simeioseis/gtriant/8.Dokimi_se_kopwsi.pdf

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Φωτογραφικό υλικό



Φωτογραφία 1: Αρχική κατάσταση μηχανήματος



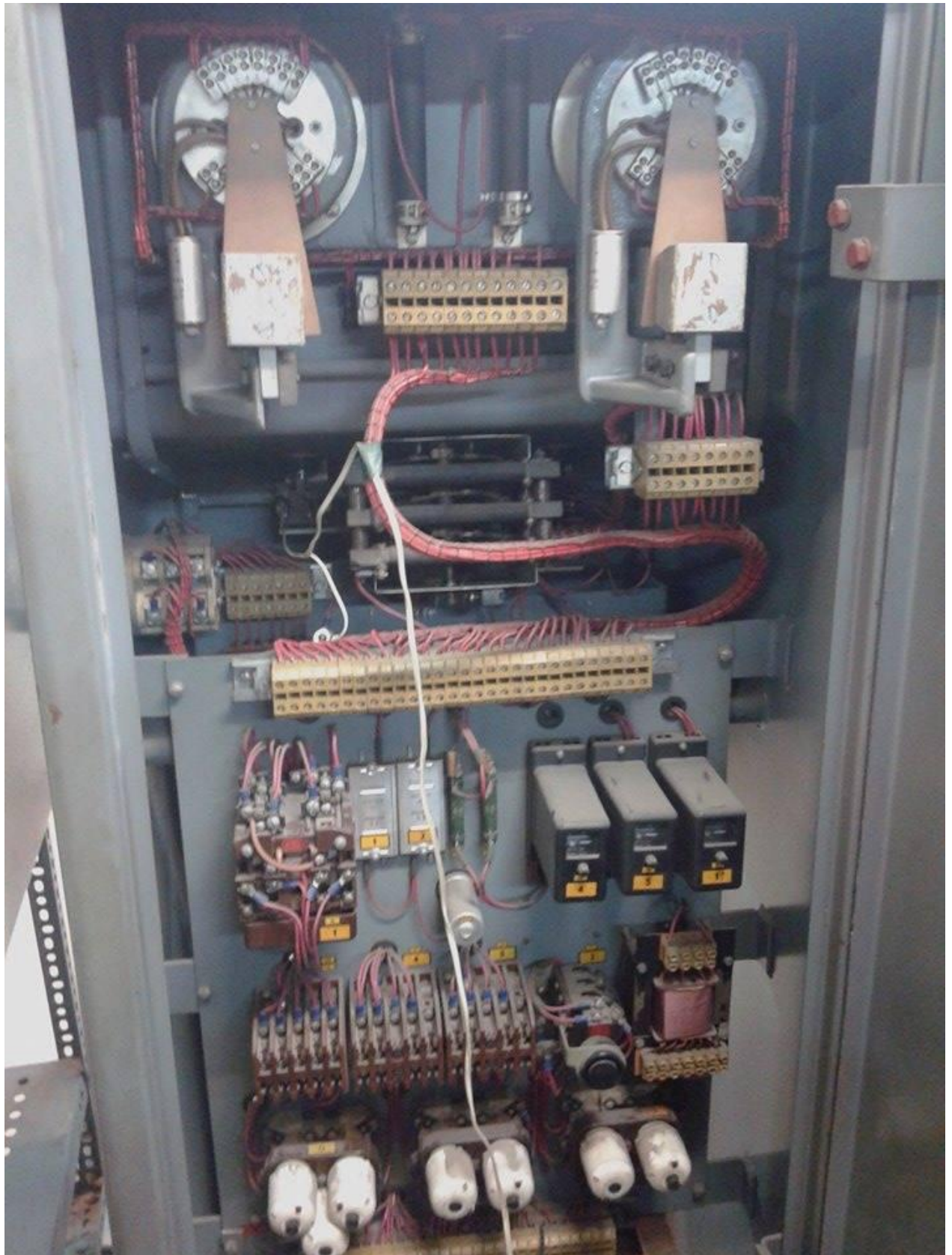
Φωτογραφία 2: Μπροστινό Τμήμα Control Panel



Φωτογραφία 3: Άνω κεφαλή μηχανής



Φωτογραφία 4: Control Panel



Φωτογραφία 5: Αυτοματισμοί Control Panel



Φωτογραφία 6: Τωρινή κατάσταση μηχανής