

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντοχή σε κόπωση συνδέσμων – κοχλίες, πείροι, συγκολλήσεις
και στοιχείων μηχανών – έδρανα, οδοντωτοί τροχοί, ελατήρια.



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Γαλαζούλας Αλέξανδρος

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γεωργιοπούλου Παναγιώτα

ΠΑΤΡΑ 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία με θέμα 'Αντοχή σε κόπωση συνδέσμων-κοχλίες, πείροι, συγκολλήσεις και στοιχείων μηχανών- έδρανα, οδοντωτοί τροχοί, ελατήρια μελετήσαμε την συμπεριφορά σε κόπωση συνδέσμων και στοιχείων μηχανών.

Στην πορεία της εργασίας εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τους συνδέσμους και τα στοιχεία μηχανών τα οποία μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα μέσα από εφαρμογές τις οποίες και παραθέτουμε στο τελευταίο κεφάλαιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|-----|
| Κεφάλαιο 1 | 13 |
| 1.0 Κοχλιωτοί σύνδεσμοι | 14 |
| 1.1 Κοχλίες που καταπονούνται σε εφελκυσμό..... | 19 |
| 1.2 Σύνδεσμοι που καταπονούνται σε διάτμηση-εφελκυσμό ή διάτμηση-κάμψη..... | 40 |
| 1.3 Υλικά κοχλιώσεων..... | 49 |
| 1.4 Σχέσεις μεταξύ του φορτίου συσφίξεως και της ροπής στρέψης | 55 |
| 1.5 Επιδράσεις της διαστασιολόνησης και της επέμβασης οπών | 57 |
| 1.6 Συγκεντρώσεις τάσεων σε κοχλίες και περικόχλια..... | 61 |
| Κεφάλαιο 2 | 65 |
| 2.0 Υποδοχές ή άγκιστρα..... | 66 |
| 2.1 Χρήση αντιτριβικών δακτυλίων | 72 |
| 2.2 Κοχλίες που εφαρμόζουν με παρεμβολή | 72 |
| Κεφάλαιο 3 | 74 |
| 3.0 Σύνδεσμοι με πείρους | 75 |
| Κεφάλαιο 4 | 83 |
| 4.0 Σύνδεσμοι με συγκόλληση | 84 |
| Οι συγκολλήσεις που θα αναφερθούμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και αερίου, οι συγκολλήσεις σημείου και Bonded joints..... | 84 |
| 4.1 Συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και αερίου | 84 |
| 4.2 Συγκολλήσεις σημείου..... | 98 |
| 4.3 Bonded joints | 100 |
| Κεφάλαιο 5 | 108 |
| 5.0 Έδρανα..... | 109 |
| 5.1 Επίδραση του φορτίου πριν τη λειτουργία στη διάρκεια ζωής του εδράνου..... | 113 |
| 5.2 Επιδράσεις της ταχύτητας, της λίπανσης και των υλικών | 125 |
| 5.3 Έδρανα με μανίκια..... | 131 |
| Κεφάλαιο 6 | 133 |
| 6.0 Οδοντωτοί τροχοί..... | 134 |
| 6.1 Οδοντωτοί τροχοί κίνησης..... | 141 |
| Κεφάλαιο 7 | 144 |
| 7.0 Ελατήρια | 145 |
| Κεφάλαιο 8 | 158 |
| Εφαρμογές | 159 |
| Παράδειγμα 1° | 159 |
| Παράδειγμα 2°..... | 160 |
| Παράδειγμα 3° | 161 |
| Παράδειγμα 4° | 162 |
| Παράδειγμα 5°..... | 164 |
| Παράδειγμα 6° | 165 |
| Παράδειγμα 7°: | 166 |
| Παράδειγμα 8° | 166 |
| Παράδειγμα 9 | 167 |
| Παράδειγμα 10° | 169 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 171 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρακτική του κατασκευαστικού σχεδιασμού διαιρείται εκ' φύσεως σε δύο βασικές κατηγορίες: τη γεωμετρική και την υλική. Η πρώτη εργασία του σχεδιαστή είναι συνήθως να επιλέξει ένα υλικό, αλλά αυτή η εκλογή εξαρτάται τις πιο πολλές φορές από απαιτήσεις σε χαρακτηριστικά κόπωσης, όπως η αντίσταση στη διάβρωση ή στην υψηλή θερμοκρασία. Ανεξάρτητα από την ιδιότητα που μας ενδιαφέρει περισσότερο, το υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε σε ένα σχέδιο αντίστασης στην κόπωση θα πρέπει να είναι ικανό να αντεπεξέλθει σε έναν αποδεκτό συνδυασμό πολλών ιδιοτήτων:

- 1) Επιτρεπόμενη τάση στον απαιτούμενο αριθμό στροφών.
- 2) Ιδιότητες εναλλασσόμενης τάσης.
- 3) Ευαισθησία εγκοπής: ζ ή K_f/K_t .
- 4) Σκληρότητα θραύσης: K_{1c} ή J .
- 5) Αναλογία μετάδοσης ρωγμής, για αργή, μη σταθερή ανάπτυξη.
- 6) Κρίσιμο μέγεθος ρωγμής, για γρήγορη, μη σταθερή θραύση.
- 7) Χαρακτηριστικό αρχικό μέγεθος ρωγμής.
- 8) Αναλογία διάβρωσης και ταίριασμα με παρακείμενα υλικά.
- 9) Θερμική, χημική και μεταλλουργική ισορροπία.
- 10) Ευαισθησίες στο σχήμα και/ή στο μέγεθος.
- 11) Ευαισθησία στις επιφανειακές καταστάσεις, όπως απανθράκωση των χαλύβων, μικρορωγμές σε κατεργασμένο βηρύλλιο ή το υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο εύθραυστο στρώμα στο τιτάνιο BETA III.

Δεν απαιτούν όλα τα σχέδια, αναγκαστικά, μια τιμή για όλες τις ιδιότητες και κάλλιστα μπορεί να μην είναι διαθέσιμα όλα τα δεδομένα για όλα τα υλικά, τις καταστάσεις και τους τύπους φόρτισης, αλλά απαιτείται μια λεπτομερής εξήγηση από τα παραπάνω αντικείμενα σαν ελάχιστο για να εκτιμήσουμε την επιλογή των υλικών. Οι επιλογές συνήθως γίνονται με βάση την επιλογή απλώς ενός σημείου σε μια γραφική παράσταση φορτίου επιμήκυνσης (καμπύλη S-N), μία όχι και τόσο ασφαλή διαδικασία που υποδεικνύει την αναγκαιότητα επιπρόσθετων μελετών όπως:

- 1) Ο τρόπος φόρτισης και ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των διαθέσιμων δεδομένων και των απαιτήσεων του σχεδίου.
- 2) Η δυνατότητα εφαρμογής των κριτηρίων του Miner και του Goodman.
- 3) Η διαθεσιμότητα του επιθυμητού τύπου (σχήμα της κάθετης επιφάνειας). Δεν είναι δυνατόν να παραχθούν όλα τα κράματα και οι οργανικές συνθέσεις σε όλους τους τύπους.

Πρωτίστως, στη σκέψη του σχεδιαστή κατά τη διάρκεια της περιόδου της λήψης της απόφασης θα πρέπει να είναι το γεγονός ότι οι υψηλές ανώτατες αντοχές συχνά δεν εκφράζουν μεγάλες αντοχές σε κόπωση. Γενικά, το εύρος των απαιτούμενων αντοχών σε κόπωση σε οποιαδήποτε κλάση κράματος (όπως το σφυρήλατο αλουμίνιο) είναι αρκετά μικρότερο από το εύρος των ανώτατων αντοχών. Η συμπεριφορά σε κόπωση του τελευταίου μέλους εξαρτάται περισσότερο από τη γεωμετρία του μέλους και από τη διάταξη της φόρτισης και όχι από το υλικό.

Στο παρόν επίπεδο γνώσης δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιούμε ποσοτικά οποιουδήποτε περιοριστικούς κανόνες στο σχεδιασμό αντίστασης σε κόπωση, εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας στους τρόπους, στα φορτία, στις πιέσεις, στα υλικά και στις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπιστούν. Εντούτοις, ποιοτικά μπορεί να καθοριστεί ένας αριθμός χρήσιμων πρακτικών οι οποίες όταν εφαρμόζονται με καλή μηχανολογική κρίση, αναμένονται να μειώσουν σημαντικά ενδεχόμενα προβλήματα κόπωσης.

Η τελειότητα στη λεπτομέρεια, η εξοικονόμηση βάρους και η απλότητα του σχεδίου είναι άμεσα σχετιζόμενες. Το αποτέλεσμα αυτών των συνδυαζόμενων χαρακτηριστικών είναι συνήθως χαμηλού κόστους, εύκολα κατασκευάσιμο, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και με αυξημένη αξιοπιστία. Αυτό είναι σημαντικό από μια πρακτική άποψη γιατί ο διαθέσιμος χρόνος είναι συνήθως πολύ μικρός για να αναπτύξεις και να βελτιώσεις ένα σχέδιο που προέρχεται από μια πολύπλοκη προσέγγιση. Ένα πολύπλοκο σχέδιο μπορεί να φαίνεται καλύτερο, περισσότερο ενδιαφέρον και πιο προκλητικό, αλλά πιο συχνά προκύπτουν προβλήματα κατά τη διάρκεια της κατασκευής, των δοκιμών και της χρήσης. Γενικώς, οι ίδιοι βασικοί κανόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε από τις βιομηχανίες αυτοκινήτων, πλαισίων αεροσκαφών, ναυπηγικής και επεξεργασίας υλικών. Επίσης, και για τις επονομαζόμενες στατικές κατασκευές όπως οι γέφυρες, οι πυραμίδες και οι δεξαμενές, ο άνεμος και οι σεισμικές δονήσεις προκαλούν ένα αποτέλεσμα κόπωσης. Η προηγούμενη εμπειρία και η μελέτη θα μπορούσαν να μεταφερθούν

από το ένα πεδίο στο άλλο, αν και θα έπρεπε να ληφθούν ορισμένες προφυλάξεις, ειδικότερα όταν παλιά σχέδια μπορεί να μην ταιριάζουν σε ένα διαφορετικό περιβάλλον.

Οι προτεινόμενες διαδικασίες, είτε είναι εφαρμόσιμες είτε όχι, γίνονται συχνά ανακατεμένοι κανόνες που κυβερνούν τη λειτουργία του σχεδιασμού. Οι συστάσεις ή οι σχεδιαστικές οδηγίες είναι συνήθως πολύ πιο κατάλληλες, και μάλλον ο καλύτερος τρόπος. Με αυτή την παραδοχή ακολουθούν μερικοί από τους πιο κατάλληλους οδηγούς για το σχεδιασμό κατασκευών και μηχανών;

- 1) Το σχέδιο να παραμείνει απλό.
- 2) Να παρέχει πολλαπλά μονοπάτια φόρτισης όπου είναι εφικτό (ασφαλής αποτυχία).
- 3) Να δίνεται πρόσθετη προσοχή σε στοιχεία και εγκαταστάσεις που φορτίζονται εφελκυστικά.
- 4) Να σπάζονται όλες οι κοφτερές ακμές. Οι κρίσιμα φορτισμένες περιοχές να κατεργάζονται καλά.
- 5) Να γίνονται αποτελεσματικές κατασκευαστικές βαθμιδωτές ενισχύσεις στον τομέα διασταύρωσης.
- 6) Όταν είναι δυνατό να μειώνεται η εκκεντρότητα των συνδέσμων και των εξαρτημάτων.
- 7) Να γίνεται σχεδιασμός των μελών για να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερα προβλήματα στην εγκατάσταση, για τις χαμηλότερες εναπομένουσες και πριν τη λειτουργία ελαστικές τάσεις.
- 8) Να αποφεύγεται η υπερτοποθέτηση εγκοπών στο σχέδιο.
- 9) Να εφαρμόζονται κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας σε δικτυωτές τάσεις γύρω από οπές και κοψίματα.
- 10) Να μειώνονται οι τάσεις σε ηλωτά και συγκολλητά μέλη στις ελάχιστες του σχεδίου. Όπου είναι δυνατόν να γίνεται σχεδιασμός για τάση τριβής.
- 11) Προστασία των μελών από τη διάβρωση.
- 12) Να γίνεται κατάλληλη επιλογή των υλικών με κύρια κριτήρια το κόστος, την επιτρεπόμενη αντοχή, την κατασκευασσιμότητα και το περιβάλλον λειτουργίας.
- 13) Καθορίστε τα κατασκευαστικά στοιχεία έτσι ώστε η γεωγραφική διεύθυνση τους (κατά τη κατασκευή) να είναι παράλληλη με το προκύπτον μείζον φορτίο.
- 14) Να γίνονται εργαστηριακές δοκιμές σε όλες τις καινούριες συνδέσεις και να συγκρίνονται με τα ήδη δοκιμασμένα σχέδια.

- 15) Να καθιερώνονται αξιόπιστες τεχνικές συγκόλλησης.
- 16) Να κατασκευάζονται αξιόπιστα και ακριβή εργαλεία για την κατά-σκευή των μελών παραγωγής.
- 17) Να δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στις κατασκευαστικές τεχνικές για τη βέλτιστη διαμόρφωση των στοιχείων.
- 18) Να παρέχεται εύκολη πρόσβαση για την επιθεώρηση συντήρησης της κατασκευής.
- 19) Να παρέχονται διαδικασίες επιθεώρησης κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της συναρμολόγησης.
- 20) Όπου είναι αναγκαίο ή επιθυμητό, να παρέχεται απορρόφηση των κραδασμών και/ή των δονήσεων για εύθραυστα αντικείμενα.
- 21) Να επιλέγονται διαμορφώσεις με υψηλή κατασκευαστική αντοχή-μεγάλος αριθμός συνδέσμων.
- 22) Να γίνεται βελτιστοποίηση των συχνοτήτων ηχηρότητας του στοιχείου, λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον εργασίας και την ευπάθεια του εξοπλισμού.
- 23) Να κλιμακώνονται οι αντηχήσεις για τα αντικείμενα εντός της συναρμογής.

Η τελειότητα στο σχεδιασμό προκύπτει όχι μόνο από τη γνώση, την πείρα και το βασικό ταλέντο, αλλά κυρίως από την απαραίτητη ικανότητα στο να βλέπεις τι χρειάζεται για να κρίνεις το πρόβλημα και να εφαρμόζεται αυτή η κρίση στο σχεδιασμό. Για να παράγουμε επαρκή εργαλεία ο σχεδιαστής χρειάζεται τη στενή συνεργασία ειδικών, ικανούς στην πραγματοποίηση αναλύσεων δυναμικών τάσεων, ακουστικών και μεταλλουργικών αναλύσεων και ειδικών στην ανάλυση αξιοπιστίας, όπως και αυτούς που είναι πεπειραμένοι στην κατασκευή και την επισκευή.

Αν και ένας κατασκευαστικός σχεδιαστής δεν μπορεί να αναμένει να ικανοποιήσει όλους αυτούς τους περιορισμούς, είναι αναγκαία η μερική γνώση αυτών όχι μόνο για να ολοκληρώσει το σχέδιο, αλλά για να εξοικονομήσει χρόνο και να βελτιστοποιήσει τη πιθανότητα της επιτυχίας.

Ο σχεδιασμός σε κόπωση ή όπως μερικοί το θέτουν, ο σχεδιασμός εναντίον της αστοχίας εξαιτίας της κόπωσης, μπορεί να έχει σαν αντικείμενα την απεριόριστη διάρκεια ζωής, το μηδενικό βάρος, την απεριόριστη αντοχή, την 100% αξιοπιστία ή και τα τέσσερα ταυτόχρονα. Αυτά τα αντικείμενα δεν είναι όλα εφικτά, γιατί ούτε το μηδενικό βάρος, ούτε η απεριόριστη αντοχή είναι δυνατό να ληφθούν. Για να φτάσεις σε μια απόφαση θα πρέπει να εκτελέσεις μια επαρκή ανάλυση φορτίων, τους

τρόπους εφαρμογής τους και τις προκύπτουσες τάσεις, για να διαλέξεις μεταξύ των συνηθισμένων κριτηρίων αστοχίας, του ορίου θραύσης, της αντοχής σε κάμψη ή της αντοχής σε κόπωση. Δηλαδή, είτε η κατάσταση δεν επιδέχεται αστοχία από τη μία και μόνη εφαρμογή πίεσης, είτε η πιθανότητα αστοχίας είναι τόσο μικρή, ώστε να κάνουμε μια παράλογη παραδοχή.

Η παρούσα κατάσταση του σχεδιασμού είναι τέτοια ώστε τα κριτήρια που θα λάβουμε υπόψη να υποδεικνύουν το γενικό βαθμό στο ποιοι παράγοντες εξασθένησης είναι αναγκαίοι, αλλά η πραγματική ερώτηση στην προσέγγιση του προβλήματος είναι το επίπεδο με το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστούν οι γνωστοί παράγοντες και τα δεδομένα. Οι παράμετροι που σχετίζονται με μια σχεδιαστική εργασία όπως αυτή είναι ή μπορεί να δημιουργηθεί σε ένα πρόβλημα κόπωσης, περιλαμβάνει τα ακόλουθα γενικά χαρακτηριστικά.

- 1) Ασφάλεια: Συνέπειες μιας μερικής ή ολικής αστοχίας.
- 2) Ρεαλισμός: Στην διαπίστωση των λειτουργικών αναγκών και στην ικανοποίηση αναγκών όπως το ελάχιστο βάρος και η μέγιστη αξιοπιστία.
- 3) Κόστος: Ειδικότερα η αναλογία του σχεδιαστικού κόστους προς το μερικό κόστος.
- 4) Χρόνος: Χρονοδιάγραμμα για το σχεδιασμό και τις δοκιμές και για ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών για σχεδίαση των τροποποιήσεων.

Οι πιο συγκεκριμένες παράμετροι που σχετίζονται με ένα πρόβλημα κόπωσης είναι:

- 1) Πληροφορίες: Τύπος λειτουργίας, περιβάλλον χώρος π.χ. συγκεκριμένοι διαβρωτές (οξειδωτές).
- 2) Φορτία: Μεγέθη και συχνότητα εφαρμογής.
- 3) Αναλύσεις: Έκταση και ακρίβεια.
- 4) Υλικά: Διαθεσιμότητα και καταλληλότητα των δεδομένων.
- 5) Κατασκευή: Ποιότητα του προσωπικού και του εξοπλισμού.
- 6) Συντήρηση: Ποιότητα του προσωπικού και μήκος των επιχειρησιακών περιόδων.

Η ανάλυση κόπωσης είναι συνήθως το τελευταίο βήμα στη διαδικασία σχεδίασης και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι αναγκαίο να επανεξετάσεις μερικά από τα προηγούμενα αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα ο βαθμός της βελτιστοποίησης της κατανομής του υλικού στις διάφορες τομές. Η ανάγκη και η

χρησιμότητα τέτοιων παραμέτρων όπως η δομή και η ικανότητα του υλικού γίνεται όλο και περισσότερο αναγνωρίσιμη.

Ο σχεδιασμός σε κόπωση είναι η βασική μέθοδος με την οποία μεταχειρίζονται οι δυναμικές τάσεις, όπως επίσης και οι τύποι των αστοχιών που απορρέουν από αυτές. Η έκφραση τους μπορεί να πάρει μια ποικιλία μορφών, όπως περιορισμένη πίεση, κάμψη, χρόνος έκθεσης, μικρότερη πιθανότητα συνεχιζόμενης επιτυχούς λειτουργίας εξαιτίας συσσώρευσης ζημιών και ούτω καθεξής.

Τα αντικείμενα μιας σχεδιαστικής προσπάθειας συνήθως εκφράζονται με τον όρο της επιτυχούς δοκιμής ή λειτουργίας, αλλά αφού είναι σπάνια πραγματοποιήσιμη μια εντελώς ανεπιφύλακτη επιτυχία, είναι εξίσου σημαντικός ο ορισμός της μη επιτυχίας ή του βαθμού αστοχίας. Η δομή των κόκκων μετά την καταστροφή για οποιοδήποτε δεδομένο αντικείμενο θα ποικίλει ανάλογα με τη σοβαρότητα της αστοχίας. Δίνοντας βάση στη διάρκεια ζωής και στη μορφή της κόπωσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιαστής έχει μόνο τρεις (3) βασικές έννοιες ελέγχου: α) εκλέγοντας τα υλικά, β) θέτοντας την ποιότητα του λεπτομερούς σχεδιασμού και γ) οριοθετώντας τα επίπεδα των υπηρεσιακών τάσεων. Στην τελευταία περίπτωση μπορεί φυσικά να καθορίσει μόνο το όριο.

Για να αποτρέψουμε τις αστοχίες εξαιτίας απρόβλεπτων συνθηκών, έχουν επινοηθεί δύο (2) κύριες προσεγγίσεις για την κατασκευή. Η μία είναι ανάλυση της κόπωσης και πρόγραμμα δοκιμών που προσπαθούν να δημιουργήσουν μια "ασφαλή διάρκεια ζωής" για την κατασκευή, κάτω από τις υποτιθέμενες συνθήκες φόρτισης. Αυτή η διαδικασία συνεπάγεται ότι η διάρκεια ζωής μπορεί να προβλεφθεί και ότι πριν το τέλος αυτού του χρόνου η κατασκευή μπορεί να επισκευαστεί, να αντικατασταθεί ή να αποσυρθεί. Έχει επίσης αναγνωριστεί ότι, αναπόφευκτα, μερικές κατασκευαστικές ζημιές ή αστοχίες θα συμβούν και ότι αυτή η κατασκευαστική αστοχία είναι σπάνια μη ανεκτή. Αυτή η αναγνώριση οδήγησε στην έννοια των ανεκτών ζημιών ή "ασφαλούς αποτυχίας", σχεδιασμός στον οποίο η συνολική ζημιά από εκείνες τις αποτυχημένες συνιστώσες θα ήταν προσωρινά ανεκτές εφοδιάζοντας την κατασκευή με αλληπάλληλα μέλη που να μεταφέρουν τα φορτία και διαστασιολογώντας τα έτσι ώστε αυτά να αντέχουν και μετά από τη μερική αστοχία.

Υπολειπόμενη αντοχή

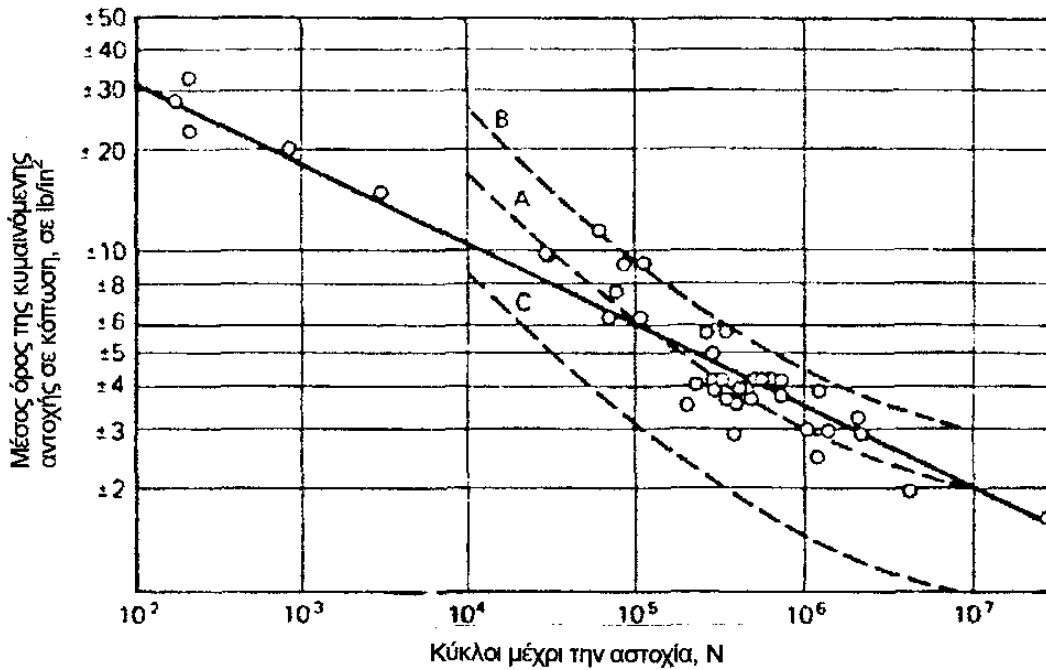
Η πρόγνωση της υπολειπόμενης αντοχής ή της χωρητικότητας μεταφοράς φορτίων, στην παρουσία των ρωγμών είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο στον σχεδιασμό

ασφαλούς αποτυχίας. Εμπεριέχονται δύο κριτήρια: α) τα φορτία ασφαλούς αποτυχίας και β) ο κρίσιμος αριθμός των μερικών αποτυχιών. Το κριτήριο του φορτίου της ασφαλούς αποτυχίας σχετίζεται με τον κίνδυνο να ξεπεράσουμε την υπολειπόμενη αντοχή ασφαλούς αποτυχίας μετά την αστοχία του μέλους. Το κριτήριο του κρίσιμου αριθμού εμφανίζεται εξαιτίας της περιορισμένης πιθανότητας κατάρρευσης της κατασκευής ασφαλούς αποτυχίας εξαιτίας της αστοχίας από κόπωση (μεταξύ δύο επιθεωρήσεων συντήρησης) ενός κρίσιμου αριθμού (μεγαλύτερος της μονά-δας) των μελών μιας τέτοιας κατασκευής.

Σχεδιασμός ελαχίστου βάρους

Αυτός ο όρος έχει τρεις διαφορετικές εξηγήσεις. Πρώτον ότι ο σχεδιασμός ελαχίστου βάρους έχει πραγματοποιηθεί όταν το βάρος ενός αντικειμένου συναντά ή τείνει σε μια προϋπολογισμένη τιμή. Δεύτερον υπάρχει μονότονη μηχανολογική προσέγγιση με τουλάχιστον ένα ίχνος προσπάθειας, όπου τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσης και οι δοκιμές δονήσεων ανατροφοδοτούνται για να αποκομιστεί ένα "ισορροπημένο" βάρος, κατά κάτι μικρότερο από αυτό του αρχικού σχεδίου. Η τρίτη μετάφραση του όρου συνεπάγεται τη χρήση σχετικά εκτεταμένων διαδικασιών, όπως η χρήση κατασκευαστικών ευρητηρίων ή μη διαστασιολογημένη ανάλυση ή μαθηματική σύνθεση.

Δεν μπορούμε να δώσουμε υπερβολική έμφαση στον κατάλληλο σχεδιασμό των συνδέσμων. Η εξάρτηση της συμπεριφοράς στην κόπωση μιας συναρμογής με αυτές των συνδέσμων μέσα σ' αυτή, σκιαγραφείται ικανοποιητικά στο σχήμα 1. Η παχιά γραμμή είναι η αντοχή των ολοκληρωμένων πτερύγων και των σταθερών της ουράς ενός αεροπλάνου, ενώ η καμπύλη A δείχνει το μέσο όρο και οι καμπύλες B και C τα μέγιστα και ελάχιστα όρια της αντοχής των συνδέσμων. Η συμβατική προσέγγιση στον σχεδιασμό σε κόπωση μιας πολυμελούς κατασκευής μεταχειρίζεται τα μέλη σαν αναπόφευκτες περιπλοκές, δηλαδή σαν αναγκαίο κακό. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι πιο ωφέλιμο να θεωρήσουμε τη συναρμογή σαν μια «συνάθροιση» συνδέσμων, με τα συνδεόμενα μέλη σαν απλές συνδέσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 1: Καμπύλες S-N για ολοκληρωμένα πτερύγια και ουρές αεροπλάνων.

Εδώ ένας σύνδεσμος ορίζεται σαν μια συναρμογή δύο ή περισσότερων τεμαχίων που έχουν τοποθετηθεί μηχανικά και συγκρατούνται σε μια θέση επαφής ή κοντινής προσέγγισης. Ένας τέτοιος ορισμός προτίθεται να αποκλείσει τα σημεία επαφής που σχηματίστηκαν από διάφορες μεθόδους όπως επιμετάλλωση, βαφή και άλλες. Επίσης μειώνει το περιθώριο του θέματος των συνδέσμων που είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με τέσσερις (4) διαδικασίες: κοχλίωση, σύνδεση με πείρους, συγκόλληση και αυτοκόλλητη σύνδεση. Οι τέσσερις αυτές κοινές διαδικασίες συχνά παρουσιάζονται μόνο σε συμβατικά σχεδιαστικά προβλήματα, αλλά οι αυστηρές απαιτήσεις για μικρό βάρος συνδυαζόμενο με μεγάλη απόδοση απαιτούν σημαντική διορατικότητα στα φαινόμενα κόπωσης και τις παραμέτρους της γεωμετρίας και της επιλογής του υλικού.

Είναι προφανές ότι σε αντίθεση με το υλικό, το σχήμα των μελών και ο τρόπος φόρτισης είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες. Ο σχεδιαστής δεν μπορεί να έχει πάντα τον έλεγχο του εξωτερικού σχήματος, αλλά θα πρέπει να εξετάσει τις λεπτομέρειες των μελών και την τοποθέτηση του συνδέσμου κατά μήκος της ροής των δυνάμεων. Αν για παράδειγμα η συνιστώσα της κάμψης σε ένα κοχλία εξαλειφθεί ώστε να απλοποιηθεί η φόρτιση σε απλή διάτμηση, αλλάζοντας την θέση ή τον προσανατολισμό του συνδέσμου, θα μπορούσε να μειωθεί το συνολικό του μέγεθος και βάρος. Το σχήμα των μελών μέσα στους συνδέσμους είναι φυσικά πολύ

σημαντικό καθώς θα μπορούσε να μετατρέψει την εξωτερική φόρτιση σε ένα διαφορετικό τρόπο ο οποίος είναι αναπόφευκτα συνδεδεμένος με τις συγκεντρώσεις των τάσεων. Ο όρος «σχήμα» εδώ αναφέρεται σε οποιοδήποτε γεωμετρικό χαρακτηριστικό όπως ο τύπος του σπειρώματος στους κοχλίες, το προφίλ της εγκοπής στις συγκολλημένες άκρες δύο πλακών ή η αναλογία ακτίνας/πάχους στο λαιμό ενός αγκίστρου. Αφού η σχεδίαση ενάντια στην κόπωση σε οποιαδήποτε διάρκειας ζωής, απαιτεί μεγάλη προσοχή στη φυσική λεπτομέρεια, η σχεδίαση τους για φόρτιση σε κόπωση γίνεται μια υψηλά απαιτητική εργασία.

Το τελικό σχήμα του συνδέσμου μπορεί συχνά να υπαγορευθεί από τις λειτουργικές απαιτήσεις, της φόρτισης και της μετατόπισης, αλλά μέσα στο σχήμα υπάρχει ένα σημαντικό περιθώριο για τον καθορισμό των κοχλιών, των πείρων ή των συγκολλητών μελών. Εφαρμόζοντας έναν από τους βασικούς κανόνες του σχεδιασμού ότι όσο πιο ομαλές είναι οι γραμμές, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή, η στατική ικανότητα και η ικανότητα της φόρτισης σε κόπωση βελτιώνονται από την εξάλειψη ή μείωση των εγκάρσιων συνιστωσών. Αν και η χρήση των λαβών ή των προεξοχών είναι συχνά μη αποτρέψιμη, η αντιστάθμιση τους από τη ροή των δυνάμεων θα έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί. Σχεδιάζοντας την αναλογία μεταξύ της ροής των δυνάμεων και των αποτελεσμάτων της ροής υγρού στο παραπάνω συμπέρασμα και ότι δεν θα πρέπει να υπάρχουν ξαφνικές αλλαγές στον τομέα των συνδεδεμένων μελών, με την προφανή επίδραση στους παράγοντες συγκέντρωσης τάσης. Αν κάποιος εξετάσει έναν σύνδεσμο που καταπονείται σε διάτμηση με δύο ή περισσότερες σειρές κοχλιών, συμπεραίνεται ότι η «ροή» θα βελτιωθεί - θα γίνει πιο ομαλή (πιο λεία) τοποθετώντας τις σειρές κατά μήκος των γραμμών, απ' ότι κλιμακωτά.

Το τελευταίο είναι ένα ιδιαίτερα πειστικό επιχείρημα για τη επίπεδη σύνδεση με πείρους· ότι και να γίνει θα πρέπει να κρατιέται ένα πρακτικό διάστημα για να εξασφαλίζονται οι καλά κατασκευασμένες κεφαλές και ένα μη παραμορφωμένο φύλλο. Έχουν διεξαχθεί πολλές δοκιμές δίνοντας σαν γενικά αποτελέσματα τα ακόλουθα:

- 1) Ο κοχλίες ή οι πείροι στις διαφορετικές σειρές θα έπρεπε να τοποθετούνται σε σύζευξη κατά μήκος της γραμμής φόρτισης και όχι κλιμακωτά.
- 2) Το διάστημα μεταξύ των γραμμών θα πρέπει να είναι το ελάχιστο πρακτικό.
- 3) Οι κοχλίες ή οι πείροι σε κάθε σειρά θα πρέπει να είναι του ίδιου μεγέθους.
- 4) Κάθε σειρά θα πρέπει να περιέχει τον ίδιο αριθμό κοχλιών ή πείρων.

Κεφάλαιο 1

1.0 Κοχλιωτοί σύνδεσμοι

Οι επικρατέστεροι τύποι φόρτισης για κοχλίες είναι ο εφελκυσμός και η διάτμηση. Η κάμψη μπορεί να συνδυαστεί και με τους δύο τύπους εξαρτώμενη από τις τοπικές ροές φόρτισης και την εφαρμογή. Οι σύνδεσμοι που καταπονούνται σε διάτμηση μπορούν να ταξινομηθούν περισσότερο σαν τύποι που καταπονούνται σε διάτμηση και εφελκυσμό και σε διάτμηση και κάμψη.

Η γενική συμπεριφορά σε κόπωση των κοχλιωτών συνδέσμων δίνεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_{an} = 1,5 + 1500 \cdot \left(\frac{13}{N \cdot \sigma_{mn}} \right)^{1/2}$$

ή

$$N = \frac{13}{\sigma_{mn}} \cdot \left(\frac{1500}{\sigma_{an} - 1,5} \right)^2$$

όπου: σ_{an} =εναλλασσόμενη τάση για υλικό με εγκοπές.

σ_{mn} =κύρια τάση για υλικό με εγκοπές.

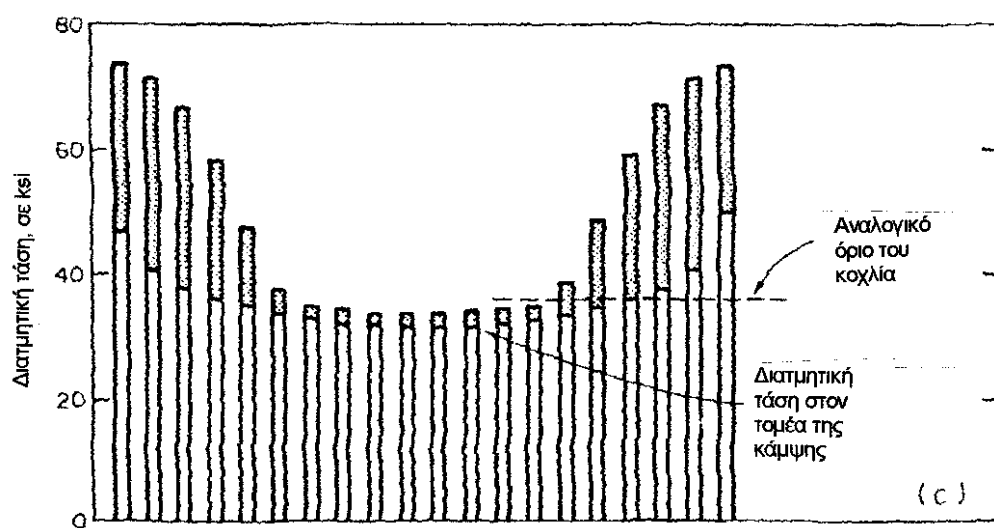
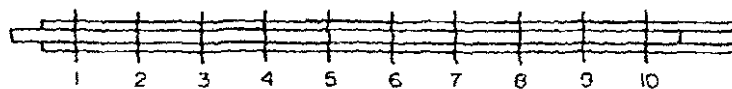
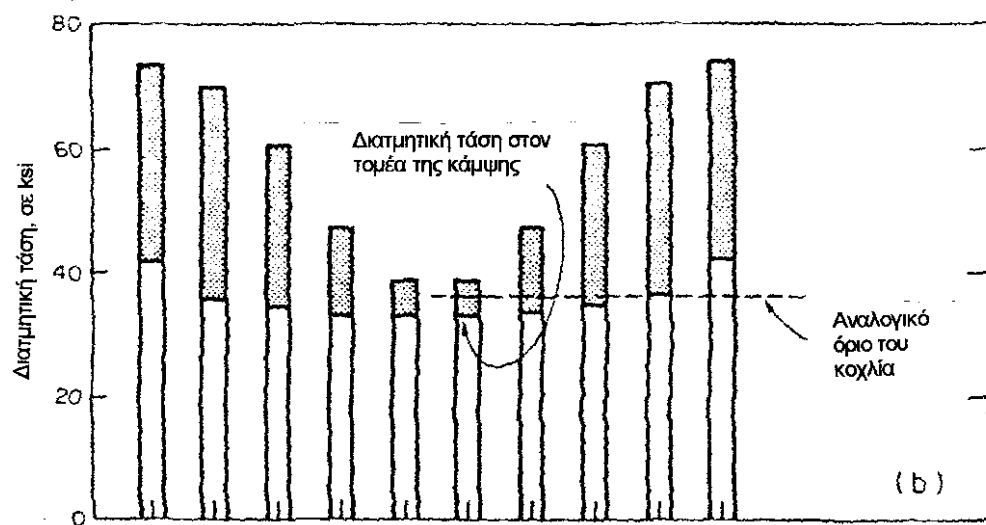
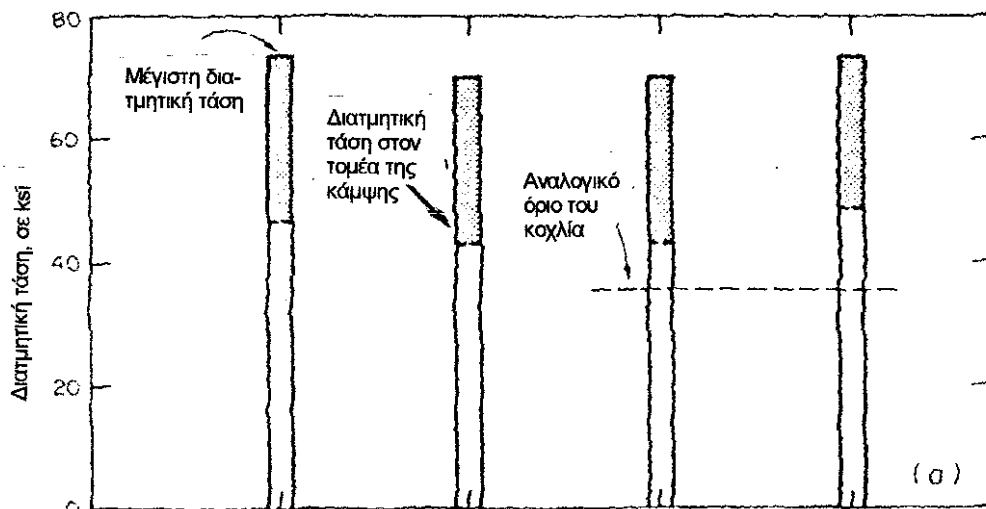
N= αριθμός κύκλων.

Και οι δύο εκφράσεις είναι εξ' ολοκλήρου εμπειρικές και ενώ βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα, μπορεί να αποτύχουν σε ακραίες περιπτώσεις.

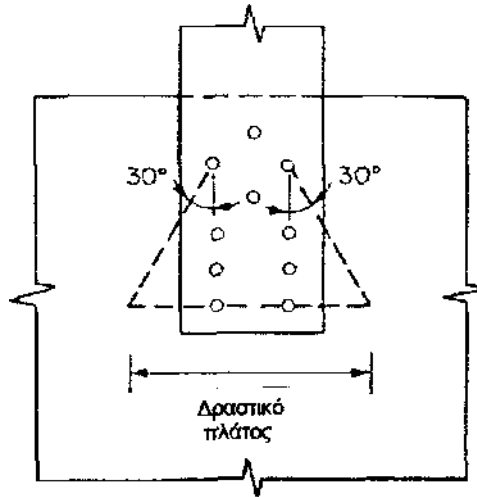
Η αντοχή σε κόπωση των επικαλυπτόμενων συνδέσμων θα έπρεπε να εξετάζεται προσεκτικά από το σχεδιαστή όχι μόνο επειδή μπορεί να είναι ο μόνος διαθέσιμος τύπος συναρμογής, αλλά επίσης επειδή είναι βασικά αναποτελεσματικοί εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων τάσης. Έλεγχοι σε κοχλίες με διάμετρο 9,5 mm σε αεροσκάφη με υλικό 2024 - T3 Alclad (με πάχος 2,5 ως 9,5) έδειξαν ότι η αντοχή σε κόπωση στους 10^6 είναι ως ακολούθως:

- 1) Αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των κοχλιών στη γραμμή φόρτισης από $5,4 \text{ kg/mm}^2$ για ένα κοχλία ως $10,1 \text{ kg/mm}^2$ για τρεις κοχλίες στη σειρά για πλάκα με πάχος από 2,54 ως 3,17mm.
- 2) Αυξάνεται αργά με την αύξηση των αριθμών των σειρών των κοχλιών.
- 3) Αυξάνεται αργά με την αύξηση της διαμέτρου του κοχλία, από 5 kg/mm^2 για κοχλίες 6,35mm ως $6,6 \text{ kg/mm}^2$ για κοχλίες 11mm με μια αναλογία τάσης $R=+0,25$.

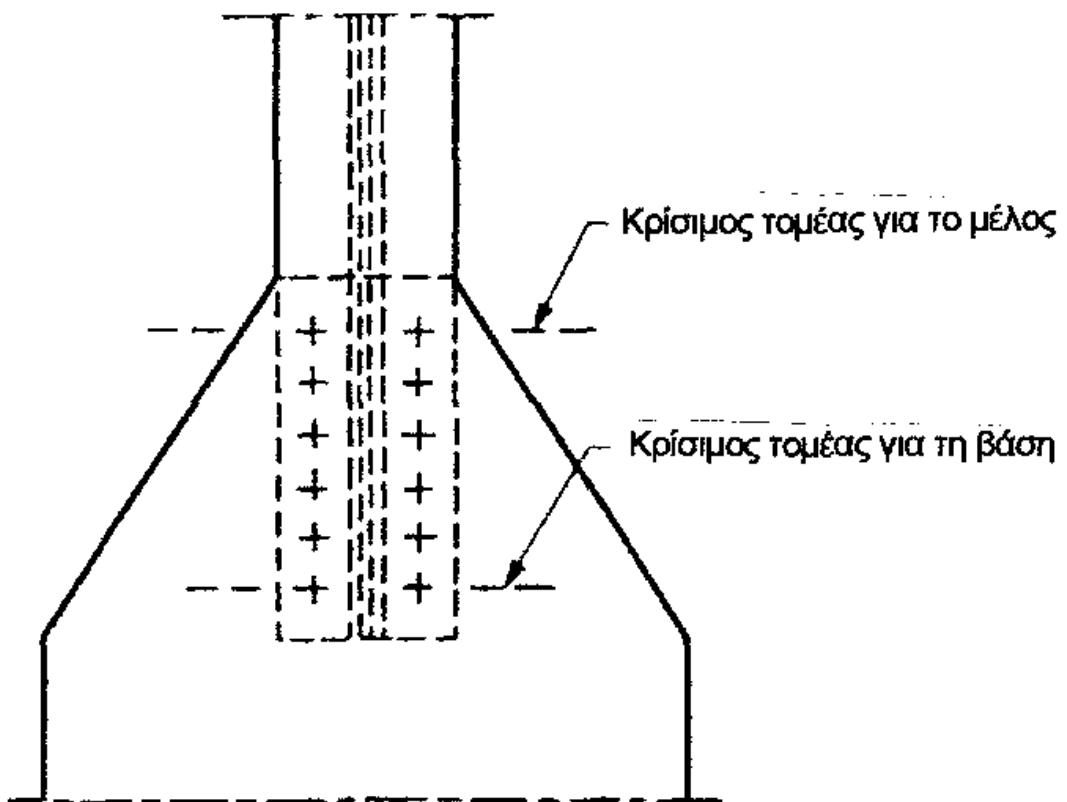
- 4) Μειώνεται με την αύξηση του πάχους της πλάκας για οποιονδήποτε αριθμό γραμμών. Τυπικά για δύο κοχλίες σε μία σειρά πέφτει από $7,5 \text{ kg/mm}^2$ για μια πλάκα πάχους 2,5mm στις $4,4 \text{ kg/mm}^2$ για μία πλάκα 9,5mm.



Σχήμα 2: Κατανομή της τάσης σε συνδέσμους με πολλαπλούς συνδετήρες.



Σχήμα 3α: Δραστικό πλάτος για πρότυπο συνδετήρα.

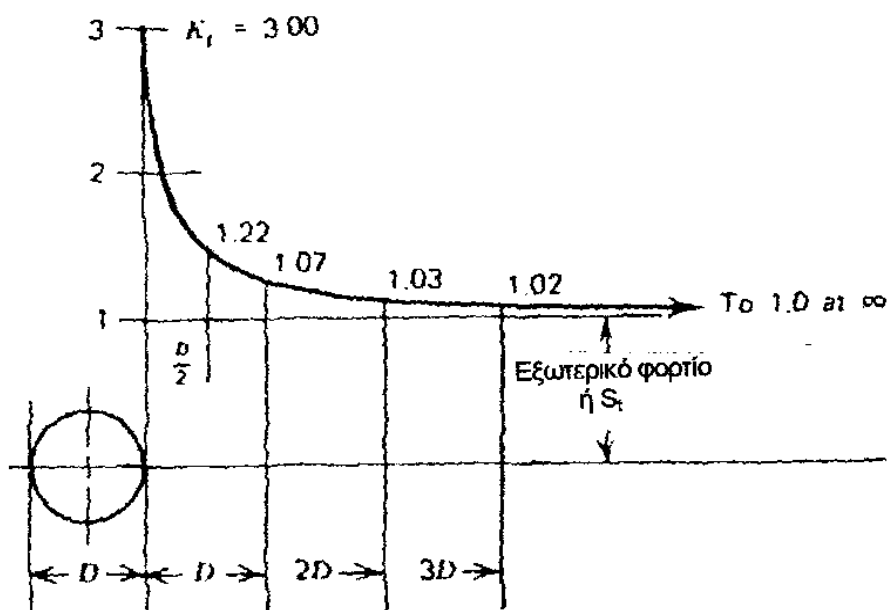


Σχήμα 3β: Κρίσιμοι τομείς για ένα σύνδεσμο σε φόρτιση κόπωσης.

Η αντοχή σε κόπωση των κοχλιών είναι φυσικά ισχυρά επηρεασμένη από τους εγγενείς ανυψωτές της τάσης, ειδικά εκείνους κάτω από την κεφαλή, στο τέλος του σπειρωτού μήκους και στο τέλος του περικοχλίου εμπλοκής. Έχουν ολοκληρωθεί σημαντικές βελτιώσεις με τη χρήση ελλειπτικών ταινιών κάτω από τη κεφαλή, στρέφοντας τις σπείρες, ελέγχοντας την τελειωμένη ακτίνα και/ή μειώνοντας τη διάμετρο της λαβής στο τέλος του σπειρώματος.

Η κατανομή της τάσης κατά μήκος της επαφής του σπειρώματος με το περικόχλιο είναι πολύπλοκη, αλλά γενικά ο κοχλίας καταπονείται σε αξονικό εφελκυσμό μεταβαλλόμενος από μια μέγιστη τιμή στην πρώτη εμπλεκόμενη σπείρα ως το μηδέν στην πρώτη σπείρα που βρίσκεται έξω από το περικόχλιο. Το περικόχλιο καταπονείται σε αξονική θλίψη βαθμονομημένη με τον ίδιο τρόπο. Από τη στιγμή που η πρώτη σπείρα του περικοχλίου εμπλακεί με μία του σπειρώματος του κοχλίου μπορεί να παρουσιαστεί μια σημαντική συγκέντρωση τάσης.

Και οι σύνδεσμοι με κοχλίες, αλλά και αυτοί με πείρους περιέχουν αναπόφευκτα τρύπες στο βασικό φύλλο ή πλάκα και έχει παρατηρηθεί συχνά ότι μια τρύπα που φέρει φορτίο μπορεί να είναι η πιο σημαντική πηγή συγκέντρωσης τάσης. Από την αναπτυσσόμενη φύση της γεωμετρίας τους, οι συγκολλήσεις και οι συγκολλητοί σύνδεσμοι αποτρέπουν αυτή τη συγκεκριμένη πηγή συγκέντρωσης τάσης. Για μία και μόνο τρύπα σε ένα απεριόριστο φύλλο που καταπονείται σε εφελκυσμό, το K_t είναι 3,0 και το σχήμα 4 δείχνει την κατανομή της τάσης στο γύρω από τη τρύπα χώρο.



Σχήμα 4: Κατανομή της τάσης κοντά σε μια οπή.

1.1 Κοχλίες που καταπονούνται σε εφελκυσμό

Για κοχλίες που καταπονούνται σε εφελκυσμό με ή χωρίς κάμψη το πιο κατάλληλο κριτήριο για την αστοχία είναι ο διαχωρισμός του συνδέσμου, μία κατάσταση που επιτρέπει οποιονδήποτε αριθμό μη επιθυμητών αποτελεσμάτων όπως απώλεια πίεσης, υπερβολική στρέβλωση και κρούση. Διαχωρισμός των ενωμένων μελών μπορεί να συμβεί με φορτία και τάσεις του κοχλία μικρότερες από αυτές που χρειάζονται για τη ρήξη του κοχλία. Συνεπώς ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό τέτοιων συνδέσμων είναι να αποδειχθεί ότι ο κοχλίας μπορεί να αποτρέψει τον διαχωρισμό ενώ υφίσταται το μέγιστο σχεδιαστικό φορτίο για τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων. Η πρώτη απαίτηση για την κόπωση όπως και στον στατικό σχεδιασμό είναι ο καθορισμός του μέγιστου φορτίου του κοχλία. Συνεπώς εμφανίζονται οι σταθερές ελατηρίου σαν αναγκαίες παράμετροι στα αναλυτικά κριτήρια, αλλά δυστυχώς το k των κοχλιωτών μελών είναι συνήθως υπολογίσιμο μόνο στα απλά σχήματα (π.χ. ένα ζευγάρι πλακών). Για πολύπλοκα σχήματα, όπως προεξέχουσες συνδετικές ράβδοι, πρέπει να γίνει προσφυγή σε πείραμα. Εντούτοις μια γενική έκφραση για τις σταθερές ελατηρίου μπορεί να τυποποιηθεί ως εξής:

$$k = \frac{F}{\sigma} = \frac{A \cdot E}{L} \quad (\text{Σχέση 1})$$

Η αναλογία (εμβαδού)χ(μέτρου ελαστικότητας) του προϊόντος για τον κοχλία και τα μέλη μπορεί να ληφθεί σαν μια ποιοτική περιγραφή της ακαμψίας του συνδέσμου.

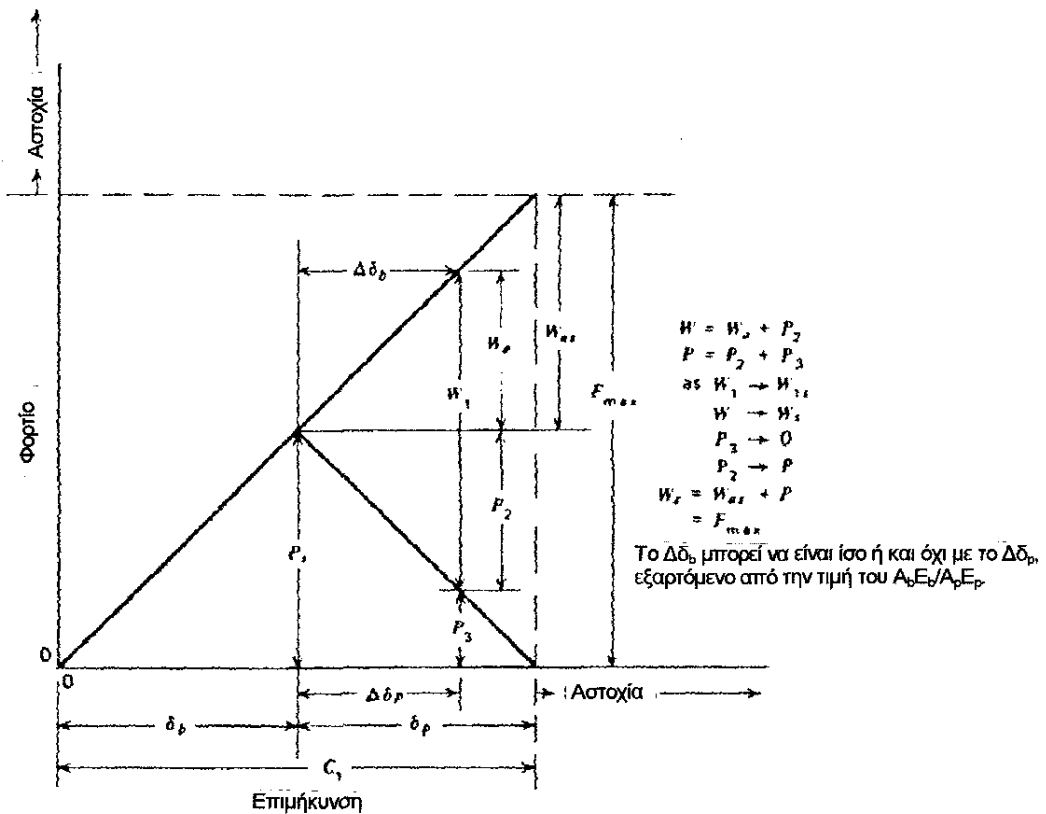
$$\left(\frac{A_{\beta} \cdot E_{\beta}}{L_{\beta}} \right) \Big/ \left(\frac{A_p \cdot E_p}{L_p} \right) = \lambda \quad (\text{Σχέση 1.α})$$

Για την εκπόνηση ενός τύπου για το συνολικό φορτίο στον κοχλία θεωρούμε την συναρμογή σαν ένα ζευγάρι παράλληλων ελατηρίων με τον κοχλία καταπονούμενο σε εφελκυσμό και τις επιφάνειες των πλακών γύρω από τις οπές μεταξύ της κεφαλής και του περικοχλίου καταπονούμενες σε θλίψη. Για να διατηρήσουμε την ισορροπία, οι δυνάμεις στον κοχλία και στις πλάκες θα πρέπει να είναι ίσες και αντίθετες. Οι παρεκκλίσεις των πλακών θα ήταν ίδιες πριν την εφαρμογή του φορτίου αν οι ακαμψίες των πλακών ήταν ίδιες. Καθώς το εξωτερικό φορτίο ή το φορτίο λειτουργίας εφαρμόζεται μέσω των πλακών, το συνολικό φορτίο στον κοχλία αυξάνεται. Το όριο αυτής της δράσης έχει οριστεί σαν την κατάσταση της επερχόμενης διαχώρισης. Αν το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξηθεί πέρα από αυτό στο διαχωρισμό, τότε το συνολικό φορτίο του κοχλία θα συνεχίσει φυσικά να αυξάνει. Αυτή η δράση φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 5. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης από τη στιγμή που δεν υπάρχει φορτίο μέχρι το διαχωρισμό οι αλλαγές στην παρέκκλιση του κοχλία και των πλακών είναι ίδιες.

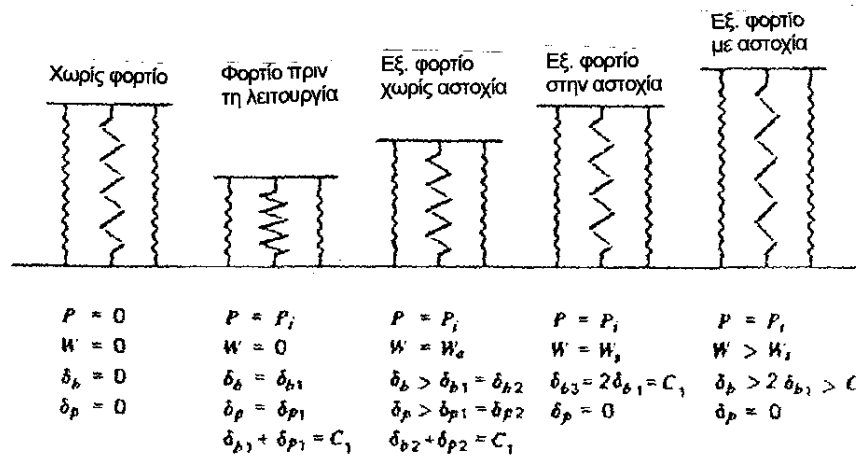
Οι εκφράσεις του φορτίου λαμβάνονται για μια συμβατική συναρμογή πολλαπλών πλακών ή φλαντζών γράφοντας πρώτα την ισότητα των δυνάμεων πριν τη φόρτιση.

$$\text{Δύναμη εφελκυσμού στον κοχλία} = \text{Δύναμη θλίψης στις πλάκες} \\ P_i = C \quad (\text{Σχέση 2})$$

$$\text{ή} \quad \frac{P_i \cdot L_{\beta}}{A_{\beta} \cdot E_{\beta}} = \frac{C \cdot L_{p_1}}{A_{p_1} \cdot E_{p_1}} + \frac{C \cdot L_{p_2}}{A_{p_2} \cdot E_{p_2}} + \dots + \frac{C \cdot L_{p_n}}{A_{p_n} \cdot E_{p_n}} \quad (\text{Σχέση 3})$$



(α)



(β)

Σχήμα 5: Καταστάσεις φορτίου-επιμήκυνσης για ένα σύνδεσμο με κοχλίες.

Οι ομοιότητες μεταξύ του φορτίου πριν τη λειτουργία και του φορτίου εργασίας στον διαχωρισμό προέρχονται από τη σχέση 3 και την κατάσταση ότι πριν τη φόρτιση η θλίψη και η κάμψη είναι μηδέν. Προσθέτοντας την κάμψη από το φορτίο λειτουργίας στη σχέση 3, παίρνουμε:

$$\frac{P_i \cdot L_\beta}{A_\beta \cdot E_\beta} + \frac{W \cdot L_\beta}{A_\beta \cdot E_\beta} = \frac{C \cdot L_1}{A_1 \cdot E_1} - \frac{W_1 \cdot L_1}{A_1 \cdot E_1} + \frac{C \cdot L_2}{A_2 \cdot E_2} - \frac{W_2 \cdot L_2}{A_2 \cdot E_2} + \dots + \frac{C \cdot L_n}{A_n \cdot E_n} - \frac{W_n \cdot L_n}{A_n \cdot E_n}$$

(Σχέση 4)

Στην παραπάνω σχέση τα συν (+) είναι επειδή το εφαρμοζόμενο φορτίο λειτουργίας αυξάνει την επιμήκυνση του κοχλίου και τα πλην (-) επειδή το ίδιο φορτίο μειώνει τη σύνθλιψη των πλακών. Ξαναγράφοντας τη σχέση 4 με τη χρήση των ισοτήτων ότι: τα μέτρα ελαστικότητας των πλακών είναι ίσα και οι περιοχές θλίψης σε όλες τις πλάκες είναι ίσες, οδηγούμαστε στη σχέση:

$$\frac{(P_i + W) \cdot L_b}{A_b \cdot E_b} = \frac{(C - W) \cdot L_p}{A_p \cdot E_p} \quad (\text{Σχέση 5})$$

όπου L_p :συνολικό πάχος των πλακών.

Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του φορτίου λειτουργίας από μηδέν ως W ο κοχλίας υφίσταται μια επιπρόσθετη επιμήκυνση ΔL παραπάνω από αυτή που είχαμε χωρίς το φορτίο και η πριν τη φόρτιση θλίψη στις πλάκες μειώνεται κατά το ίδιο ποσό. Το φορτίο που απομένει στις πλάκες είναι $P_i - \Delta P_i$ όπου το ΔP_i ανταποκρίνεται στο ΔL . Το καινούριο φορτίο στον κοχλίο είναι τότε ίσο με το φορτίο των πλακών συν το W .

$$F_b = P_i - \Delta P_i + W \quad (\text{Σχέση 6})$$

Εξισώνοντας τις αλλαγές στις επιμηκύνσεις παίρνουμε:

$$\Delta P_i \cdot L \cdot \left(\frac{1}{A_1 \cdot E_1} + \frac{1}{A_2 \cdot E_2} \right) = \frac{(W - \Delta P_i) \cdot L}{A_b \cdot E_b} \quad (\text{Σχέση 7})$$

$$\Delta P_i = \frac{W}{\left[(A_b \cdot E_b / L_b) / (A_p \cdot E_p / L_p) \right] + 1} \quad (\text{Σχέση 8})$$

Λύνοντας για το συνολικό φορτίο στον κοχλίο αντικαθιστώντας το ΔP_i από τη σχέση 8 στη σχέση 7 βρίσκουμε ότι:

$$F_{\max} = P_i + W \cdot \left[\frac{\left(\frac{A_b \cdot E_b / L_b}{A_p \cdot E_p / L_p} \right)}{\left(\frac{A_b \cdot E_b / L_b}{A_p \cdot E_p / L_p} + 1 \right)} \right] \quad (\text{Σχέση 9})$$

η οποία απλοποιείται με τη χρήση του $r = \frac{A_b \cdot (E_b / L_b)}{A_p \cdot (E_p / L_p)}$ στην

$$F_{\max} = P_i + W \cdot \frac{r}{r+1} \quad (\text{Σχέση 9.α})$$

Ομοίως για το συνολικό φορτίο στις πλάκες παίρνουμε:

$$F_p = P_i + W \cdot \frac{1}{r+1} \quad (\text{Σχέση 10})$$

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις σχέσεις, το σχήμα 5.β φανερώνει ότι:

- 1) Ο διαχωρισμός συμβαίνει μόνο όταν $W=P_i$ ή $W/P_i=1$ για όλες τις τιμές του r . Πριν το διαχωρισμό το συνολικό φορτίο του κοχλία δεν μπορεί να ξεπεράσει το $2P_i$ για οποιαδήποτε τιμή του r και η F_{\max} πλησιάζει το $2P_i$ όσο το r τείνει στο άπειρο, όταν $W/P_i=1$. Αν και $W_s=P_i$ στο διαχωρισμό η F_{\max} δεν είναι $2P_i$ γιατί ένα ποσοστό του W_s αντενεργεί με θλίψη στις πλάκες. Μόνο όταν $r = \infty$ (ή $E_p=0$) είναι $F_{\max}=2P_i$.
- 2) Μετά το διαχωρισμό η F_{\max} αυξάνεται, αυξανόμενων και του W και του r . Το τελευταίο δείχνει ποσοτικά μικρότερα φορτία σε κοχλίες με μικρότερα μέτρα ελαστικότητας ή συνδέσμους με μικρότερο $A \cdot E$.
- 3) Αν και η γενική επιθυμία για μικρά φορτία στους κοχλίες δεν συζητείται, θα έπρεπε να σημειωθεί μια δυσκολία με τα μικρά φορτία. Οι σύνδεσμοι με μικρό r σ' αυτή τη συγκεκριμένη δύναμη σύσφιξης, P_i , μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο με πολύ μεγάλες επιμηκύνσεις του κοχλία.

Οι παραπάνω σκέψεις, μέσω της σχέσης 9.α, έχουν συνδέσει τις τρεις κύριες παραμέτρους: συνολικό φορτίο στον κοχλία, F_{\max} , φορτίο πριν τη λειτουργία, P_i , και φορτίο λειτουργίας, W . Πολύ χρήσιμη θα ήταν και η σχέση μεταξύ του κρίσιμου φορτίου πριν τη λειτουργία P_c και την εναλλασσόμενη συνιστώσα του W , που είναι το W_a . Αν το αρχικό φορτίο πριν τη λειτουργία είναι ίσο με την P_c , η δύναμη που θλίβει

τις πλάκες μεταβάλλεται μεταξύ των ορίων της P_c και του μηδενός κατά τη διάρκεια της αντιστροφής του φορτίου λειτουργίας από μηδέν ως W . Αλλά μέρος του W χρησιμοποιείται σαν αντίδραση προς το φορτίο πριν τη φόρτιση, έτσι ώστε το υπόλοιπο να είναι η εναλλασσόμενη συνιστώσα:

$$W_a + P_c = W \quad (\text{Σχέση 11})$$

Κάνοντας τις πράξεις παίρνουμε:

$$W_a = W \cdot \frac{r}{r+1} \quad (\text{Σχέση 12})$$

$$P_c = W - W_a$$

και
$$P_c = W \cdot \frac{1}{r+1} \quad (\text{Σχέση 13})$$

Για πρακτικούς λόγους και για να έχουμε ένα περιθώριο ασφαλείας, το πραγματικό φορτίο πριν τη λειτουργία είναι συνήθως λίγο μεγαλύτερο από το P_c .

$$P_{act} = c \cdot P_c$$

όπου στο c δίνεται συνήθως μία γενική μηχανολογική τιμή μεταξύ 1,15 και 1,50.

Στον σχεδιασμό σε κόπωση είναι ανάγκη να αναγνωρίσουμε την επίδραση του εύρους των εναλλασσόμενων φορτίων και ο σχεδιασμός συνδέσμων δεν αποτελεί εξαίρεση στον κανόνα. Η αναλογία του φορτίου ορίζεται εδώ σαν:

$$R = \frac{F_{min}}{F_{max}}$$

Τότε
$$F_{min} = P_c = W \cdot \frac{1}{r+1}$$

$$F_{max} = P_c + W_a = W \cdot \left(\frac{1}{r+1} + \frac{r}{r+1} \right)$$

και η σχέση 9.α επανεμφανίζεται τροποποιημένη σαν:

$$F_{max} = c \cdot W \cdot \frac{1}{r+1} + W \cdot \frac{r}{r+1} \quad (\text{Σχέση 9.β})$$

Όσον αφορά στην κόπωση το φορτίο πριν τη λειτουργία P ή P_c , αντιπροσωπεύει την κύρια τάση και τα ποικίλα μέλη του εφαρμοζόμενου φορτίου, W_a , την εναλλασσόμενη τάση. Συνεπώς αφού αυτό είναι το πιο κρίσιμο θα πρέπει να

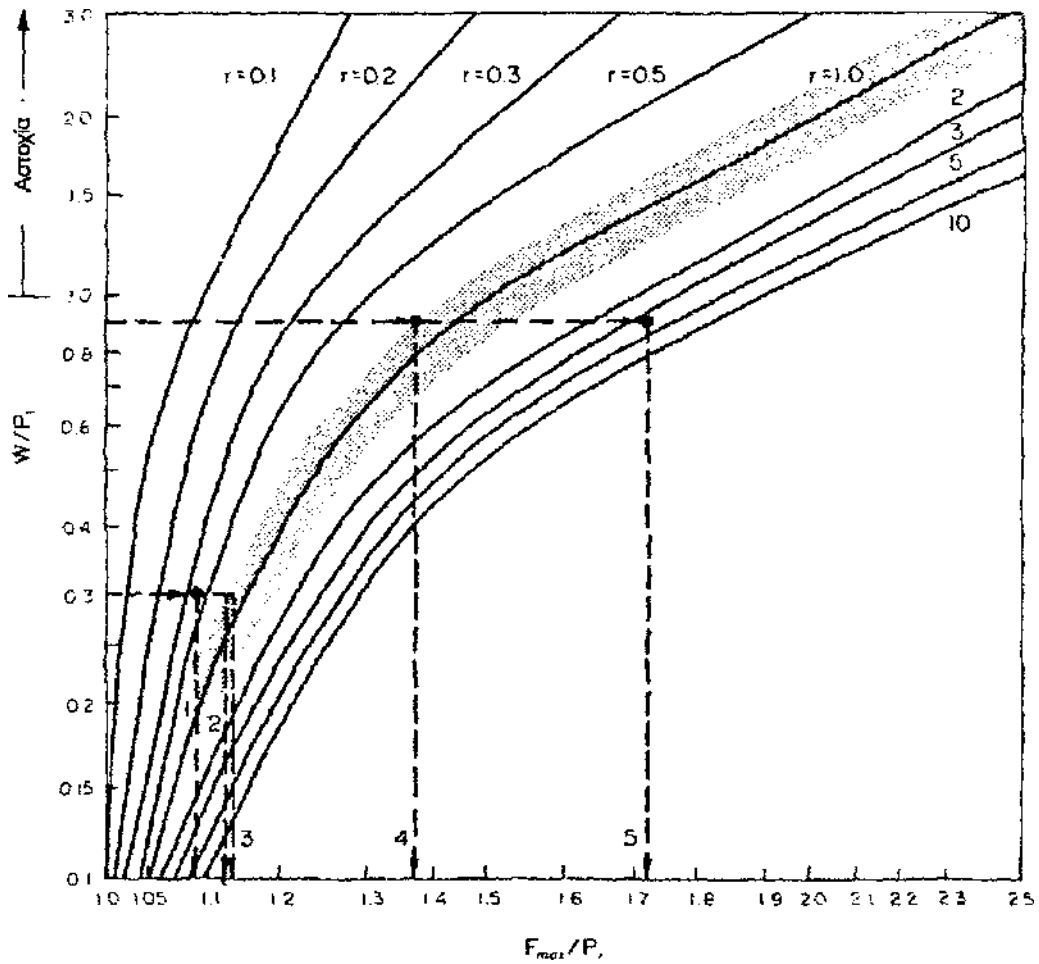
μειωθεί, με τη «δαπάνη» της αύξησης της P_c όπου είναι δυνατό. Αυτό εξαρτάται από τη σχετική ακαμψία που είναι η τιμή του r .

Όσον αφορά στην τάση, οι προτεταμένοι κοχλίες σε έναν σύνδεσμο που υπόκειται σε κυκλική πίεση, είναι αντικείμενο στο συνδυασμό του χαρακτηριστικού του σχεδιασμού σε κόπωση, των σταθερών και των εναλλασσόμενων τάσεων. Εντούτοις ανακαλώντας το βασικό αντικείμενο του σχεδιασμού των κοχλιών που είναι να αποτραπεί ο διαχωρισμός, συμπεραίνουμε ότι η κύρια τάση (στην έννοια της κόπωσης) που προέρχεται από το φορτίο πριν τη λειτουργία, πρέπει να είναι συγκεκριμένη για να εξυπηρετεί το μέγιστο φορτίο πριν τη λειτουργία. Τότε το συνολικό φορτίο στον κοχλία, όπως δίνεται από τη σχέση 9.α, αποτελείται από την κύρια τάση πριν τη λειτουργία και την εναλλασσόμενη τάση λειτουργίας. Η πρόταση έγινε έτσι ώστε η επίδραση της εναλλασσόμενης συνιστώσας, S_a θα μπορούσε να πάψει να υπάρχει κάνοντας την P_i ίση με την F_{max} . Αλλά αυτό δεν είναι σχετικό, αφού η S_a μεγαλώνει μόνο από τη W_a και συνήθως προσθέτει στην P_i , που οδηγεί σε μια μεγαλύτερη τιμή της F_{max} . Όχι μόνο δεν υπάρχει κέρδος από αυτή την αύξηση της P_i πέρα από αυτή τη τιμή που χρειάζεται ώστε να αποτρέψει το διαχωρισμό, αλλά μια τέτοια πράξη έχει σαν αποτέλεσμα μια μικρότερη διάρκεια ζωής σε κόπωση εξαιτίας μιας περιττά μεγάλης κύριας τάσης. Τα παραπάνω υποδεικνύουν ότι υπάρχει μια κατάλληλη τιμή του φορτίου πριν τη λειτουργία για κάθε σχεδιαστική κατάσταση. Ανεπαρκές φορτίο πριν τη λειτουργία επιτρέπει το διαχωρισμό του συνδέσμου με τη μεγάλη αύξηση της εναλλασσόμενης συνιστώσας. Πολύ μεγάλη προφόρτιση οδηγεί σε χαμηλότερη διάρκεια ζωής σε κόπωση εξαιτίας της μεγάλης κύριας τάσης.

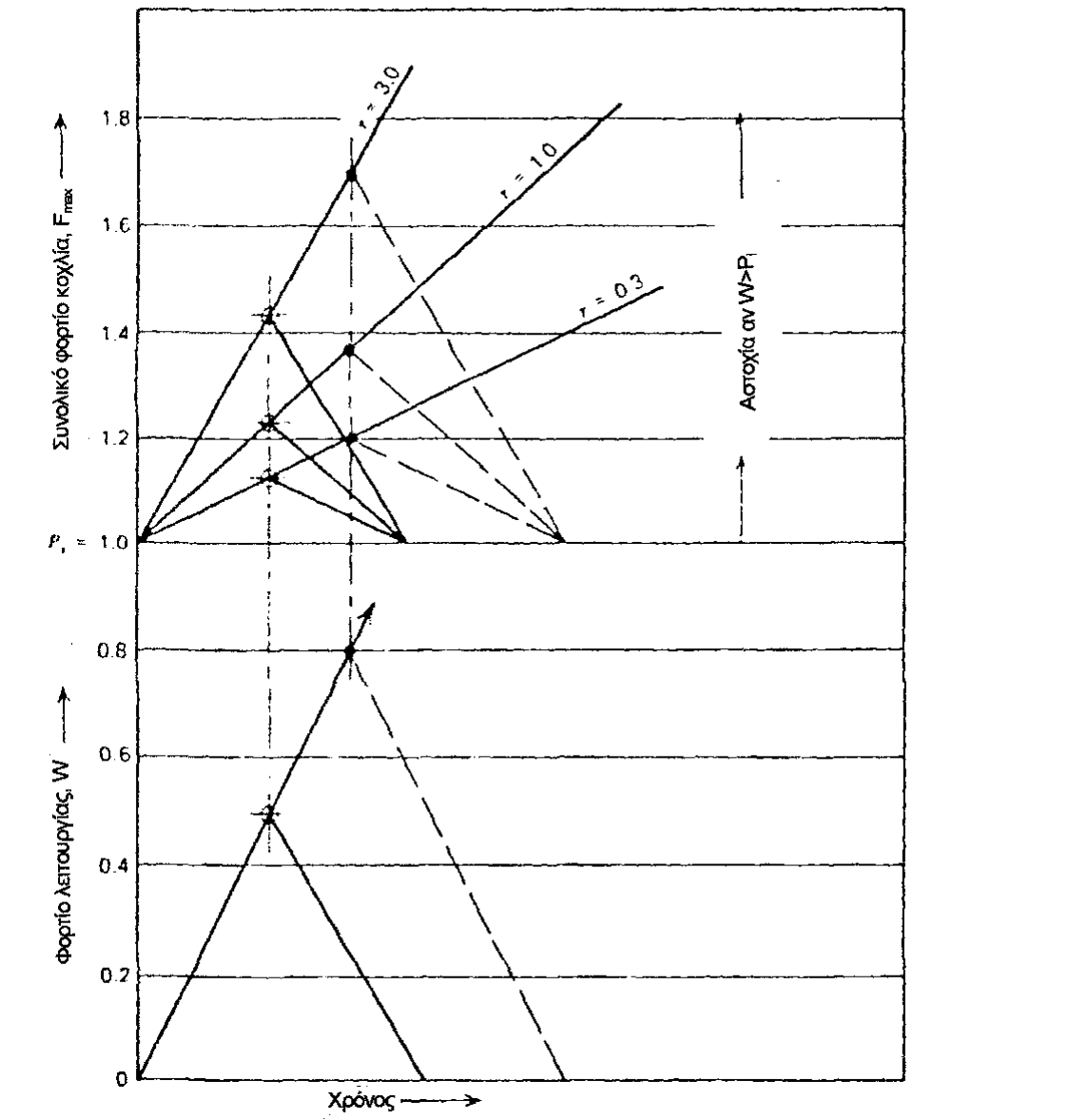
Ένα σχετικό αποτέλεσμα αυτού του συμπεράσματος, σχέση 9.α, φαίνεται στο σχήμα 6, όπου για πρακτικές τιμές του r δείχνει τη σχέση μεταξύ του συνολικού φορτίου του κοχλία προς το εξωτερικό φορτίο και την προφόρτιση. Το σχετικό σχήμα 7 απεικονίζει πολύ έντονα την επίδραση των διαφορετικών τιμών ακαμψιών των κοχλιών στην τιμή του συνολικού φορτίου του κοχλία. Η μελέτη αυτών των διαγραμμάτων, μαζί με τους πίνακες 1 και 2 προσφέρουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα. Το συνολικό φορτίο του κοχλία, F_{max} αυξάνεται απότομα με την αυξανόμενη κλίση ή την τιμή του r , μία κατάσταση που πρέπει να ελεγχθεί στην προσπάθεια για σχεδίαση με οποιαδήποτε δοσμένη F_{max} . Σημειώστε ότι από τις δύο βασικές παραμέτρους της αναλογίας το μέτρο ελαστικότητας E είναι ελέγξιμο μόνο με την εκλογή του υλικού, ενώ η επιφάνεια A ταιριάζει με τις λεπτομέρειες του σχεδιασμού του συνδέσμου. Για παράδειγμα για έναν AN8 κοχλία σε αλουμινένιες

πλάκες χωρίς ροδέλες με $r=2,6$, δίνει ένα F_{max}/P_i ίσο με 1,7 στο διαχωρισμό. Η τελευταία τιμή θα μπορούσε να μειωθεί σε 1,4 φέρνοντας το r στο διάστημα 0,8 ως 1,0 χρησιμοποιώντας κωνικές χαλύβδινες ροδέλες με μεγάλη διάμετρο στο τελείωμα περίπου 29,2mm και μισή γωνία κώνου 30° όπως στο σχήμα 8. Το βάρος και ο όγκος των ροδελών και οι μακρύτεροι κοχλίες μπορεί να αποκλείουν τη χρήση τους σε συνδέσμους μεγάλης απόδοσης, αλλά μια συχνά προτεινόμενη λύση - απλά η αύξηση του μεγέθους του κοχλία - δεν αποφέρει ιδιαίτερα μεγάλο κέρδος εξαιτίας της απρογραμμάτιστης ποικιλίας του r με το μέγεθος του κοχλία. Η πρόσθεση ροδελών σ' αυτές τις περιοχές αυξάνει το μήκος του κοχλία και μειώνει τη ακαμψία του ($k = A \cdot E/L$), που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

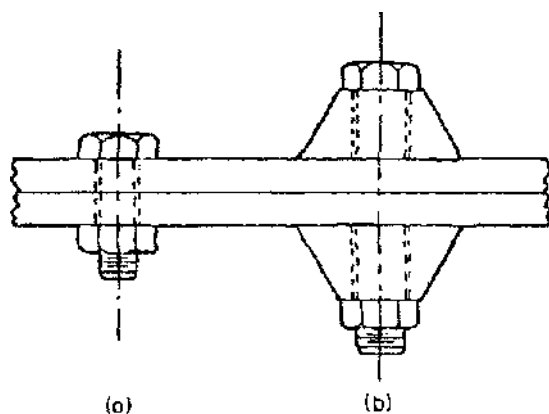
Πιο ακραία παραδείγματα μπορούν να σημειωθούν στους πίνακες 1 και 2, όπου η μέγιστη τιμή του r της τάξης του 5,4 υποδεικνύει ένα συνολικό φορτίο στον κοχλία κοντά στο διπλάσιο της τιμής του φορτίου πριν τη λειτουργία στο διαχωρισμό. Όπως αναμένεται, τα μεγαλύτερα r συνδέονται με τις μεγαλύτερες τιμές του λόγου E_b/E_p . Συνεπώς οι μεγαλύτερες καταστάσεις φορτίου στον κοχλία εμφανίζονται για χαλύβδινους κοχλίες με πλάκες από μαγνήσιο. Η ακαμψία ποικίλει λίγο με τον τύπο του χάλυβα στους κοχλίες αλλά είναι ένας δυνατός παράγοντας του μέτρου ελαστικότητας για μη σιδερένιους κοχλίες.



Σχήμα 6: Σχέση μεταξύ του συνολικού φορτίου του κοχλίου προς το εξωτερικό φορτίο και το φορτίο συσφίξεως.



Σχήμα 7: Συνολικό φορτίο του κοχλία συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου και του χρόνου.



Σχήμα 8: Διαφορά του r και της F_{max} για χαλύβδινους κοχλίες και ροδέλες σε πλάκες από κράμα αλουμινίου.

Πίνακας 1: Τιμές του r για κοχλίες NAS.

| | | | r , σε χαλύβδινη πλάκα $E_p=29.5 \times 10^6$ kg/mm ² | r , σε πλάκα αλουμινίου $E_p=10.5 \times 10^6$ kg/mm ² | r , σε πλάκα μαγνησίου $E_p=6.5 \times 10^6$ kg/mm ² |
|-------------------------------|--------------------------------|---|--|---|---|
| Διάμετρος κορμού, d_b | Διάμετρος κεφαλής, d_p | $\frac{(\text{Περιοχή})_b}{(\text{Περιοχή})_p}$ | | | |
| NAS-3 | 0.189 | 0.375 | 0.25 | 0.24 | 1.51 |
| NAS-4 | 0.249 | 0.438 | 0.47 | 0.45 | 2.03 |
| NAS-5 | 0.312 | 0.500 | 0.64 | 0.62 | 2.76 |
| NAS-6 | 0.374 | 0.563 | 0.81 | 0.78 | 3.50 |
| NAS-7 | 0.437 | 0.625 | 0.97 | 0.94 | 4.18 |
| NAS-8 | 0.499 | 0.750 | 0.80 | 0.77 | 3.45 |
| NAS-9 | 0.562 | 0.875 | 0.69 | 0.67 | 2.98 |
| NAS-10 | 0.624 | 0.938 | 0.80 | 0.77 | 3.45 |
| NAS-12 | 0.749 | 1.063 | 0.98 | 0.95 | 4.23 |
| NAS-14 | 0.874 | 1.250 | 0.95 | 0.92 | 4.10 |
| NAS-16 | 0.999 | 1.438 | 0.93 | 0.90 | 4.00 |
| NAS-18 | 1.124 | 1.625 | 0.92 | 0.89 | 3.95 |
| NAS-20 | 1.249 | 1.812 | 0.92 | 0.89 | 3.95 |

Τιμές του r χωρίς ροδέλες, γωνία κώνου 0° , $r=A_b E_b / A_p E_p$.

Πίνακας 2: Τιμές του r για κοχλίες AN.

| | | | r, σε χαλύβδινη πλάκα $E_p=29.5 \times 10^6$ kg/mm ² | r, σε πλάκα αλουμινίου $E_p=10.5 \times 10^6$ kg/mm ² | r, σε πλάκα μαγνησίου $E_p=6.5 \times 10^6$ kg/mm ² | |
|-------|-------------------------------|--------------------------------|---|--|--|------|
| | Διάμετρος κορμού, d_b | Διάμετρος κεφαλής, d_p | $\frac{(\text{Περιοχή})_b}{(\text{Περιοχή})_p}$ | | | |
| AN-3 | 0.189 | 0.335 | 0.47 | 0.45 | 1.25 | 2.02 |
| AN-4 | 0.249 | 0.398 | 0.64 | 0.62 | 1.70 | 2.75 |
| AN-5 | 0.312 | 0.460 | 0.87 | 0.84 | 2.32 | 3.74 |
| AN-6 | 0.374 | 0.523 | 1.10 | 1.06 | 2.92 | 4.73 |
| AN-7 | 0.437 | 0.585 | 1.25 | 1.21 | 3.33 | 5.40 |
| AN-8 | 0.499 | 0.710 | 0.98 | 0.95 | 2.60 | 4.20 |
| AN-9 | 0.562 | 0.835 | 0.80 | 0.77 | 2.14 | 3.44 |
| AN-10 | 0.624 | 0.898 | 0.91 | 0.88 | 2.42 | 3.90 |
| AN-12 | 0.749 | 1.023 | 1.16 | 1.12 | 3.10 | 5.00 |
| AN-14 | 0.874 | 1.210 | 1.07 | 1.04 | 2.84 | 4.60 |
| AN-16 | 0.999 | 1.398 | 1.05 | 1.03 | 2.81 | 4.54 |
| AN-18 | 1.124 | 1.585 | 1.00 | 0.97 | 2.67 | 4.30 |
| AN-20 | 1.249 | 1.772 | 0.93 | 0.90 | 2.48 | 4.00 |

Τιμές του r χωρίς ροδέλες, γωνία κώνου 0°, $r=A_b E_b / A_p E_p$.

Οι πίνακες 1 και 2 αναπτύχθηκαν για να υποδείξουν την αλλαγή του r με το μέγεθος των τυποποιημένων κοχλίων. Όταν χρησιμοποιούνται μεγάλου βάρους ροδέλες για να ελέγξουν το φορτίο του κοχλία, η εξωτερική τους διάμετρος θα έπρεπε να διαστασιολογείται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί το r στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Η περιοχή συμπίεσης στη πλάκα, A_p , υπολογίστηκε σαν ένας κυλινδρικός δακτύλιος (π.χ. γωνίας κώνου 0°) ανάλογος με $d_a^2 - d_b^2$. Συνεπώς οι ταξινομημένες τιμές του r είναι συντηρητικές και ως ένα βαθμό εξαρτώνται από το L, δηλαδή το πάχος της πλάκας. Για $L < 3.2 \text{ mm}$ οι τιμές είναι βασικά όπως δόθηκαν. Η επιφάνεια A_p μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 13.α συναρτήσει του πάχους της πλάκας για κάθε σχεδιαστική κατάσταση.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό φορτίο του κοχλία είναι η αναλογία του φορτίου λειτουργίας προς το φορτίο πριν τη λειτουργία W/P_i . Η γενική κατεύθυνση είναι ότι το W/P_i αυξάνεται, το συνολικό φορτίο

μειώνεται, αλλά από τον ορισμό το ίδιο γίνεται και με τον παράγοντα ασφαλείας του φορτίου λειτουργίας (ή εξωτερικού) και του φορτίου πριν τη λειτουργία (ή συσφίξεως). Συνεπώς η χρήση κοχλιών καταλληλότερα σχεδιασμένων, με μεγαλύτερες τιμές του λόγου W/P_i απαιτεί την ακριβή γνώση τόσο του W όσο και του P_i , (γραμμή 4 στο σχήμα 6). Αυτή η αναλογία καθορίζεται κυρίως από τη μηχανολογική κρίση του καθενός· πολλές φορές θα ήταν επιθυμητό να χρησιμοποιήσουμε ένα μεγάλο συντελεστή ασφαλείας, με ένα ευρύ περιθώριο μεταξύ του εξωτερικού φορτίου και του φορτίου συσφίξεως (μικρό W/P_i), αλλά αυτή η κατάσταση είναι εφικτή μόνο με μεγάλα φορτία.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω η ακαμψία του συνδέσμου έχει μια έντονη επίδραση στο συνολικό φορτίο. Θεωρούμε το παράδειγμα 1, αλλά με πλάκες από κράμα μαγνησίου αντί για ατσάλι. Τώρα από τον πίνακα 4 η τιμή του r είναι 3,45 οδηγώντας σε μεγαλύτερη F_{max} για κάθε τιμή του W/P_i · η αλλαγή στο υλικό της πλάκας αυξάνει την F_{max} κατά περίπου 50%, γραμμή 5 στο σχήμα 6.

Στον συνδυασμό κοχλία και πλακών από ατσάλι η τιμή του r αυξάνεται όσο αυξάνει το μέγεθος του κοχλία· συνεπώς κάποιος θα περίμενε αύξηση του συνολικού φορτίου, αλλά η ικανότητα του κοχλία ευτυχώς αυξάνει γρηγο-ρότερα με το μέγεθος απ' ότι η τιμή του r . Αυτή η κατάσταση μπορεί να μην ισχύει για όλα τα μεγέθη των κοχλιών. Για τα σχέδια των συνδέσμων που χρησιμοποιούν κοχλίες διαφορετικής τυποποίησης, οι τιμές του r θα πρέπει να υπολογίζονται για κάθε συνδυασμό μεγέθους και υλικού.

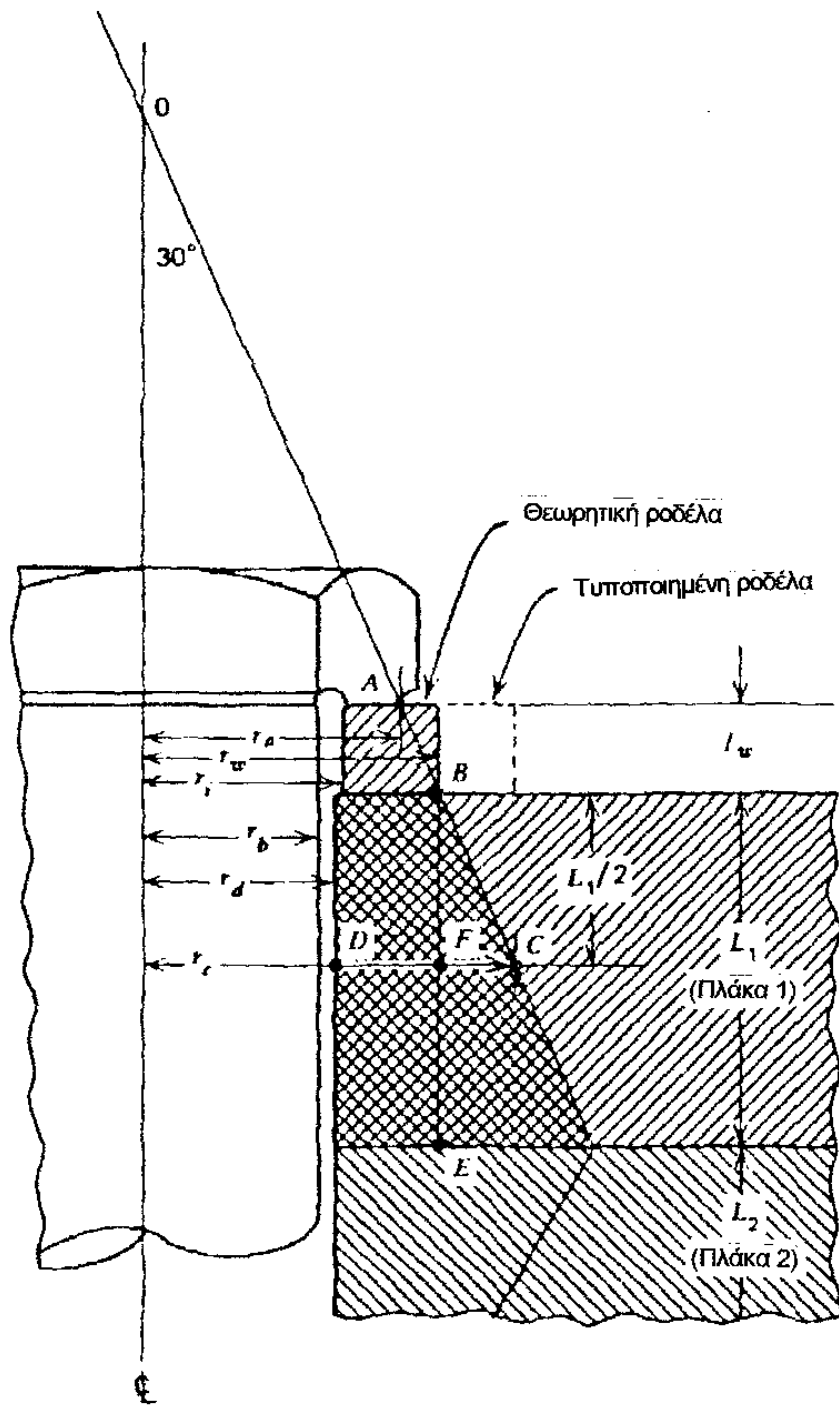
Η διαστασιολόγηση των ροδελών έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι καταπονείται μια κατάλληλη περιοχή συμπίεσης της πλάκας, μπορεί να γίνει με προσφυγή στο σχήμα 9. Αν θεωρήσουμε ότι: πάχος πλάκας= L_1 ακτίνα του στελέχους του κοχλία= r_b , ακτίνα της κεφαλής που φέρει τα φορτία= r_a , ακτίνα τρύπας= r_d και ότι η r_c αντιπροσωπεύει την ακτίνα της ουσιαστικής περιοχής θλίψης, τότε συμπεραίνεται ότι η εξωτερική διάμετρος της ροδέλας r_w και το πάχος της l_w , πρέπει να είναι τέτοια ώστε η προέκταση της OA να περνάει από τα σημεία B και C . Η περιοχή θλίψης έχει ληφθεί κατάλληλα σαν ο δακτύλιος στα σημεία C και D , αφού τα αποτελέσματα των φωτοελαστικών μελετών δείχνουν ότι η ένταση της συμπίεσης είναι ώστε να παίρνει τη μορφή ενός κόλουρου κώνου με μια γωνία κορυφής μεταξύ 25° και 33° εξαρτώμενη από το υλικό, το πάχος, το επίπεδο πίεσης της πλάκας και από το ότι η μέγιστη τάση εμφανίζεται κοντά στο κεντρικό επίπεδο της πλάκας. Για απλότητα στην κατασκευή του σχήματος 9 η ευθεία BF έχει σχεδιαστεί ίση με $L_1/2$ και η γωνία

λαμβάνεται 30° , από την οποία αποκομίζεται μια γενική έκφραση για την περιοχή συμπίεσης όπως:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_w + 0.5 \cdot L_1)^2 - d_a^2] \quad (\text{Σχέση 13.α})$$

με d_b/L_1 μεταξύ των τιμών 0,68 και 1,4. Μια πολύ χρήσιμη σχέση μεταξύ του πάχους L_1 και της δραστηκής ακτίνας της ροδέλας r_c δίνεται στο σχήμα 10 για διάφορα μεγέθη κοχλιών.

Μπορεί επίσης να φανεί ότι οι διαστάσεις της ροδέλας μπορεί να μειωθούν σημαντικά από τις παραπάνω τιμές. Οποιαδήποτε περιοχή που φέρει τα φορτία κάτω από την κεφαλή χάνεται, αλλά αυτή η διαδικασία οδηγεί συχνά σε αστοχία από τοπικά σπασίματα. Είναι σημαντικό να αναπτύξουμε τη θλίψη σε ολόκληρη την περιοχή της ροδέλας και από τις δύο πλευρές για να αποφύγουμε αυτό τον τύπο τη αστοχίας.



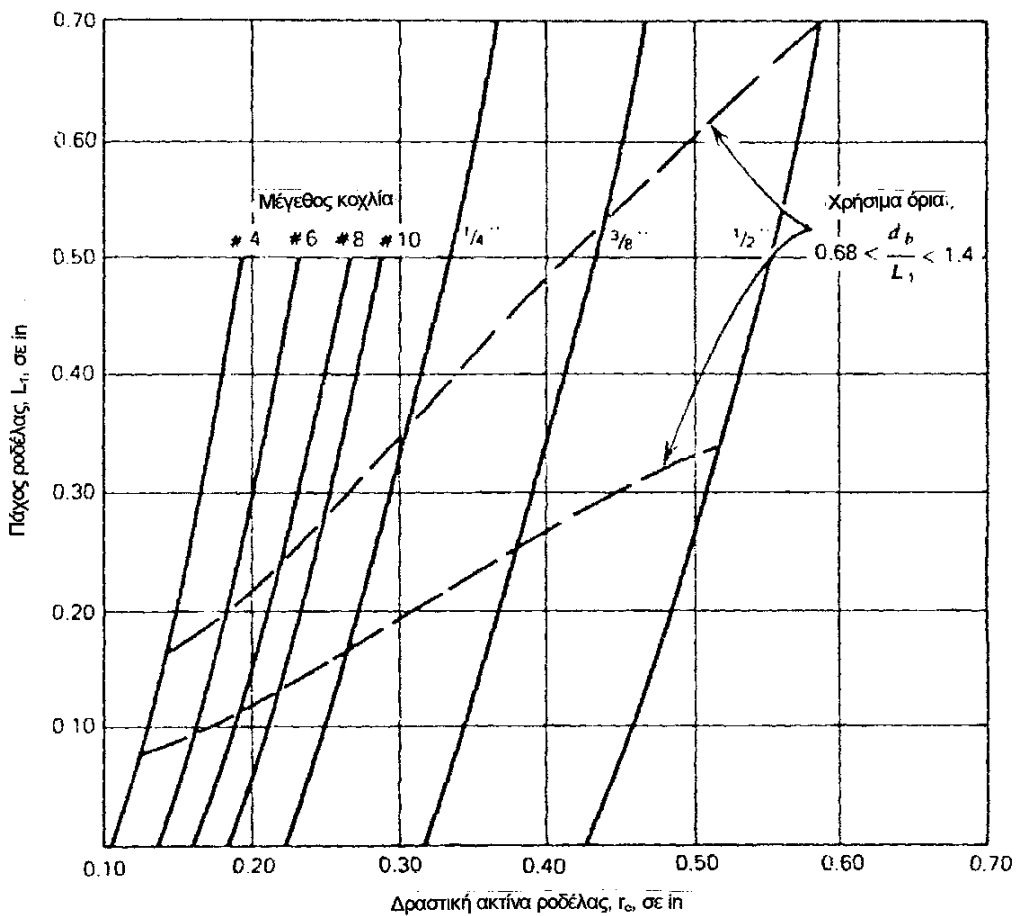
Σχήμα 9: Διαστασιολόγηση ροδελών.

Γραφική κατασκευή:

- 1) Το σημείο A ορίζεται ως η μέγιστη ακτίνα στο κάτω μέρος της κεφαλής του κοχλία.
- 2) Φέρνουμε μια γραμμή με κλίση 30° ως προς την κατακόρυφο και ορίζουμε τα σημεία O, B και C. Το σημείο C βρίσκεται στο $L_1/2$.
- 3) Φέρνουμε την κάθετο BE.

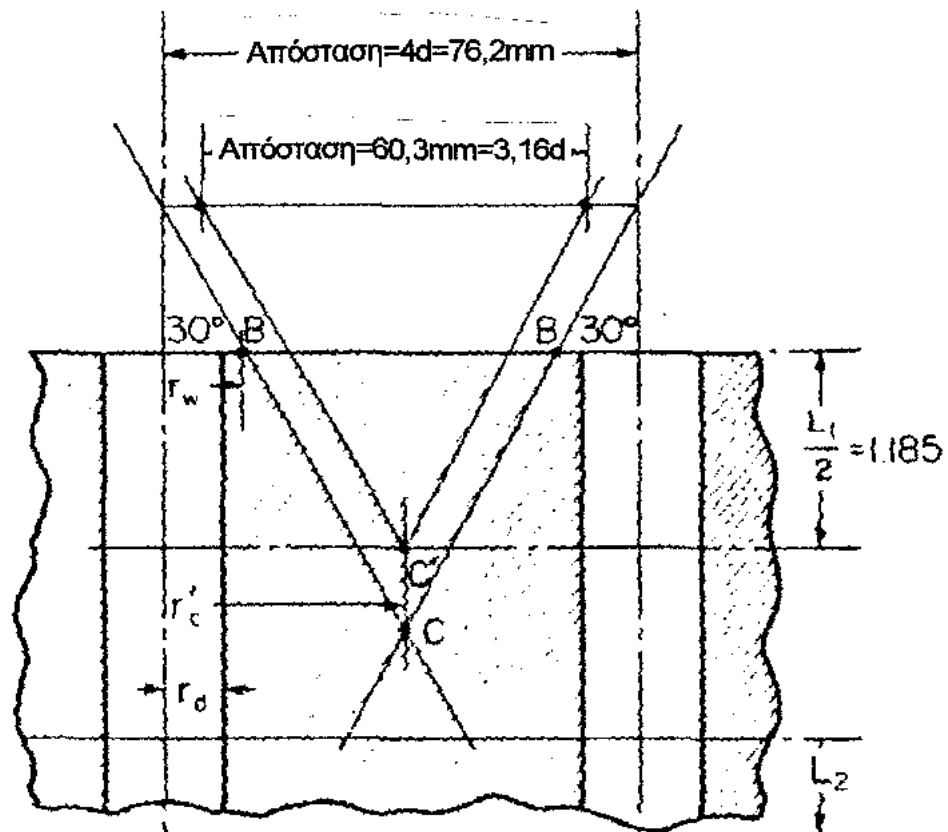
Τότε: $r_c = r_w + CF \Rightarrow r_c = r_w + 0.5 \cdot L_1 \cdot \tan 30^\circ \Rightarrow r_c = r_w + 0.25 \cdot L_1$ και η περιοχή

θλίψης A_p είναι ίση με: $A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot [(d_w + 0.5 \cdot L_1)^2 - d_d^2]$.

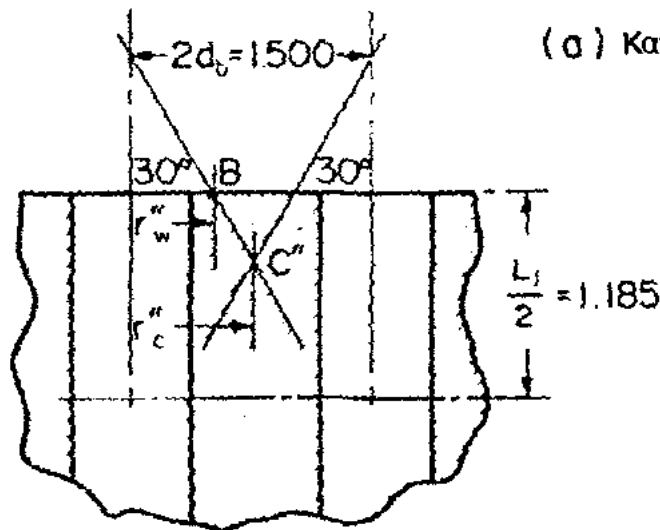


Σχήμα 10: Το πάχος συναρτήσεται της δραστικής ακτίνας σε συνδέσμους με κοχλίες.

Στο παραπάνω συμπέρασμα για την A_p , (σχέση 13.α) η τοποθέτηση των κοχλιών και της κλίσης θεωρήθηκε «κατάλληλη», π.χ. στην κατά προσέγγιση ακτίνα των 2,5 ως 5 φορές τη διάμετρο του κοχλία. Μια σύντομη διαδικασία για την εύρεση της πιο αποτελεσματικής κλίσης δίνεται στο σχήμα 11α.



(α) Κατάλληλη απόσταση



(β) Ακατάλληλη απόσταση

Σχήμα 11: Μελέτες κοχλιών-κλίσεων.

Εδώ η κλίση είχε αρχικά επιλεγεί στο $4d$ για κοχλίες με διάμετρο 19mm και στο σχήμα το σημείο τομής C βρίσκεται σημαντικά έξω από το κεντρικό επίπεδο της πλάκας. Η προβολή του C σ' αυτό το επίπεδο που είναι το σημείο C' και δια ταύτα κατά μήκος των γραμμών των 30° έχει σαν αποτέλεσμα ένα διάστημα $60,3\text{mm}$

(μετρημένο) ή μία κλίση 3,16d. Αυτή η τιμή θα μπορούσε να στρογγυλοποιηθεί και να πέσει στο 3d. Οι αριθμητικές διαστάσεις εκλέχτηκαν αυθαίρετα.

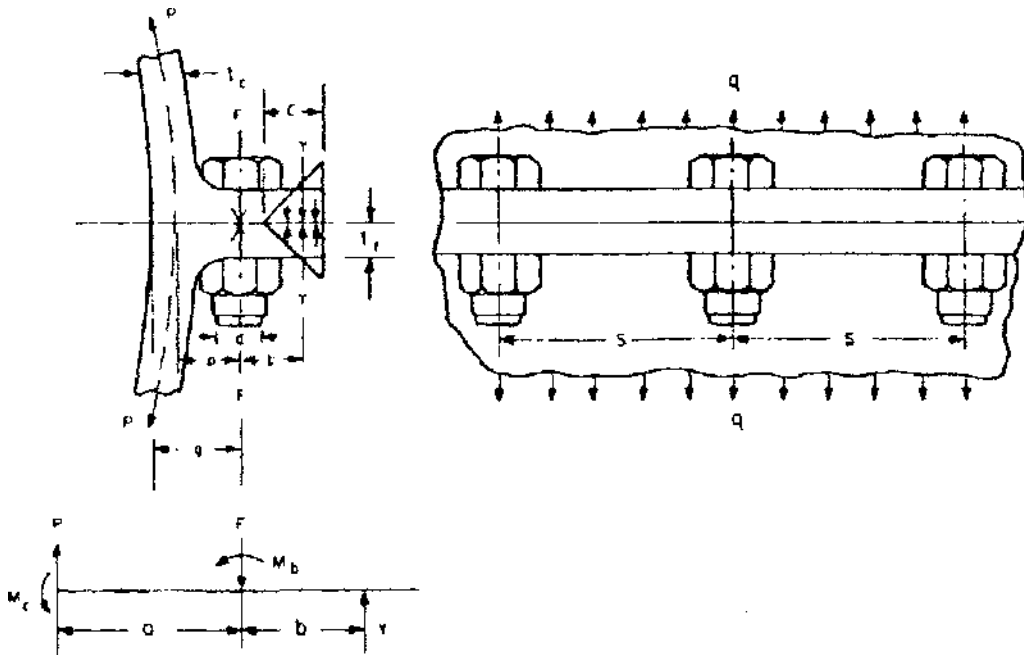
Το σχήμα 11β απεικονίζει τον κίνδυνο μιας πολύ μικρής κλίσης: το σημείο C'' προσεγγίζει το B με επακόλουθες υπερπιέσεις στην περιοχή της άκρης της τρύπας. Συγκρίνοντας την τάση θλίψεως μιας κατάλληλης κλίσης των 3,16d με μία των 2d, υποδεικνύεται μια αύξηση του λόγου r_c'/r_c'' .

Συνεπώς το πάντοτε υπάρχον πρόβλημα της αστοχίας από διάτμηση συμβιβάζεται εύκολα διαλέγοντας μια μικρή τιμή για την κλίση. Αν και οι θλιπτικές και οι καμπτικές τάσεις συνήθως προσθέτονται, είναι πιθανώς ικανοποιητικό να χρησιμοποιήσουμε μια κλίση όπως το C', που δεν αποκλίνει από το κεντρικό επίπεδο της πλάκας περισσότερο από $\pm 25\%$ του $L_1/2$. Οι μελέτες πάνω στην κλίση θα έπρεπε να περιέχουν επίσης την αναλογία της διαμέτρου του κοχλία προς το πάχος της πλάκας. Ένα πρακτικό εύρος κυμαίνεται από 1,0 μέχρι 0,25mm.

Για τύπους συνδέσμων που φέρουν σπείρωμα και όχι συμβατικούς κοχλίες με κεφαλή, η ποικιλία στο r εξαιτίας διαφορετικών σχεδιαστικών διαστάσεων μπορεί να είναι μάλλον μεγάλη και μερικές φορές ευεργετική. Για παράδειγμα μια συναρμογή με κλειστό κοχλία ονομαστικής διαμέτρου 9,5mm (διάμετρος πυρήνα κοχλία 12,7mm) που χρησιμοποιείται σε πλάκες από αλουμίνιο έχει ένα r μόνο 45% από αυτό για ένα κοχλία 6,4mm. Κοχλίας τύπου AN οδηγεί σε μία μείωση του φορτίου του κοχλία περίπου 20% για το ίδιο φορτίο πριν τη λειτουργία. Πρόσφατα σχέδια κοχλιών πολύ μεγάλης αντοχής είχαν πολύ μικρές αντοχές· μερικά από αυτά δεν διαθέτουν ροδέλα, που σημαίνει ότι έχουν μια μεγαλύτερη περιοχή του μέτρου ελαστικότητας κάτω από την κεφαλή, που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση και του r και του φορτίου του κοχλία. Για κατάλληλο έλεγχο του φορτίου του κοχλία, θα έπρεπε να βρεθεί μία τιμή του r για κάθε μέγεθος κεφαλής σε συνδυασμό με τα υλικά του κοχλία και των πλακών.

Από την πρακτική της παραδοχής ότι η περιοχή θλίψης είναι ένας δακτύλιος του οποίου η εξωτερική διάμετρος είναι τέτοια όση η μέση ακτίνα ενός κώνου 45° έχουμε λάβει αποδεκτά μηχανολογικά αποτελέσματα. Εντούτοις πρόσφατα σχεδιάστηκε από δεδομένα μια κάπως μικρότερη γωνία 25° ως 40° . Εφαρμόζοντας τον κανόνα της όσο το δυνατόν λιγότερης λειτουργίας έπεται ότι ένα μέρος της πλάκας θα έφτανε σε ένα επίπεδο τάσης τέτοιο ώστε η ισορροπία να διατηρούνταν πάντα με τη λειτουργία της θλίψης. Από τη σκοπιά της πρακτικής μηχανολογίας, φαίνεται ότι μόνο η παλιότερη πρακτική θα μπορούσε να τροποποιηθεί ώστε να

χρησιμοποιηθεί μια λίγο μικρότερη περιοχή θλίψης χωρίς απώλεια συντηρητισμού. Αναφορικά στις συνολικές περιοχές θλίψης και στη χρήση ροδελών, θα έπρεπε να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση του τελευταίου κατά μήκος της ροής των δυνάμεων έχει κάποια συνέπεια. Η φυσιολογική τοποθέτηση των ροδελών κάτω από τις κεφαλές των κοχλιών και των περικοχλίων σημαίνει ότι η θλιπτική τους απόκλιση συνεχίζει σαν ένας ευθύς παράγοντας του αυξανόμενου εφαρμοζόμενου φορτίου και του φορτίου πριν τη λειτουργία. Οι φλάντζες ή άλλα αντικείμενα μεταξύ των πλακών καταπονούνται μόνο από το φορτίο συσφίξεως, ενώ δεν καταπονούνται όταν εφαρμόζεται το φορτίο λειτουργίας. Η εισαγωγή ροδελών σε ένα σύνδεσμο αυξάνει το μήκος του κοχλία αλλά δεν αλλάζει το πάχος της φλάντζας. Το μεγαλύτερο μήκος κοχλία θα έπρεπε να οδηγεί σε μια βελτιωμένη διάρκεια ζωής, οι άλλες παράμετροι παραμένουν ίδιες.



Σχήμα 12: Τυπική κοχλιωτή φλάντζα.

Στον υπολογισμό της στιγμιαίας κατανομής μεταξύ της φλάντζας και της κάσας, έχει μελετηθεί ότι η φλάντζα και οι κοχλίες δρουν μαζί και αυτό σημαίνει ότι υπόκεινται στην ίδια καμπτική απόκλιση, και η συντηρητική παραδοχή που γίνεται είναι ότι η μέγιστη τιμή συμβαίνει στον κοχλία. Η συνολική τιμή P_a κατανέμεται μεταξύ της φλάντζας και της κάσας σε συμμετρία με τις τιμές αδρανείας.

Συνεπώς: $M=P_a$ = συνολική τιμή (Σχέση 14)

$$I_c = \frac{S_{tc}^3}{12} \quad (\text{Σχέση 15})$$

και $I_{f\beta} = I_f + I_\beta$ (Σχέση 16)

όπου $I_f = \frac{S t_f^3}{12} - \frac{d t_f^3}{12}$ (Σχέση 17)

$$I_\beta = 0.049 \cdot d_2^4 \quad (\text{Σχέση 18})$$

τότε $M_{f\beta} = P_a \cdot \frac{I_{f\beta}}{I_{f\beta} + I_c}$ (Σχέση 19)

και $M_c = P_a - M_{f\beta}$ (Σχέση 20)

Η κατανομή της $M_{f\beta}$ μεταξύ της φλάντζας και του κοχλίου δίνεται από τον τύπο:

$$M_f = M_{f\beta} \cdot \frac{I_f}{I_{f\beta}} \quad (\text{Σχέση 21})$$

και $M_\beta = M_{f\beta} - M_f$ (Σχέση 22)

Παίρνοντας περίπου Υ τιμές έχουμε:

$$M_y = P \cdot (\alpha + \beta) - T_\beta \cdot \beta - M_c - M_\beta = 0 \quad (\text{Σχέση 23})$$

από την οποία: $F = \frac{P \cdot (\alpha + \beta) - T_\beta \cdot \beta - M_c - M_\beta}{\beta}$ (Σχέση 24)

Η συνολική στατική τάση στον κοχλίο είναι το άθροισμα των εφελκυστικών και των καμπτικών τάσεων:

$$f_{\beta s} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_2^2} + \frac{M_\beta \cdot d_2}{2 \cdot I_\beta} \quad (\text{Σχέση 25})$$

Χρησιμοποιώντας κοχλίες τύπου AN-5 και τις διαστάσεις του τομέα που προκαλεί θλίψη σε μια τυπική τουρμπίνα αεροσκάφους, παίρνουμε μια στατική πίεση εξαιτίας της εσωτερικής πίεσης της τάξης των $f_{\beta s} = 8.1 \text{ kg/mm}^2$, συγκρινόμενη με μια αντοχή σε κάμψη των $70,33 \text{ kg/mm}^2$. Αν οι λεπτομερειακοί υπολογισμοί περιέχουν ένα παράγοντα ασφαλείας, θα εφαρμόζονταν στην ανάλυση φορτίων στον όρο P της σχέσης 14, μία τιμή 1,15 που είναι κοινώς χρησιμοποιούμενη όπου η κάμψη είναι ο τελικός τρόπος αστοχίας.

Πριν εξετάσουμε την εναλλασσόμενη συνιστώσα, βρίσκουμε το φορτίο σύσφιξης και το συνολικό φορτίο του κοχλίου. Η σχέση 26 είναι μια έκφραση για το W/P_i στο διαχωρισμό γι' αυτή τη κατάσταση φόρτισης του εφελκυσμού συν την κάμψη:

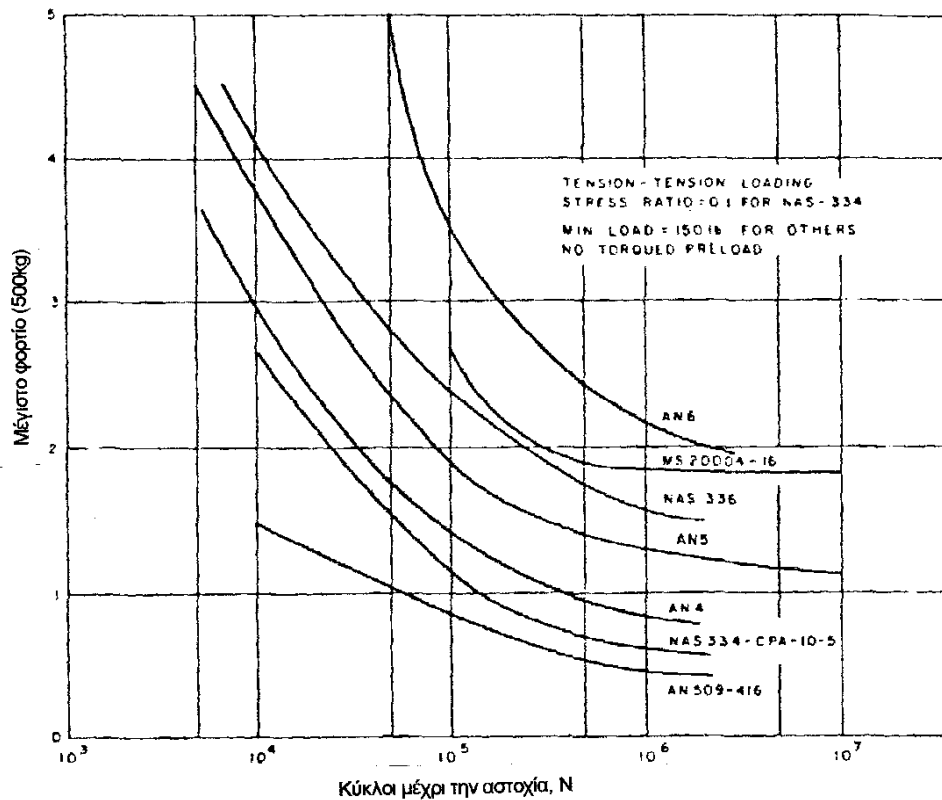
$$\frac{W}{P_i} = \frac{(1/E_f \cdot A_f) + [(g - a) \cdot (0 - a)/E_f \cdot (I_\beta + I_f)]}{1/(E_f \cdot A_f + E_\beta \cdot A_\beta) - [(\alpha - t_c/2) \cdot (0 - 2 \cdot a)]/[E_f \cdot (I_\beta + I_f)]} \quad (\text{Σχέση 26})$$

Η αντικατάσταση των τυπικών διαστάσεων για χαλύβδινους κοχλίες σε χαλύβδινες φλάντζες μειώνει λίγο το $W/P_i \sim 0,3$. Το φορτίο λειτουργίας W ανταποκρινόμενο στη στατική τάση της εξίσωσης 25 είναι 300kg· η παραπάνω προσέγγιση υποδεικνύει ότι το φορτίο σύσφιξης πρέπει να είναι 1/0,3 φορές αυτή η τιμή.

Ο κατά προσέγγιση υπολογισμός μιας διάρκειας ζωής ενός κοχλίου μπορεί να γίνει εισάγοντας ένα κύριο διάγραμμα για το υλικό του κοχλίου, με την S_α και την καινούργια τιμή της P_i σαν την κύρια τάση. Θα έπρεπε να προσέξουμε έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ένα διάγραμμα για το υλικό με τον κατάλληλο παράγοντα συγκέντρωσης τάσης· αν είναι διαθέσιμες οι καμπύλες, για τα μαλακά υλικά μόνο, το K θα έπρεπε να υπολογιστεί και να εφαρμοστεί στο S_α .

Από τα διαγράμματα ζωής άλλων κραμάτων μετάλλων του ίδιου ορίου θραύσης, είναι γνωστό ότι μια αύξηση της αναλογίας τάσης από 0,2 σε 0,8 (με την ίδια κύρια τάση) θα αύξανε τη διάρκεια ζωής κατά περίπου μια τάξη μεγέθους, οδηγώντας σε μια κατά προσέγγιση ζωή των κοχλίων σ' αυτό το παράδειγμα περίπου 10^6 κύκλους. Αφού μια πρακτική απαίτηση ζωής είναι 20×10^6 κύκλοι, συμπεραίνεται ότι αυτοί οι συγκεκριμένοι κοχλίες υπερφορτώνονται, αλλά φαίνεται ότι μια μείωση 300kg ως 350kg στην F_{max} θα μείωνε αυτή τη ζωή. Παρόλη την εκτεταμένη και χρήσιμη αύξηση στις διαθέσιμες πληροφορίες πάνω στο θέμα της κόπωσης, ο σχεδιαστής πολύ συχνά είναι ανίκανος να βρει αυτό ακριβώς που ζητάει. Θα έπρεπε να διαθέτει καμπύλες που εφαρμόζονται στο πρόβλημα του και με τα δεδομένα τους να βασίζονται σε:

- 1) Ίδιο υλικό.
- 2) Ίδια αντοχή, έσχατη ή κάμψης.
- 3) Ομοια σχήματα, αυτό σημαίνει ίδιοι παράγοντες συγκέντρωσης τάσης.
- 4) Ίδια αναλογία τάσης.
- 5) Ίδια θερμοκρασία δοκιμών.



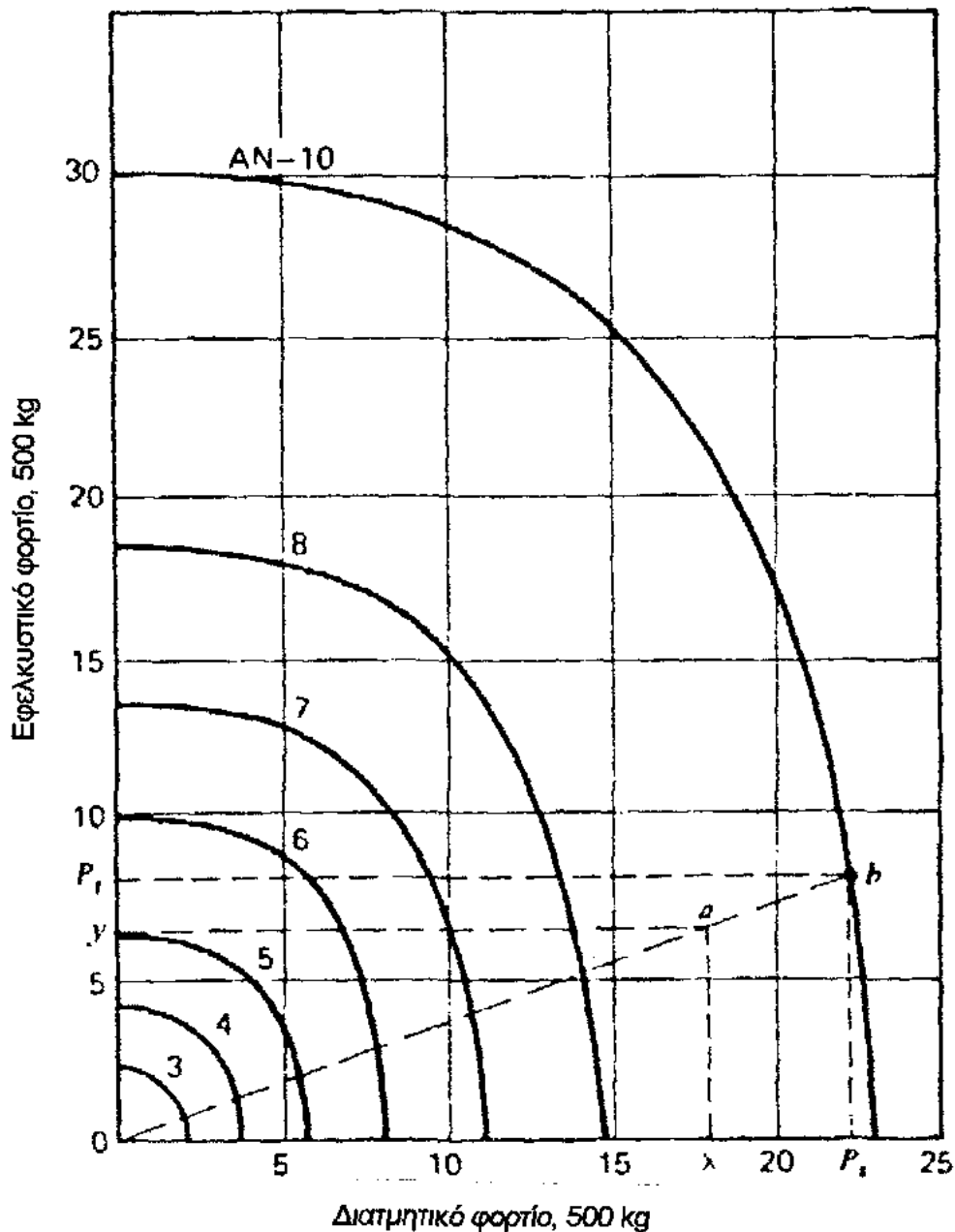
Σχήμα 13: Καμπύλες S-N για διάφορες συναρμογές με κοχλίες.

1.2 Σύνδεσμοι που καταπονούνται σε διάτμηση-εφελκυσμό ή διάτμηση-κάμψη

Οι πτυχωτοί σύνδεσμοι και οι συνδέσεις με επικαλυπτόμενες πλάκες σχεδιάζονταν για πολύ καιρό με βάση τη διάτμηση στους συνδετήρες και την κάμψη στις πλάκες σαν τους κύριους τύπους φόρτισης. Πρακτικά με τους πείρους εντούτοις, ο αξονικός εφελκυσμός ή η δύναμη σύσφιξης διαφέρουν από εφαρμογή σε εφαρμογή και είναι δύσκολο να καθοριστούν. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων τα αποτελέσματα παρατηρήσεων και ελέγχων έχουν οδηγήσει στην κοινή ομολογία ότι ο σύνδεσμος που καταπονείται σε υπερβολική θλίψη ήταν ανώτερος και στη στατική

φόρτιση και στη φόρτιση σε κόπωση. Αυτό το συμπέρασμα είναι γενικά σε συμφωνία με την αναλυτική γνώση ότι οι παράγοντες συγκέντρωσης τάσης για τις τρύπες στις πλάκες είναι αρκετά μεγάλοι, $k_t \sim 2$ ή 3 για κυκλικές τρύπες και τείνουν σε πολύ μεγάλες τιμές όσο η τρύπα γίνεται περισσότερο ελλειπτική, με $k_t \sim 25$. Είναι επίσης αρκετά γνωστό ότι ακόμα και οι με απόλυτη ακρίβεια τοποθετημένοι πείροι δεν «γεμίζουν» πάντα ακριβώς τις τρύπες, ειδικά όταν η εφαρμογή δεν είναι καλή, οδηγώντας σε ακόμη περισσότερες συγκεντρώσεις τάσης.

Η δύναμη θλίψης φάνηκε να έχει ένα διπλό ρόλο: 1) να αναπτύξει αντί-σταση τριβής για να γλιστρά πάνω στις επιφάνειες επαφής του συνδέσμου και 2) να μειώσει τη συγκέντρωση τάσης στην άκρη της τρύπας. Οποιαδήποτε σχεδιασμένη αύξηση στην αναλογία εφελκυσμού/διάτμησης είναι γενικά ευεργετική για τη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Εντούτοις η επίδραση της δύναμης θλίψης στις συγκεντρώσεις τάσης είναι πολύπλοκη και ένα κύριο αποτέλεσμα είναι η μεταφορά της συγκέντρωσης από την άκρη της τρύπας, στην άκρη της ροδέλας.



Σχήμα 14: Συνδυαζόμενα φορτία στατικής διάτμησης και εφελκυσμού για χαλύβδινους κοχλίες AN.

Σε συνδέσμους που έχουν σχεδιαστεί με μια μεγάλη αναλογία εφελκυσμού - διάτμησης, έχουν παρατηρηθεί αστοχίες που αρχίζουν στις πλάκες στο σημείο της άκρης της ροδέλας. Συνεπώς οι λεπτομέρειες από το σχεδιασμό ροδελών έχουν μεγαλύτερη σημασία· πρακτικά η χρήση ενανθρακωμένων ροδελών και με αιχμηρά χείλη πρέπει να αποφεύγονται. Τα κατάλληλα προφίλ ροδελών πρέπει να κρατούν τους παράγοντες συγκέντρωσης τάσης στις πλάκες κοντά στα θεωρητικά ελάχιστα του 2 ή 3 και με συγκεκριμένη δύναμη θλίψης για να μεταφέρει το φορτίο λόγω της

τριβής. Η διάρκεια ζωής τέτοιων συνδέσμων θα είναι σχετικά μεγάλη. Έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές συντελεστών τριβής ως 0,35 σε επιφάνειες συνδέσμων όχι ειδικά προετοιμασμένων, οι οποίοι με τους αρκετά μεγάλης αντοχής κοχλίες που είναι διαθέσιμοι τώρα (F_{tu} ως 211kg/mm^2), κάνουν ένα τέτοιο σύνδεσμο εφελκυσμού τριβής ένα πραγματοποιησιμο σχεδιαστικό σκοπό. Το γενικό κέρδος από τη δύναμη θλίψης έχει οδηγήσει σε πιο εκτεταμένη μελέτη για συνδέσμους που αρχικά είχαν σχεδιαστεί να καταπονούνται σε διάτμηση και κάμψη.

Γι' αυτούς τους συνδέσμους των οποίων οι συνολικοί περιορισμοί δεν επιτρέπουν την εξαφάνιση της κάμψης, οι κοχλίες μπορούν να σχεδιαστούν για συνδυαζόμενη φόρτιση σε εφελκυσμό και διάτμηση από μια σχέση αλληλεπίδρασης του τύπου:

$$R^3 + R^2 = 1$$

ή
$$\frac{x^3}{a^3} + \frac{y^2}{\beta^2} = 1$$

όπου: x =φορτίο διατμήσεως

y =φορτίο εφελκυσμού

a =επιτρεπόμενο φορτίο διατμήσεως

β =επιτρεπόμενο φορτίο εφελκυσμού

και από τις καμπύλες του σχήματος 13 αρχίζοντας από τα γνωστά φορτίο διατμήσεως x και εφελκυσμού y προσδιορίζεται το σημείο α . Η προέκταση μιας γραμμής από την αρχική διαμέσου του α προσδιορίζει το β . Στον επόμενο εξωτερικά (μεγαλύτερο) κοχλία, καθορίζονται τα επιτρεπόμενα φορτία για τον κοχλία. Τότε το περιθώριο ασφαλείας είναι:

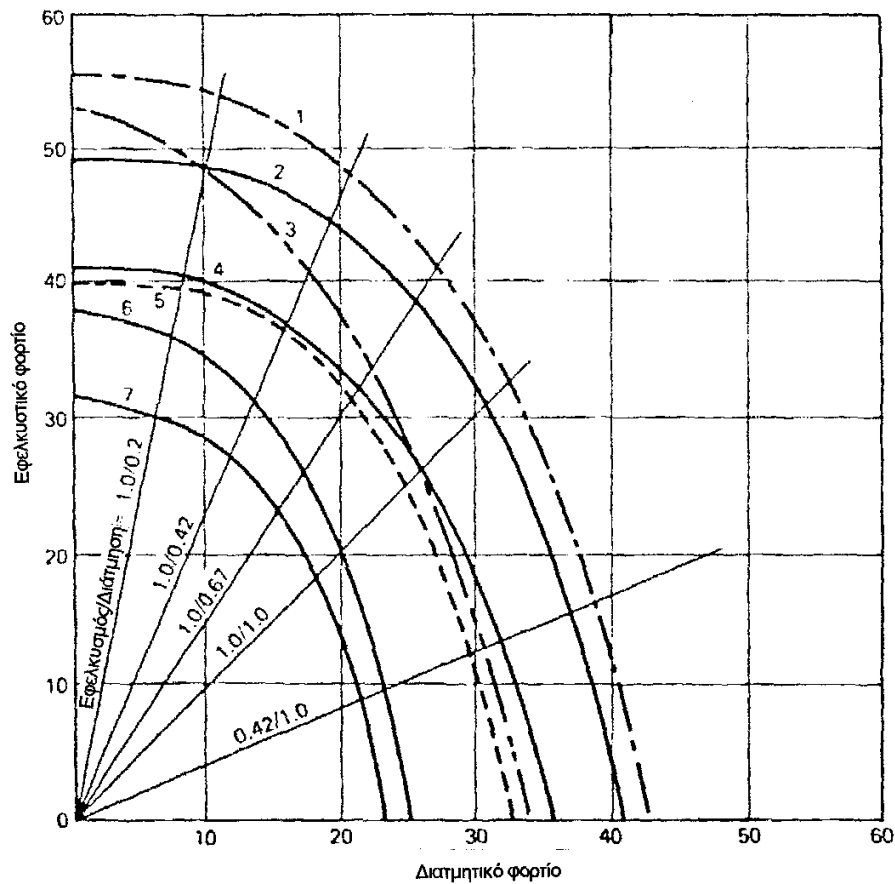
$$MS = \frac{P_s}{x} - 1$$

ή
$$MS = \frac{P_t}{y} - 1$$

επιλέγοντας το πιο μικρό. Οι γραφικές παραστάσεις για άλλους τύπους κοχλιών κατασκευάζονται εύκολα. Ο παλιότερος ελλειπτικός τύπος $x^2/a^2 + y^2/\beta^2 = 1$ έχει αντικατασταθεί από τον παραπάνω. Εντούτοις και στις δύο εκφράσεις οι επιτρεπόμενες τάσεις είναι για στατική φόρτιση ενώ η απαίτηση είναι για επιτρεπόμενες τάσεις σε κόπωση. Αυτές οι τιμές λαμβάνονται κατά προσέγγιση με το να ξανακατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση τάσης -επιμήκυνσης (S-N) από τις πληροφορίες του σχήματος 14. Η προσέγγιση αυξάνεται λόγω της απουσίας

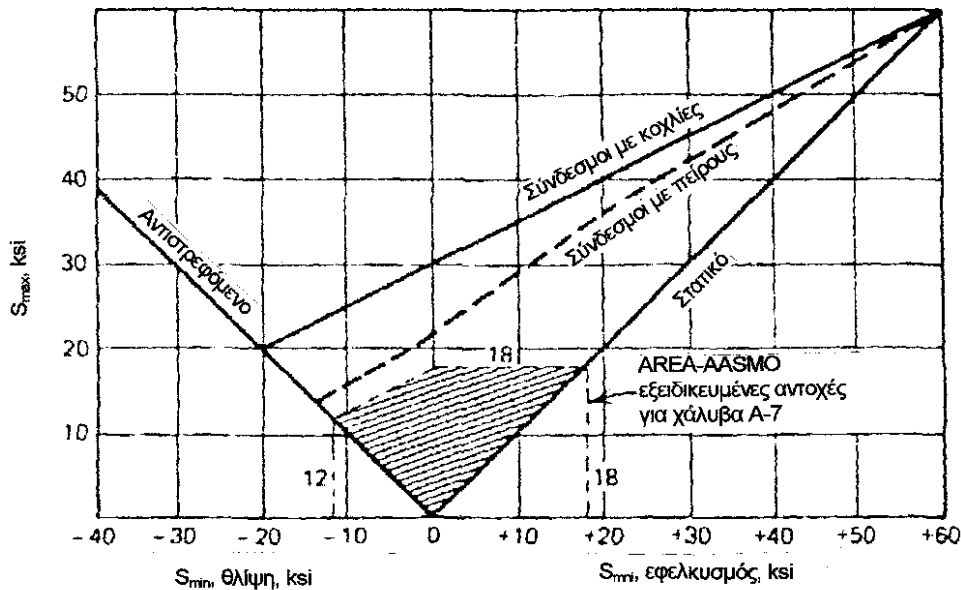
δεδομένων αντιστοιχίας εφελκυσμού-κόπωσης και διάτμησης-κόπωσης σε συγκεκριμένους κοχλίες. Εντούτοις είναι λογικά συντηρητικό να μειώσουμε την επιτρεπόμενη τάση διάτμησης ως προς τον παράγοντα των κύκλων σε μεγαλύτερη συμμετρία από την επιτρεπόμενη τάση εφελκυσμού, εξαιτίας των πολύ μεγαλύτερων παραγόντων συγκέντρωσης τάσης για τη διάτμηση.

Η επίδραση της μεταβολής της αναλογίας των περιοχών σε εφελκυσμό και σε διάτμηση παρατίθεται στο σχήμα 15 χρησιμοποιώντας κοχλίες A325 και A354. Αυτά τα δεδομένα, που είναι τυπικά για τους κατασκευαστικούς χάλυβες, ακολουθούν τη σχέση αλληλεπίδρασης με τους κυβικούς όρους αρκετά καλά, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι γι' αυτούς τους σχεδόν άριστους συνδέσμους με σπείρωμα στην επιφάνεια που καταπονείται σε διάτμηση, οι καμπύλες τείνουν πιο πολύ προς τον μη τυποποιημένο ελλειπτικό τύπο. Σ' αυτή τη γραφική παράσταση οι γραμμές για τις διάφορες αναλογίες της περιοχής εφελκυσμού/διάτμησης μας προσφέρουν δεδομένα που ανταποκρίνονται στις γραμμές για τις αναλογίες S_{min}/S_{max} στα διαγράμματα σταθερής διάρκειας ζωής. Τα αποτελέσματα πολλών ελέγχων συνδέσμων, στους βαρύτερους κατασκευαστικούς χάλυβες δείχνουν ότι αν οι τάσεις είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπουν την «επιβίωση» του συνδέσμου για 2×10^6 κύκλους η ζωή του μπορεί να θεωρηθεί αόριστα μεγάλη.



Σχήμα 15: Καμπύλες αλληλεπίδρασης για κοχλίες A325 και A354-BD.

Πάνω σ' αυτή τη βάση έχει κατασκευαστεί ένα τυποποιημένο διάγραμμα του Goodman, σχήμα 16, για τους συνδέσμους του σχήματος 15. Μια σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με σχεδιαστικές προδιαγραφές για τον A36 χάλυβα δείχνει ότι οι κοχλιωτοί σύνδεσμοι προμηθεύουν μια διάρκεια ζωής σε κόπωση της τάξης των 2×10^6 κύκλων ή και περισσότερο και είχαν μια μείωση επιμήκυνσης λιγότερο από 20%. Για τους κοχλίες που αστόχησαν η απώλεια επιμήκυνσης αυξάνεται απότομα όσο η διάρκεια ζωής μειώνεται.



Σχήμα 16: Τροποποιημένο διάγραμμα του Goodman για κοχλίες A325 και A354-BD στους 2×10^6 κύκλους.

Αυτές οι καταστάσεις συγκρινόμενες με το γεγονός ότι οι καμπύλες αλληλεπίδρασης σε κόπωση για τους κοχλίες A325 και A354 πρέπει να εμφανίζονται παρόμοιες με αυτές του σχήματος 15, αντιπροσωπεύουν έντονα τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της μεγαλύτερης πρακτικής αναλογίας του εφελκυσμού προς τη διάτμηση στο θέμα της δύναμης της τάσης ή της περιοχής. Οι καμπύλες του σχήματος 15 δείχνουν επίσης το σαφές πλεονέκτημα στην αντοχή σε κόπωση των κοχλιωτών συνδέσμων σε σχέση με τους αντίστοιχους συνδέσμους με πείρους.

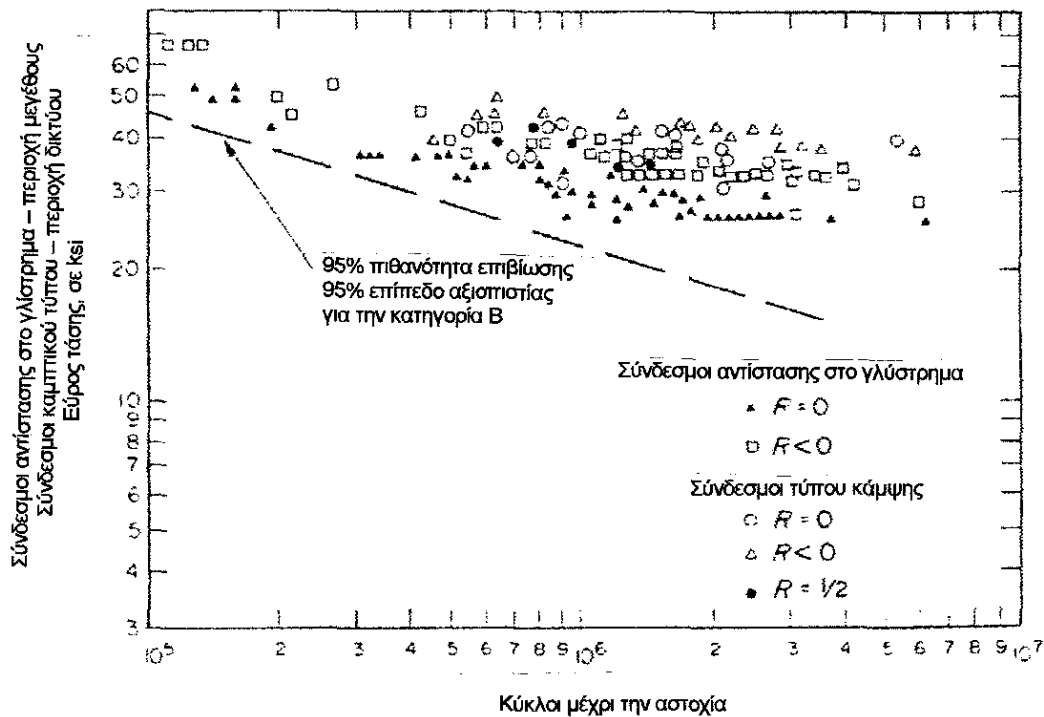
Έχουν αναπτυχθεί πολλές διαμορφώσεις για συνδέσμους που καταπονούνται σε διάτμηση: επίπεδοι και διπλά ενωμένοι, με οδόντωση, με κλειδιά σφιξίματος κ.τ.λ. Το μέγεθος της τιμής του k_t για τον καθένα βρίσκονται στον πίνακα 3. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο απλά διατμηνόμενος σύνδεσμος, με ένα μεγάλο k_t , περίπου 13, θεωρείται γενικά μη αποδεκτός για εφαρμογές μεγάλης απόδοσης. Πολλοί από τους άλλους δεν είναι κατάλληλοι και για το μεγάλο k_t και για την ακρίβεια της κατασκευής τους: ο τύπος διπλής διάτμησης με $k_t=4,1$ είναι η καλύτερη απ' όλες τις επιλογές και ο τύπος με διπλή ένωση με $k_t=3,2$ σπανίως αξίζει να εφαρμοστεί.

Για να συνοψίσουμε, μια σχεδιαστική προσέγγιση σε κόπωση για κοχλίες που καταπονούνται με φορτία διάτμησης και εφελκυσμού θα πρέπει: να εφαρμόζεται το κριτήριο διαχωρισμού, η συνιστώσα του εφελκυσμού να μεταχειρίζεται όπως στον προηγούμενο υποτομέα· σε όλες τις περιπτώσεις ο κοχλίας θα πρέπει να

διαστασιολογείται από μια σχέση ή καμπύλη χρησιμοποιώντας τις επιτρεπόμενες τιμές σε κόπωση. Η μεγαλύτερη πρακτική τιμή της αναλογίας εφελκυσμού/διάτμησης θα έπρεπε να χρησιμοποιείται με μια εξαίρεση για κατασκευές ασφαλούς αστοχίας με περιττές ροές δυνάμεων. Η τάση διατμήσεως στην συνιστώσα διάτμησης-κάμψης θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη για να επιτρέπει στο σύνδεσμο να κάμπτεται ελαφρώς με την απώλεια ενός μέλους και συνεπώς να επιτρέπει την ανακατανομή του φορτίου όπως απαιτείται από αυτό το κατασκευαστικό αντικείμενο. Μια γενική καμπύλη της συμπεριφοράς σε κόπωση των συνδέσμων με αντίσταση στο γλίστρημα και των συνδέσμων κάμψης δίνεται στο σχήμα 17, το οποίο δείχνει συγκέντρωση τάσεων μεταξύ $17,6\text{kg/mm}^2$ και $28,1\text{kg/mm}^2$ αν και το απόθεμα της αντοχής της πλάκας είχε αντοχή από $25,36\text{kg/mm}^2$ ως $84,46\text{kg/mm}^2$. Κατά προσέγγιση η ίδια αντοχή σε κόπωση βρίσκεται σχεδιάζοντας συνδέσμους με αντίσταση στο γλίστρημα στη βάση και συνδέσμους κάμψης στο δικτυωτό τομέα. Οι τιμές λήφθηκαν από την κατώτερη οριακή γραμμή προσφέροντας μια γενικά συντηρητική βάση για το σχεδιασμό οποιουδήποτε τύπου συνδέσμου που του εφαρμόζονται κυκλικά φορτία.

Πίνακας 3: Παράγοντας συγκέντρωσης τάσης για συνδέσμους που καταπονούνται σε διάτμηση.

| Τύπος συνδέσμου | Αριθμός φιγούρας | Υλικό | Κύριο φορτίο, σε kg | Τιμή του k_t , χονδρικά |
|-----------------------------|------------------|---------|---------------------|---------------------------|
| Απλή καρφίτσα | 2c | 7075-T6 | 8000 | 8.1 |
| | | 7075-T6 | 6000 | 5.7 |
| | | 2024-T4 | 8000 | 4.1 |
| | | 2014-T6 | 8000 | 6.5 |
| Διπλή καρφίτσα | 2j | 7075-T6 | 8000 | 3.2 |
| Απλή διάτμηση | 2f | 7075-T6 | 8000 | 13.0 |
| Διπλή διάτμηση | | 7075-T6 | 8000 | 4.1 |
| Κλιμακούμενη διπλή διάτμηση | 2g | 7075-T6 | 8000 | 4.3 |
| Ανομοιόμορφο βήμα | 2b | 7075-T6 | 8000 | 8.1 |
| Ομοιόμορφο βήμα | 2h | 7075-T6 | 8000 | 6.5 |
| Κοχλίωση κλειδωμένη | 2d | 7075-T6 | 8000 | 4.3 |
| Σφιγκτήρας κλειδωμένος | 2l | 7075-T6 | 8000 | 7.3 |
| Οδοντωτός | 2e | 7075-T6 | 8000 | 8.1 |
| Δείγμα με αφόρτιστες οπές | 2a | 7075-T6 | 8000 | 3.1 |
| | | 7075-T6 | 10000 | 3.2 |
| | | 2024-T6 | 8000 | 3.2 |
| | | 2014-T6 | 10000 | 3.0 |



Σχήμα 17: Συμπεριφορά σε κόπωση κοχλιωτών συνδέσμων.

1.3 Υλικά κοχλιώσεων

Τα κριτήρια για την εκλογή του υλικού του κοχλία και οι βάσεις για την κατάρτιση καταλόγων για τη σύγκριση με τα διαθέσιμα υλικά είναι τόσο πολυάριθμα όσο και οι εφαρμογές. Το πρώτο κριτήριο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι αυτό της αντοχής σε εφελκυσμό του υλικού, αλλά αυτή η προσέγγιση δεν είναι η κατάλληλη. Πολλές παρατηρήσεις έδειξαν ότι τα μοναδικά έγκυρα δεδομένα για την αντοχή έρχονται από δοκιμές σε μια συναρμογή ενός πλήρως τυποποιημένου κοχλία και περικοχλίου και όχι από ένα δείγμα του υλικού. Τότε επίσης θα πρέπει να προσμετρώνται και οι άλλες παράμετροι του περιβάλλοντος εργασίας, όπως η διάβρωση και τα συνδυαζόμενα φορτία και ιδιαίτερα στους χάλυβες μεγάλης αντοχής. Ίσως μια χρήσιμη βάση για την ταξινόμηση τους είναι η αντίσταση τους στην απώλεια αντοχής ή σκληρότητας ως προς τη θερμοκρασία.

Για ένα λογικό εύρος της θερμοκρασίας από τους +173°C ως +523°C, ο σχεδιαστής έχει ένα ευρύ φάσμα εκλογής, έτσι ώστε να μπορεί να ισορροπήσει πολλές παραμέτρους όπως η αντοχή, η αντίσταση στη διάβρωση, ο βαθμός μαγνήτισης, το κόστος κ.τ.λ.. Έξω από αυτό το κατά προσέγγιση πεδίο επιλογών ο

αριθμός των επιλογών για υλικά μειώνεται μάλλον απότομα, στα υπερκράματα και στους χάλυβες πολύ μεγάλης αντοχής.

Σε μια βάση μοναδιαίας αντοχής ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τους βαθμονομημένους (0-8) SAE χάλυβες, βηρύλλιο, τιτάνιο, αλουμίνιο διαμορφωμένο εν ψυχρώ, κράματα με βάση το χαλκό ή οποιοσδήποτε τύπος από τους τρεις τύπους ανοξειδωτων χαλύβων. Στο θέμα της αντίστασης στη διάβρωση υπάρχουν ανοξειδωτοι ωστενίτες και φερρίτες, κράματα χαλκού και νικελίου και πολλά αμέταλλα υλικά όπως το νάιλον, το τεφλόν, το Derlin και οι πολυανθρακίτες. Η βέλτιστη επιλογή και για αντοχή και για αντίσταση στη διάβρωση είναι συχνά ο ανοξειδωτος τύπος 316 στην κατάσταση 5c (ελάχιστη $F_{ty}=70.33\text{kg/mm}^2$), αλλά φυσικά πρέπει να ικανοποιούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

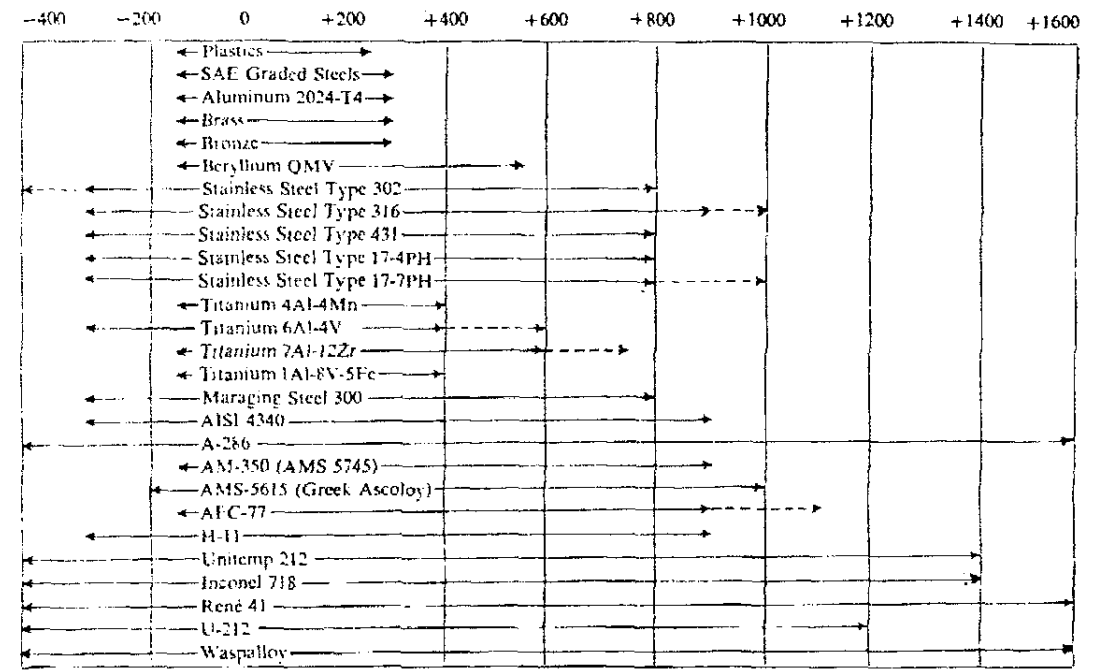
Σε κρυογονικές θερμοκρασίες, όπως στους -150°C μόνο τέσσερα υλικά έχει αποδειχθεί ότι αντέχουν ολοκληρωτικά: το Inconel 718, το Unitemp, το A-286 και το τιτάνιο 5Al-2,5Sn ELI. Άλλα κράματα με βάση το νικέλιο όπως τα Wasp alloy και Rene 41 υπόσχονται πολλά, ενώ δεν έχει αποδειχθεί εντελώς η χρησιμότητα κραμάτων με βάση το κοβάλτιο όπως το L605. Για τις μεγάλες θερμοκρασίες το Inconel 718, το Wasp alloy, το A-286 (ή A-638) και το Rene 41 χρησιμοποιούνται στους 1873°C . το H-11 και το AFC77 στους 1173°C και το Ti-7Al-12Zr στους 1023°C . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κράματα που είναι χρήσιμα για εξαιρετικά μεγάλες θερμοκρασίες είναι εκείνα με τη μεγάλη αντοχή των $154,7\text{kg/mm}^2$ ως 211kg/mm^2 . Το σχήμα 18 περιλαμβάνει σε μια λίστα τις κατά προσέγγιση χρήσιμες θερμοκρασίες για τα διάφορα υλικά.

Στην προσπάθεια για να πετύχουμε ακόμη μεγαλύτερες αντοχές και θερμοκρασίες λειτουργίας, κατασκευάζονται συνεχώς καινούργια κράματα με το πιο αξιοσημείωτο το κράμα πολλών φάσεων MP35N. Προσφέρει το βέλτιστο συνδυάζοντας διάρκεια ζωής στην κόπωση και αντίσταση στη διάβρωση και στη θερμοκρασία (μέχρι τους 843°C)- η γενική του συμπεριφορά συγκρίνεται με αυτή του 17-7PH στο σχήμα 19.

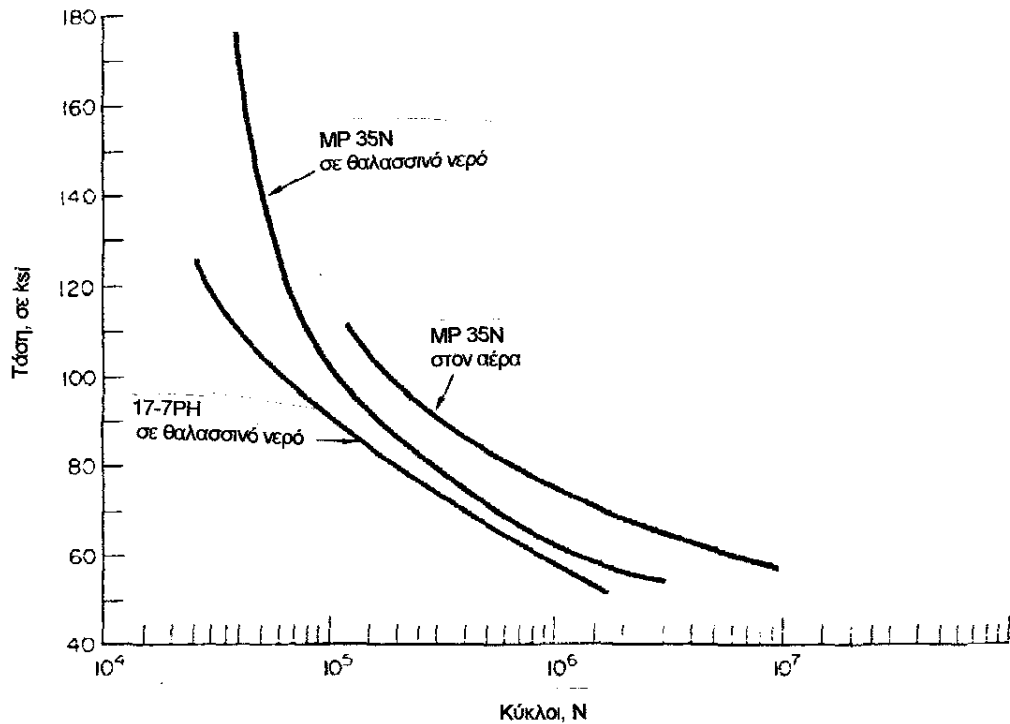
Ένα ειδικό πρόβλημα στη λειτουργία με μεγάλη θερμοκρασία είναι η χαλάρωση του κοχλίου ή ερπυσμός. Μια τυπική περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 20. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την παράμετρο του Larson-Miller: $P=T(20+\log t)$, όπου το T είναι σε βαθμούς Rankine και το t είναι χρόνος σε ώρες. Για τη σύγκριση μεταξύ υλικών, έχουν σχεδιαστεί σε γραφική παράσταση εμπειρικά

δεδομένα που δίνουν την P συναρτήσει της τάσης με δεδομένο T, όπως στο σχήμα 21.

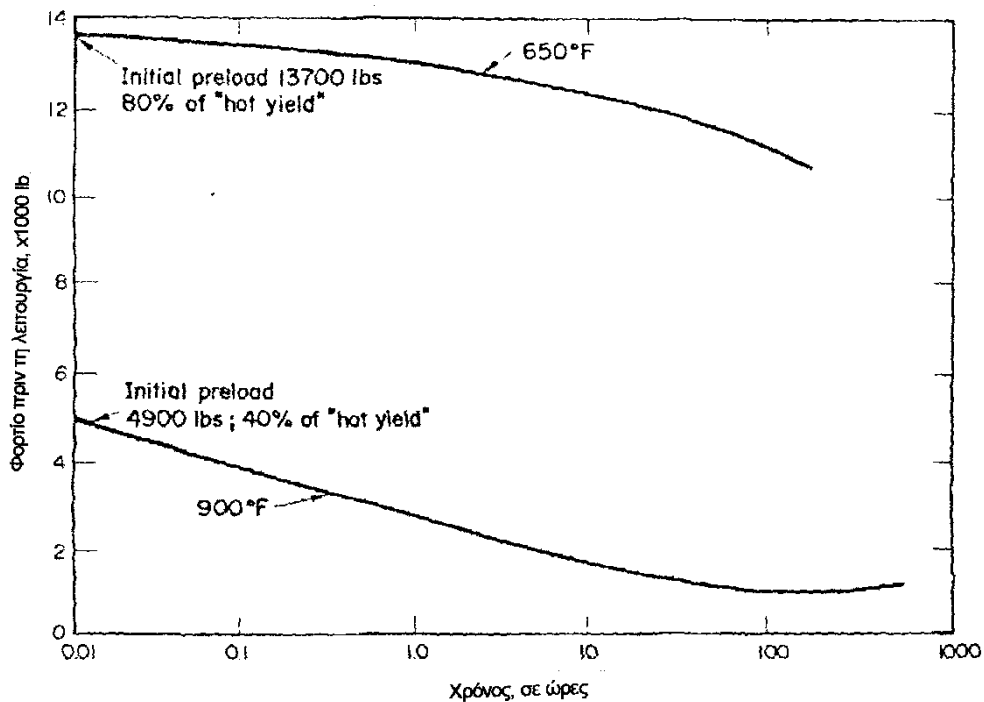
Το σχήμα 22 αντιπροσωπεύει τη γενική υπεροχή σε κόπωση των κραμάτων με βηρύλλιο και τιτάνιο σε σχέση με το χάλυβα, αλλά θα πρέπει να δοθεί προσοχή όσον αφορά στις προδιαγραφές τους. Συγκεκριμένα με τους χάλυβες (τουλάχιστον κάτω από έναν UTS των $154,7\text{kg/mm}^2$) είναι πιο ανισοτροπικά και έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις εγκοπές και την ποικιλία των σφυρηλατήσεων και στην κατεργασία εν θερμώ. Και το κράμα βηρυλλίου QMV και τα τρία κράματα τιτανίου 6Al-4V, 4Al-4Mn και 7Al-12Zr ήταν ικανοποιητικά σε συνδέσμους μεγάλης απόδοσης, αλλά είναι αξιοσημείωτο ότι η συγκριτικά μεγάλη αντοχή του τιτανίου είναι διαθέσιμη μόνο σε μεγάλο αριθμό κύκλων. Το περιθώριο του 300% των 5×10^6 κύκλων στους χάλυβες με συγκρίσιμη αντοχή πέφτει στο 125% στους 5×10^4 κύκλους.



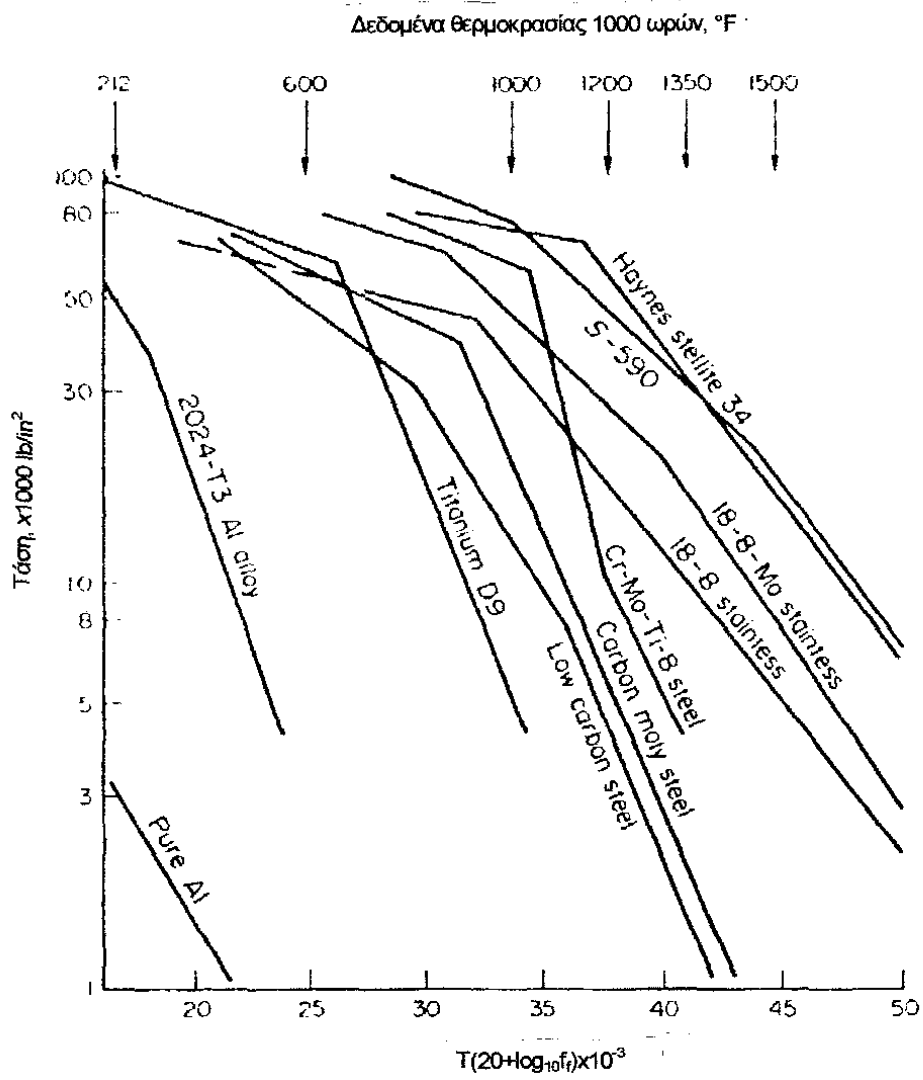
Σχήμα 18: Θερμοκρασίες εργασίας για υλικά κοχλιώσεων.



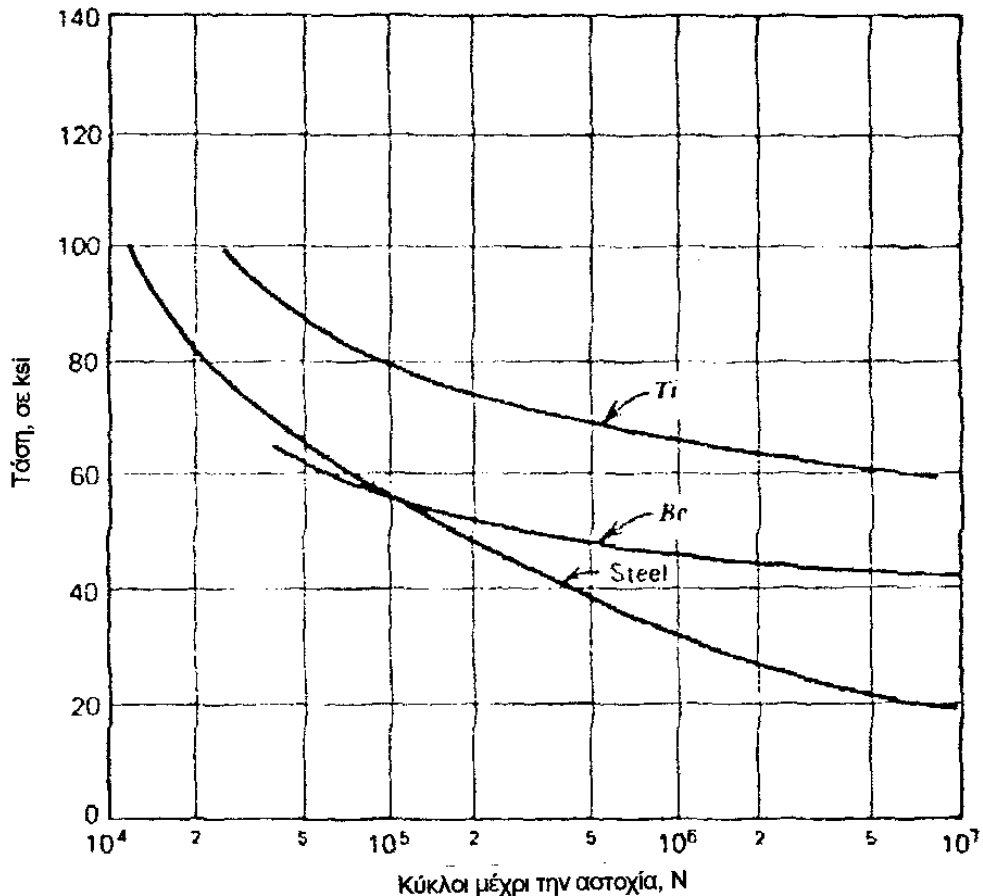
Σχήμα 19: Καμπύλες S-N για τα κράματα MP35N και 17-7PH.



Σχήμα 20: Μείωση του φορτίου σύσφιξης συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 21: Η χρήση της παραμέτρου των Larson-Miller για την απευθείας σύγκριση των υλικών.



Σχήμα 22: Συγκριτική κόπωση κοχλιών από τιτάνιο, βηρύλλιο και χάλυβα συναρτήσει της τάσης και των κύκλων.

Στον σχεδιασμό κοχλιών ελαχίστου βάρους, στη διαστασιολόγηση δεν θα πρέπει να υπολογίζεται μόνο η αντοχή του κοχλία, αλλά επίσης η αναλογία αντοχής/βάρους ή αντοχής/πυκνότητας. Ο πίνακας 4 μας δίνει τη σύγκριση μεταξύ μερικών υλικών για κοχλίες υψηλής απόδοσης σε σχέση με την αντοχή τους και αυτές τις αναλογίες. Αν και το βηρύλλιο έχει τις μεγαλύτερες αναλογίες, το συμπέρασμα δεν είναι απαραίτητα ότι οι κοχλίες από βηρύλλιο συνιστούν τον «καλύτερο» σχεδιασμό. Η απαίτηση του σχεδίου για πολύ μεγάλες αναλογίες μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με μεγάλης αντοχής χάλυβες. Επίσης η χρήση των υλικών με μεγάλες αναλογίες οδηγεί σε ογκώδης συνδέσμους, εφόσον η συνολική συναρμογή το επιτρέπει. Η αντοχή σε διάτμηση και κάμψη των κοχλιωτών μερών είναι επίσης μια παράμετρος του σχεδιασμού· η χρήση των σκληρότερων και με τη μεγαλύτερη αντοχή υλικών μπορεί να οδηγήσει σε ακραία σχέδια που καταπονούνται σε διάτμηση από μια ροπή στρέψης. Συνεπώς, ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μεταξύ των ακραίων περιπτώσεων με υλικά μεγάλης αναλογίας και μικρής αντοχής

και να αποδεχθεί το όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέγεθος συνδέσμου και του μικρότερου βάρους ή να διαλέξει τα υλικά με μικρή αναλογία και μεγάλη αντοχή για τη μείωση του μεγέθους αλλά με κόστος το μεγαλύτερο βάρος. Το μέγεθος και το βάρος των περικοχλίων και των ροδελών σχηματίζουν ένα σημαντικό μέρος από το συνολικό του συνδέσμου.

1.4 Σχέσεις μεταξύ του φορτίου συσφίξεως και της ροπής στρέψης

Ο καθορισμός του πραγματικού φορτίου συσφίξεως σε μια δοσμένη συναρμογή κοχλία-περικοχλίου θέτει ένα ανυπέρβλητο πρόβλημα. Η πιο ακριβής μέθοδος είναι η μέτρηση της επιμήκυνσης του κοχλία με ένα μικρόμετρο, αλλά αυτή η διαδικασία δεν μπορεί να είναι πάντα εφικτή εξαιτίας της έλλειψης δυνατότητας προσέγγισης και είναι πολύ πρόχειρη και χρονοβόρα. Τα αποκοπτόμενα μέρη κοχλίων περικοχλίων έχουν διαστασιολογηθεί έτσι ώστε η οδηγός ροπή στρέψης να αναπτύσσει το σωστό φορτίο σύσφιξης με την έσχατη διατμητική τάση σ' αυτόν τον τομέα.

Πίνακας 4: Σύγκριση αντοχής/πυκνότητας για υλικά κοχλιώσεων.

| Υλικό | Έσχατη αντοχή εφελκυσμού S_u , σε kg/mm^2 | Αντοχή διάτμησης S_s , σε kg/mm^2 | Όριο αντοχής EL, στους 10^8 κύκλους, σε kg/mm^2 | $\frac{S_u}{\text{Πυκνότητα}}$ | $\frac{S_s}{\text{Πυκνότητα}}$ | $\frac{EL}{\text{Πυκνότητα}}$ |
|--------------------------------|---|--|--|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Χάλυβας χαμηλού κράματος | 130.8 | 76.0 | 88.1 | 15.0×10^6 | 8.8×10^6 | 3.2×10^6 |
| Χάλυβας | 216.6 | 133.6 | 84.4 | 25.1×10^6 | 15.5×10^6 | 9.8×10^6 |
| Ανοξείδωτος χάλυβας | 80.9 | 31.6 | 23.9 | 9.1×10^6 | 3.6×10^6 | 2.8×10^6 |
| Τιτάνιο | 118.2 | 72.4 | 42.2 | 24.2×10^6 | 14.9×10^6 | 8.6×10^6 |
| Βηρύλλιο | 52.7 | 45.7 | 31.6 | 26.2×10^6 | 22.7×10^6 | 15.7×10^6 |

Η σύσφιγξη μέχρι το φορτίο συσφίξεως μέσω μιας βίαιης ροπής στρέψης είναι ίσως ο απλούστερος και φθηνότερος τρόπος, αλλά είναι μάλλον ανακριβής. Η αναπόφευκτη μεταβολή από τη μία θέση των σπειρών στην επόμενη συν τη τυχαία παρουσία του λιπαντικού και/ή της βρωμιάς, έχει σαν αποτέλεσμα μια ευρεία ποικιλία φορτίων συσφίξεως. Ο κατάλληλος έλεγχος στην κατασκευή, στην επαφή και στη συναρμογή, μπορεί να κάνει αποδεκτή αυτή τη μέθοδο, αλλά είναι απαραίτητος ο έλεγχος ακαμψίας για να έχουμε κορυφαία απόδοση από κατάλληλα σχεδιασμένους και κορυφαίας ποιότητας συνδέσμους. Ενώ το φορτίο συσφίξεως μπορεί να είναι αρκετά μικρότερο από το μέγιστο φορτίο του κοχλία, οι τάσεις που θα εμφανιστούν μπορεί να εξαρτώνται ως ένα μεγάλο βαθμό από τα περιθώρια ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα πρακτικά προγράμματα για τη δημιουργία και τη διατήρηση των στάνταρτ μεταξύ της ροπής στρέψης και του φορτίου συσφίξεως αποτελούνται από τρεις δραστηριότητες:

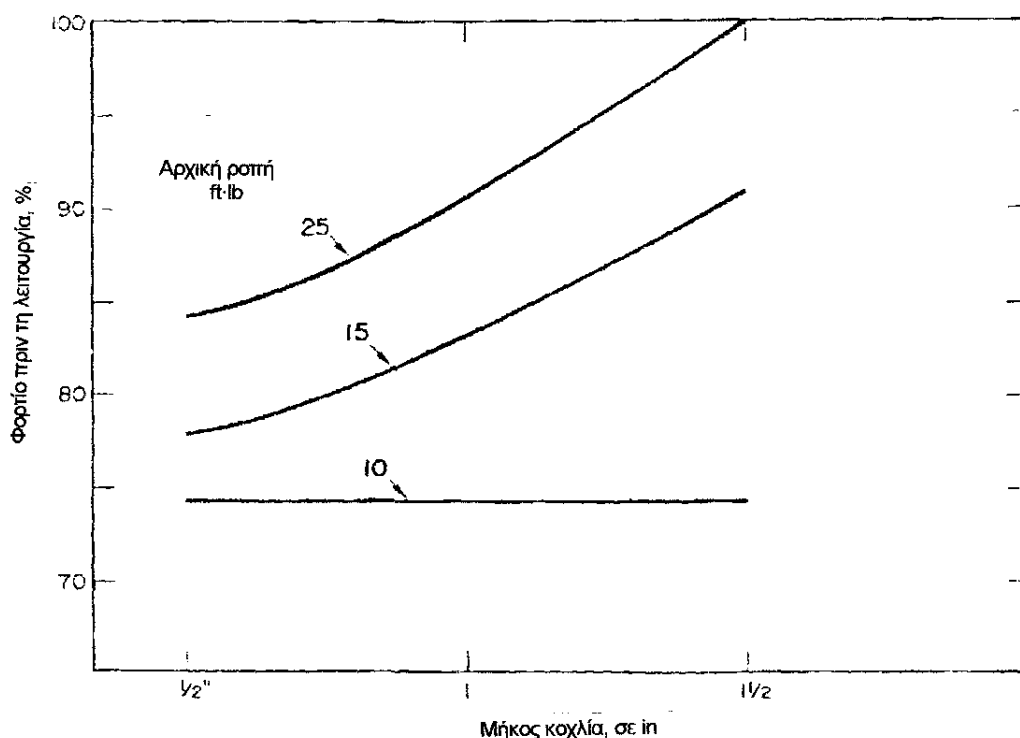
- 1) Περιοδικό μέτρημα των απότομων ροπών στρέψης με ένα κύριο εξάρτημα φόρτισης.
- 2) Έλεγχος σε μεγάλα δείγματα συνδέσμων για την κατάσταση των σπειρών, που λειτουργούν στο σημείο της εφαρμογής.
- 3) Συνεχής έλεγχος για να εξασφαλιστεί ότι κατά τη χρήση η ροπή στρέψης βρίσκεται μέσα και όχι έξω από απαιτούμενο εύρος.

Η μέθοδος σύσφιξης με την περιστροφή του περικοχλίου έχει μεγαλύτερη αποδοχή, ιδιαίτερα για επίπεδες συνδέσεις όπου το μέτρημα των τραβηγμάτων είναι δύσκολο.

Το στρίψιμο του κοχλία με κάμψη έχει γίνει μια γενικά αποδεκτή πρακτική για να λάβουμε τη μέγιστη δύναμη θλίψης. Αλλά κάτω από φόρτιση σε κόπωση το σοβαρό μειονέκτημα των αποτελεσμάτων των κρίκων καταπόνησης, που σημαίνει ότι ο κοχλίας δεν θα καταπονείται σε ένα ποσοστό μεγαλύτερο απ' ότι αν στρέφονταν στο πιο συμβατικό ποσοστό του 60-80% της κάμψης· αυτό το μεγαλύτερο ποσοστό λαμβάνεται σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Για στατικές εφαρμογές ή εφαρμογές με λίγους κύκλους, όπως τα κτίρια, αυτή η πρακτική μπορεί να μην είναι βλαβερή και μπορεί να γίνει γρήγορα και οικονομικά από αυτόματες μηχανές.

Η απώλεια του φορτίου συσφίξεως ή το λύσιμο γίνεται βασικά σε όλους τους κοχλιωτούς συνδέσμους σε οποιαδήποτε θερμοκρασία, της θέσης ή της περίσφιξης, της πιο ομαλής μέγιστης τιμής στο τέλος της επιφάνειας και για περισσότερο όγκο,

της τοπικής κάμψης στα υψηλά σημεία, ιδιαίτερα στις σπείρες. Ο βαθμός της απώλειας εξαρτάται από την ακρίβεια της ευθυγράμμισης και του τελειώματος της επιφάνειας. Οι δοκιμές έδειξαν ότι για σωστά στημένους συνδέσμους με ένα τελείωμα κάτω από τα 64 RMS, η απώλεια αυξάνεται ασυμπτωτικά στο 3-5% του αρχικού φορτίου συσφίξεως κατά τη διάρκεια των 10 πρώτων κύκλων της εφαρμοζόμενης τάσης. Το σχήμα 23 δείχνει την τυπική επίδραση της παραμέτρου του μήκους του κοχλίου. Συνεπώς υπάρχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στους λίγους κύκλους της «δοκιμαστικής» φόρτισης που ακολουθείται από την επανασύσφιξη.



Σχήμα 23: Μείωση του φορτίου συσφίξεως συναρτήσει του μήκους του κοχλίου.

1.5 Επίδρασεις της διαστασιολόνησης και της επέμβασης οπών

Παρά τις προσπάθειες σχεδιασμού συνδέσμων εφελκυσμού-τριβής με χρήση υλικών με μεγάλη αντοχή και μεγάλων δυνάμεων θλίψης, υπάρχουν πολύ συχνά καμπτικές τάσεις και όπως ελέχθη παραπάνω, μπορούν να γίνουν μεγάλες εξαιτίας ακραίων τιμών του k_t . Από τις μεθόδους μείωσης αυτών των τάσεων μια είναι

η γνώση της υπολειπόμενης θλίψης στην επιφάνεια της τρύπας. Οι επιδράσεις της «διαστασιολόγησης» και της «παρέκκλισης». Η υπολειπόμενη εφαπτομενική θλίψη απορροφά μέρος του εφαπτομενικού εφελκυσμού από το ενεργό φορτίο και συνεπώς αυξάνει τη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Αυτός ο τύπος του «φορτίου συσφίξεως» είναι ο αντίθετος του κοχλία που καταπονείται σε εφελκυσμό, όπου το φορτίο συσφίξεως και το ενεργό φορτίο προστίθενται στον εφελκυσμό. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης της τρύπας για μερικά δοκιμασμένα δείγματα που καταπονούνται σε εφελκυσμό με ανοικτές βρίσκονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5

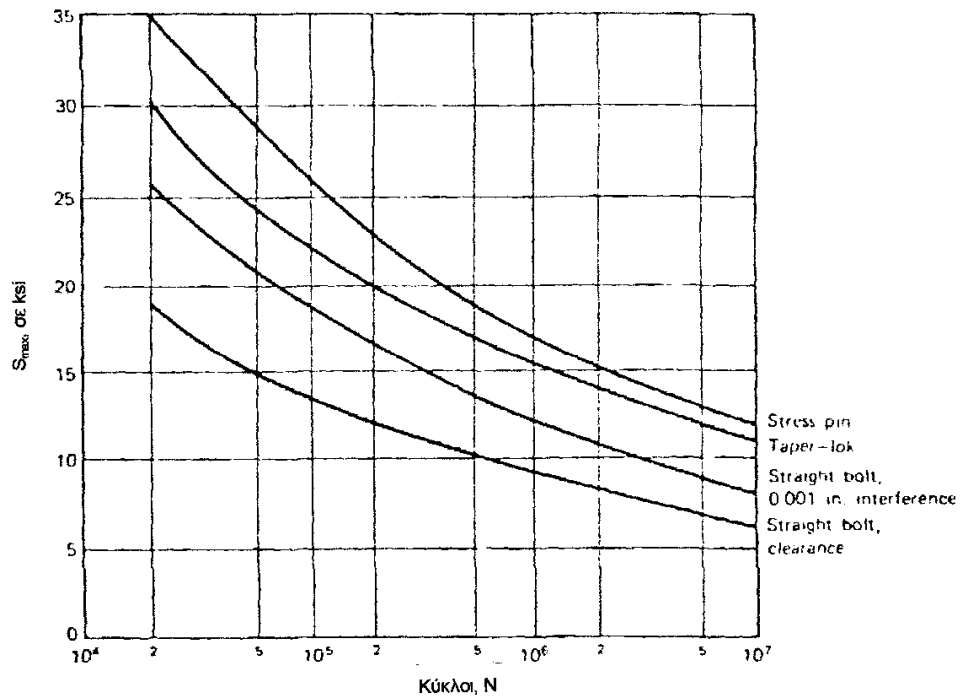
| Κατάσταση της οπής σε πλάκα από 7075-T6 κράμα αλουμινίου | Όριο κόπωσης σε 10^7 κύκλους |
|---|--------------------------------|
| Προδιαμορφωμένη οπή, διαμορφωμένο μέγεθος, σπασμένες άκρες | 8.5 |
| Όπως παραπάνω με ακρίβεια 0.0254mm ως 0.0508mm | 10.5 |
| Όπως παραπάνω με ακρίβεια 0.1270mm ως 0.1524mm | 13.5 |

Τέτοια αποτελέσματα δείχνουν αριθμητικά την αναμενόμενη τάση ότι η παρουσία υπολειπόμενης θλίψης (κάτω από την θλιπτική κάμψη) βελτιώνει το όριο σε κόπωση στον εφελκυσμό. Δοκιμές σε παρόμοια δείγματα έχοντας τις τρύπες κλεισμένες με έναν αυτόδιαστασιολόγητο κοχλία Huckbolt (επέμβαση από 0,0508mm ως 0,0762mm) έδωσαν ένα όριο σε κόπωση περίπου 1666kg/mm^2 και για τις τρεις καταστάσεις τις τρύπας. Ενώ τα πλεονεκτήματα από τη διαστασιολόγηση της τρύπας δεν αμφισβητούνται, είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί η κατάσταση λειτουργίας εξαιτίας της μεγάλης εξάρτησης της τιμής της υπολειπόμενης θλίψης σε διαστασιολογικές ανοχές ειδικά για μικρές διαμέτρους.

Η σχετικά μεγάλη αύξηση της ακτινικής θλίψης σε βάρος μιας μικρής αύξησης στον ακτινικό εφελκυσμό, είναι η βάση για τη βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση τέτοιων συνδέσμων, ιδιαίτερα αυτών που χρησιμοποιούν κοχλίες που καταλήγουν σε αιχμή. Τα τελευταία μας δίνουν ένα πιο ομοιόμορφο τρόπο στο να φέρουν τα φορτία στα στοιχεία του συνδέσμου απ' ότι στους κοχλίες επέμβασης με ευθύ άξονα. Το σχήμα 24 δίνει κάποια συγκρίσιμα δεδομένα για τη διάρκεια ζωής

αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα του Taper-lok είναι διαθέσιμα μόνο με ένα μεγαλύτερο κόστος της προετοιμασίας της τρύπας και με μεγαλύτερο κόστος του ίδιου του συνδέσμου.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ξεχωρίσουμε μεταξύ τους τις εκφράσεις των τάσεων για διαστασιολογημένες και μη τρύπες για κοχλία με ανοχή ή για σφικτό κοχλία και για την κατάσταση της κενής τρύπας. Δες πίνακα 6.



Σχήμα 24: Καμπύλες S-N για διάφορους συνδέσμους από τιτάνιο.

Πίνακας 6: Τάσεις στην επιφάνεια της οπής (κυρίως με εξωτερικό φορτίο).

| | Τάση | Οπή χωρίς διάσταση | Οπή με διάσταση |
|------------------------------------|-----------------|---|--|
| Ανοιχτή οπή | HT ^a | Μηδέν | Μικρή, εξαρτάται από τις διαστάσεις |
| | HC ^b | Μηδέν | Μηδέν |
| | RT ^c | Μηδέν | Μηδέν |
| | RC ^d | Μηδέν | Μικρή εξαρτάται από τη διάμετρο D |
| | LT ^e | Μηδέν | Μικρή εξαρτάται από τη διάμετρο D |
| | LC ^f | Μηδέν | Μηδέν |
| Με απευθείας χάρη κοχλία ή ροδέλας | HT | Μηδέν ή μεγαλύτερη αναλόγως το ταίριασμα | Μικρή εξαρτάται από τη διάμετρο D |
| | HC | Μηδέν | Μηδέν |
| | RT | Μηδέν | Μηδέν |
| | RC | Μηδέν ή μεγαλύτερη αναλόγως το ταίριασμα | Μικρή εξαρτάται από τη διάμετρο D |
| | LT | Μηδέν | Μηδέν |
| | LC | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης |
| Με απευθείας κοχλία | HT | Μεγαλύτερη, το ποσοστό εξαρτάται από το ταίριασμα | Μικρή αύξηση, εξαρτάται από την αρχική θλίψη |
| | HC | Μηδέν | Μειωμένη από την αρχική τιμή |
| | RT | Μηδέν | Μηδέν |
| | RC | Μεγαλύτερη, το ποσοστό εξαρτάται από το ταίριασμα | Αξιοσημείωτη αύξηση |
| | LT | Μηδέν | Μηδέν |
| | LC | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης |
| Με σκεπασμένο κοχλία | HT | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης | Μη εφαρμόσιμη |
| | HC | Μηδέν | Μη εφαρμόσιμη |
| | RT | Μηδέν | Μη εφαρμόσιμη |
| | RC | | Μη εφαρμόσιμη |
| | LT | Μηδέν | Μη εφαρμόσιμη |
| | LC | Εξαρτάται από τη δύναμη σύσφιξης | Μη εφαρμόσιμη |

ΌΠΟΥ: ^aHT=hoop tension ^cRT=radial tension ^eLT=longitudinal tension

^bHC=hoop compression ^dRC=radial compression ^fLC=longitudinal compression

1.6 Συγκεντρώσεις τάσεων σε κοχλίες και περικόχλια

Η συμπεριφορά σε κόπωση των κοχλιών και των περικοχλίων εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον έλεγχο των συγκεντρώσεων τάσεων. Η γενική γεωμετρία μιας συναρμογής κοχλία-περικοχλίου προσφέρει τρεις σαφείς θέσεις όπου η συγκέντρωση τάσης ή ο συντελεστής k_t είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη μονάδα: 1)στην τομή κεφαλής και άξονα, 2)στον τομέα τελειώματος των σπειρών και 3)στη ρίζα των σπειρών του άξονα και στο πρόσωπο του περικοχλίου. Στον πίνακα 7 δίνονται οι τυπικές τιμές του παράγοντα συγκέντρωσης τάσης για κοχλίες με κομμένες σπείρες και αντοχή εφελκυσμού κάτω από 7750kg/mm^2 (Grade 5 ή μικρότερος).

Πίνακας 7

| Τύπος σπειρώματος | Κάτω από τη κεφαλή | Τέλος σπειρώματος | Διάμετρος ρίζας σπειρώματος | k_t |
|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|-------|
| UNC ή UNF | 2.5 | 2.4 | 0.00254 | 6.0 |
| | | | 0.00508 | 4.8 |
| | | | 0.00764 | 3.9 |
| | | | 0.01016 | 3.4 |
| | | | 0.01270 | 3.1 |
| | | | 0.01524 | 2.8 |
| | | | 0.01778 | 2.7 |
| | | | 0.02032 | 2.5 |
| | | | 0.02286 | 2.4 |
| | | | 0.02540 | 2.3 |
| Whitworth-Sellers | 2.5 | 1.6 | --- | 3.3 |

Ο τύπος του σπειρώματος είναι συνεπώς ένας σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό του k_t , μία κατάσταση που τείνει να εξαλείψει τη σκέψη για κοχλιώσεις μεγάλης διάρκειας ζωής σε σπειρώματα τύπου Acme, Sellers και Whitworth. Η τυποποιημένη σπείρα των 60° είναι η βάση πάνω στην οποία έχει αναπτυχθεί οποιαδήποτε κοχλίωση μεγάλης αντοχής και διάρκειας ζωής. Η βασική αντοχή του κοχλία λαμβάνεται από τον συνδυασμό της έκθεσης και κατεργασίας σε υψηλή

θερμοκρασία και η διάρκεια ζωής σε κόπωση λαμβάνεται δείχνοντας προσοχή στη λεπτομέρεια του τύπου και άρα στους παράγοντες συγκέντρωσης τάσης. Οι συμβατικά κομμένες σπείρες έχουν στη ρίζα ένα παράγοντα συγκέντρωσης τάσης (k_t) περίπου 3,5 ως 5 κατά προσέγγιση, τείνοντας προς τη μεγαλύτερη τιμή αν κατεργαστεί σε υψηλή θερμοκρασία μετά το κόψιμο. Οι κοχλίες που έχουν κατασκευαστεί μ' αυτόν τον τρόπο δεν πρέπει να προορίζονται για εφαρμογές σε μεγάλη κόπωση. Για σπείρες που κατασκευάστηκαν εν θερμώ, ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης ή η ακτίνα στη ρίζα επηρεάζουν πραγματικά τη διάρκεια ζωής.

Μια πρόσφατη μελέτη έχει καθορίσει τη διάρκεια ζωής σε κόπωση των κοχλιώσεων σαν συνάρτηση της ακτίνας στη ρίζα και της αντοχής σε εφελκυσμό. Συνεπώς συνεισφέρουμε τις απαιτούμενες αριθμητικές τιμές για την υποστήριξη του αισθήματος ότι «όσο πιο μεγάλη είναι η ακτίνα τόσο το καλύτερο». Στον πίνακα 8 δίνονται αποτελέσματα διαφόρων δοκιμών από τα οποία παρατηρούνται τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου, κατασκευάζοντας δηλαδή τις σπείρες μετά από θερμική κατεργασία.

Το 75% αυτού του τύπου των σπειρών έδειξε μεγάλη διάρκεια ζωής στην κόπωση για κοχλίες από χάλυβα, αλλά ένα πρότυπο σχέδιο αυτού του τύπου είχε αυξήσει περαιτέρω τη διάρκεια ζωής ή επέτρεψε μεγαλύτερη φόρτιση σε μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής. Το σπείρωμα έχει κατασκευαστεί χωρίς συμμετρία αφαιρώντας 5° από τη πλευρά που φέρει τα φορτία και έτσι η συνολική γωνία γίνεται 55° . Μειώνεται επίσης η κλίση κατά $0,0635\text{mm/mm}$. Αυτές οι αλλαγές γίνονται μόνο στον κοχλία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κοχλίες 260 UTS, με αυτό το ειδικό σπείρωμα, υποδεικνύουν ένα όριο αντοχής περίπου 10850kg/mm^2 στους 10^6 κύκλους, που είναι ο καλύτερος συνδυασμός φορτίου και διάρκειας ζωής. Οι αντιπροσωπευτικές τιμές για τον επόμενο καλύτερο τύπο, δηλαδή για το κατά 75% συμμετρικό σπείρωμα, είναι μικρότερες περίπου 30%.

Πίνακας 8: Επίδραση της αύξησης της ακτίνας της ρίζας,

| Υλικό | Μέθοδος κατασκευής του σπειρώματος | Διάρκεια ζωής σε | | Αύξηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση (%) | Αύξηση της αντοχής εφελκυσμο ύ (%) |
|---|--|------------------------------------|-----------------|---|------------------------------------|
| | | κόπωση, σε 10 ³ κύκλους | | | |
| | | Σπείρωμα ρ/8 | Σπείρωμα 0.224ρ | | |
| 69.75kg/mm ² , χάλυβας χωρίς κατεργασία εν' θερμώ | Με κόψιμο | 30 | 55 | 80 | 4 |
| | Με έλαση | 50 | 325 | 650 | 1 |
| 124.00kg/mm ² , χάλυβας με κατεργασία εν' θερμώ | Με έλαση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 40 | 148 | 370 | 6 |
| 139.50kg/mm ² , χάλυβας με κατεργασία εν' θερμώ | Με κόψιμο πριν από κατεργασία εν' θερμώ | 20 | 24 | 120 | 3 |
| | Με έλαση πριν από κατεργασία εν' θερμώ | 20 | 48 | 240 | 7 |
| 139.50kg/mm ² , χάλυβας με κατεργασία εν' θερμώ | Με έλαση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 50 | 125 | 250 | 5 |
| 170.50kg/mm ² , χάλυβας με κατεργασία εν' θερμώ | Με έλαση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 40 | 1100 | 2800 | 6 |
| 201.50kg/mm ² , χάλυβας με κατεργασία εν' θερμώ | Με σφυρηλάτηση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 22 | 40 | 80 | 8 |
| | Με έλαση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 90 | 400 | 440 | 4 |
| 116.25kg/mm ² , τιτάνιο (4Al-4Mn) | Με έλαση μετά από κατεργασία εν' θερμώ | 60 | 430 | 720 | 12 |
| 108.50kg/mm ² , A- 286 χάλυβας | Με έλαση μετά από κατεργασία πριν από τη σκλήρυνση | 20 | 44 | 220 | 9 |

Ο τομέας μεταξύ κεφαλής-άξονα είναι μια άλλη κρίσιμη περιοχή για ρωγμές από κόπωση, έτσι ώστε το μέγεθος και το σχήμα του σημείου αυτού να είναι πολύ σημαντικό. Η ακτίνα του σημείου αυτού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Οι δοκιμές έχουν δείξει μια αύξηση κατά 7 φορές στη διάρκεια ζωής αλλάζοντας την ακτίνα με μια «κοφτερή» γωνία σε 0,96mm. Τα κυκλικά σπασίματα είναι τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα και είναι σχετικά απλά στην κατασκευή τους, αλλά θα πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός της ακτίνας και της περιοχής που φέρει τα φορτία. Μια πιο αποτελεσματική διαστασιολόγηση των σπασιμάτων των γωνιών χωρίς απώλεια της περιοχής που φέρει τα φορτία κάτω από τη κεφαλή μπορεί να γίνει με ελλειπτικά ή σύνθετα προφίλ. Η αντίσταση σε κόπωση του σπασίματος βελτιώνεται αρκετά με κατεργασία εν ψυχρώ ή με προηγούμενη συμπίεση· σε μια δοκιμή ο αριθμός των κύκλων αυξήθηκε από 7×10^5 στους 8×10^6 .

Κεφάλαιο 2

2.0 Υποδοχές ή άγκιστρα

Ο σύνδεσμος ή η υποδοχή ενός σκέλους αντιπροσωπεύει έναν απλό τύπο του κοχλιωτού συνδέσμου και η αντοχή του σε κόπωση μπορεί κάλλιστα να ελέγχει τη συμπεριφορά σε κόπωση ολόκληρης της κατασκευής. Παρά την προφανή απλότητα στη γεωμετρία των σχημάτων των υποδοχών, ο συσχετισμός θεωρίας και δεδομένων είναι αναποτελεσματικός στο σχεδιασμό μέχρις ότου ο Heywood ανέπτυξε την ακόλουθη διαδικασία που βασίζεται σε μια στάνταρτ υποδοχή με διάμετρο τρύπας 25,4mm και $k_t=3$.

Έχει παρατηρηθεί από δεδομένα ότι η αντοχή σε κόπωση μιας συναρμογής με υποδοχή είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτή των υλικών. Για την αστοχία ατσάλινων υποδοχών στους 10^7 κύκλους η S_a είναι μόνο $\pm 4\%$ της αντοχής σε εφελκυσμό και για αλουμίνιο μεγάλης αντοχής μόνο $\pm 2,5\%$. Αυτή η κατάσταση σημειώνει το θεωρητικό παράγοντα συγκέντρωσης τάσης, ως την πρωταρχική επίδραση στην διάρκεια ζωής σε κόπωση. Ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης ορίζεται σαν ο λόγος της μέγιστης τάσης προς τη μέση τάση στην περιοχή της ελάχιστης διατομής της τρύπας:

$$k_t = \frac{\sigma_{\max}}{P / (D - d) \cdot t} \quad (\text{Σχέση 27})$$

Θεωρώντας το k_t σαν παράγοντα γεωμετρίας σημειώνουμε ότι όσο το D/d τείνει στη μονάδα, η υποδοχή τείνει να δρα σαν ένα εύκαμπτο λουρί γύρω από το κοχλία, μειώνοντας συνεπώς τον παράγοντα συγκέντρωσης τάσης προς τη μονάδα. Ένα άμεσο πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά είναι αυτό του καθορισμού της έσχατης αντοχής των υποδοχών για ένα δεδομένο συνολικό πλάτος.

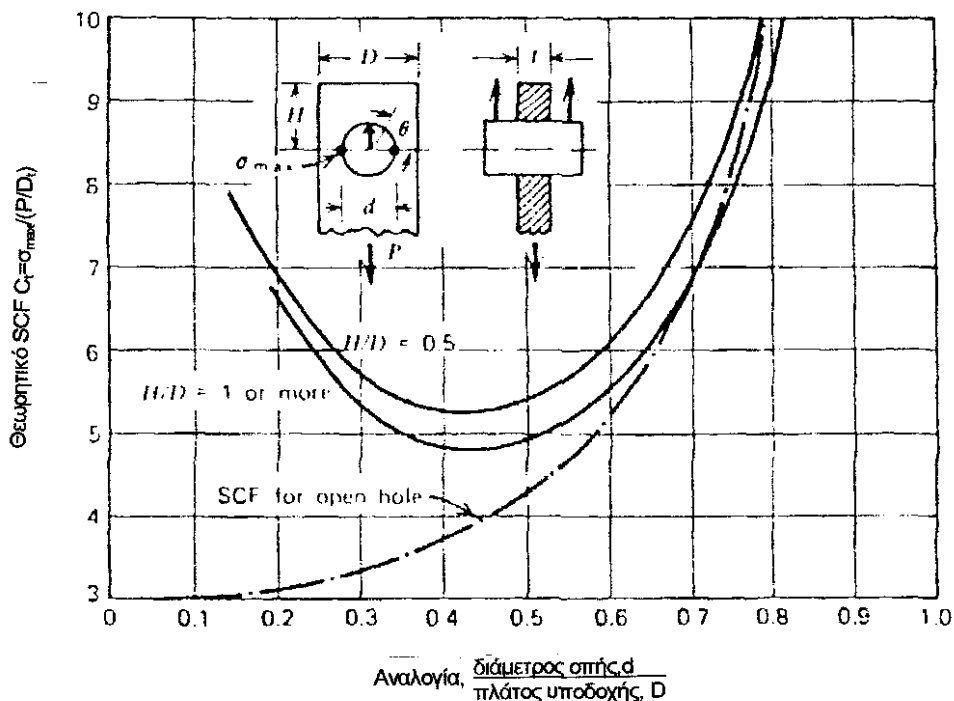
Ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης γι' αυτή τη κατάσταση μπορεί να οριστεί με διαφορετικό τρόπο ως ο λόγος της μέγιστης τάσης προς τη μέση τάση που δρα σε ολόκληρη τη διατομή:

$$C_t = \frac{k_t}{1 - \frac{d}{D}} = \frac{\sigma_{\max}}{P / (D \cdot t)} \quad (\text{Σχέση 28})$$

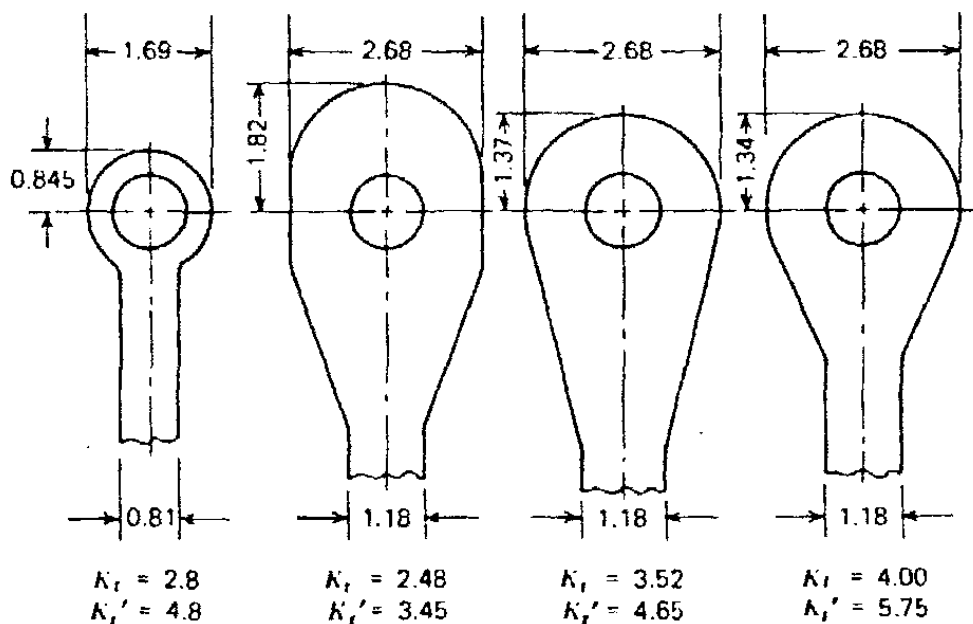
Οι καμπύλες στο σχήμα 25 δείχνουν ένα d/D περίπου 0,4, υποδεικνύοντας έναν ελάχιστο παράγοντα συγκέντρωσης τάσης ή μια μέγιστη αντοχή σ' αυτή την αναλογία.

Ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης μπορεί να επηρεάζεται από έναν αριθμό άλλων παραμέτρων όπως: 1)η επίδραση της «σπάταλης» υποδοχής (υποδοχή με περίσσιο υλικό γύρω της) όπως φαίνεται στο σχήμα 26, 2)κάμψη κοχλία, 3)η κατανομή της τάσης γύρω από την τρύπα και 4)το υλικό και το λιπαντικό του κοχλία.

Η επίδραση της κάμψης και της διάτμησης του κοχλία είναι για την αύξηση της μέγιστης τάσης κοντά στα πρόσωπα των υποδοχών. Η αύξηση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του κοχλία συγκρινόμενος με το πάχος υποδοχής d/t . Φωτοελαστικά πειράματα έδειξαν ότι η αύξηση είναι αρκετά μικρή. Για μια υποδοχή που το τελείωμα της είναι ημικυκλικό και που έχει αναλογίες μήκους προς πλάτος H/D περίπου 0,5 και μια διάμετρο κοχλία προς το πλάτος d/D περίπου $1/3$, τα αποτελέσματα λήφθηκαν από τον πίνακα 9. Έτσι αποδεικνύεται η μικρή επίδραση του καμπτόμενου κοχλία στην κόπωση.



Σχήμα 25: Θεωρητικοί παράγοντες συγκέντρωσης τάσης για φορτισμένες υποδοχές βασισμένοι στην περιοχή μεγέθους της υποδοχής.



Σχήμα 26: Παράγοντες συγκέντρωσης τάσης για υποδοχές «σπατάλης».

Πίνακας 9

| | | | |
|---|------|------|------|
| Αναλογία d/t | 0,51 | 0,72 | 1,27 |
| Αύξηση της μέγιστης τάσης (από διάτμηση) % | 17 | 10 | 7,5 |

Για μια παχιά υποδοχή είναι πλεονέκτημα να χρησιμοποιήσουμε έναν κοχλία μεγάλης διαμέτρου και συστήνεται ότι η βέλτιστη αντοχή λαμβάνεται όταν η αναλογία της διαμέτρου του κοχλία προς το πλάτος της υποδοχής d/D είναι περίπου 0,6.

Οι μεγαλύτεροι παράγοντες συγκέντρωσης τάσης παρουσιάζονται όταν υπάρχει μεγαλύτερο διάκενο μεταξύ του κοχλία και της τρύπας. Τα δεδομένα δείχνουν ότι ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης δεν εξαρτάται μόνο από το διάκενο, αλλά και από το μέγεθος των εφαρμοζόμενων φορτίων, έχοντας μείωση του παράγοντα με την αύξηση των φορτίων. Τα σημεία της μέγιστης τάσης μετατοπίζονται από τη συνήθη θέση τους στην εγκάρσια διάμετρο για ένα κοχλία σχολαστικά προσαρμοσμένο προς τη πλευρά που φέρει τα φορτία. Η επίδραση του διακένου μπορεί να αποδοθεί σε μια κίνηση των πλευρών της υποδοχής προς το εσωτερικό, όταν αυτή δεν περιορίζεται από τον κοχλία. Οι φωτοελαστικοί έλεγχοι της μέγιστης διατμητικής τάσης στα όρια της τρύπας (στην εγκάρσια διάμετρο), έδειξαν

ότι η επέμβαση μειώνει το ποσοστό της αύξησης της τάσης με φορτίο, για μικρές τιμές φορτίου, αλλά δίνει το φυσιολογικό ποσοστό για τα μεγαλύτερα φορτία, όπως θα είχαμε σε μια περίπτωση που ο κοχλίας θα έπρεπε να πιεστεί για να εισέλθει μέσα στην τρύπα. Συνεπώς ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης δεν είναι σταθερός για μια δεδομένη επέμβαση αλλά ποικίλει από το φορτίο του κοχλίου. Η κατανομή της διατμητικής τάσης γύρω από την τρύπα δεν είναι σταθερή και έχει βρεθεί ότι το μέγιστο σημείο βρίσκεται στις 30° στην εγκάρσια διάμετρο από την πλευρά φόρτισης του κοχλίου (γωνία θ στο σχήμα 25· δεξ επίσης το σχήμα 17). Για συναρμογές συσφίξεως από 0,08mm ως 0,16mm η μέγιστη διατμητική τάση βρίσκεται πολύ κοντά στην εγκάρσια διάμετρο (θ~0°). Ο ακτινικός εφελκυσμός κατανέμεται πιο συμμετρικά, με τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται στην εγκάρσια διάμετρο. Εφαρμόζοντας το μέγιστο φορτίο του κοχλίου, αυτό το μέγιστο μπορεί να μειωθεί ουσιαστικά, αυξάνοντας την αρνητική χάρη.

Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης μπορεί να μειωθεί περίπου κατά 0,25 χρησιμοποιώντας ένα λιπαντικό με μεγάλη αντοχή για μικρά πάχη, όπως το λάδι κολλοειδούς γραφίτη. Μπορεί να γίνει και μια περαιτέρω μείωση της τάξης του 0,30 αντικαθιστώντας ένα αλουμινένιο κοχλίο με ένα χαλύβδινο στην περίπτωση μιας αλουμινένιας υποδοχής στην οποία οι επιδράσεις της κάμψης του κοχλίου είναι αμελητέες. Ακόμη και με καλή λίπανση υπάρχει πάντα λίγη φθορά και γι' αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ένας παράγοντας (1+d)·β για να μετρήσουμε την υπολειπόμενη αύξηση στον παράγοντα συγκέντρωσης τάσης.

Μια περιεκτική ανάλυση δεδομένων από δοκιμές πολλών τύπων υποδοχών κάτω από διάφορες καταστάσεις, είχαν σαν αποτέλεσμα να δώσουν εκφράσεις για τη συμπεριφορά σε κόπωση σε σχέση με τους παράγοντες μείωσης της αντοχής:

$$k_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_{mn}} = k_s + (k_t - k_s) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{mn} + \sigma_{an}}{\sigma_{in}} \right)^2 \quad (\text{Σχέση 29})$$

και
$$k_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{an}} = k_s + [\beta \cdot (1 + d) - k_s] \cdot \frac{n^4}{b + n^4} \quad (\text{Σχέση 30})$$

όπου: k_m, k_a = οι μέγιστες τιμές των παραγόντων μείωσης της αντοχής για 10^7 κύκλους ή και περισσότερους.

σ_m = η κύρια τάση, δοκίμιο χωρίς εγχοπές.

σ_{mn} = η κύρια τάση, δοκίμιο με εγχοπές.

k_s = ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης, εδώ είναι 1.

d= η διάμετρος της τρύπας σε mm.

b= μια σταθερά περίπου 1000.

β=μια σταθερά περίπου 2,7 για χάλυβα και 1,85 για αλουμίνιο.

Και οι δύο εκφράσεις εφαρμόζονται για δοκίμια με εγκοπές αλλά η σχέση 30 είναι τροποποιημένη έτσι ώστε να περιέχει το μέγιστο παράγοντα συγκέντρωσης τάσης στον όρο $\beta(1+d) \cdot k_t$, που είναι η επίδραση του παράγοντα της φθοράς.

Έχει γίνει ένας συσχετισμός μεταφράζοντας τα διάφορα αποτελέσματα για διαφορετικά σχέδια σε μια τυποποιημένη κατάσταση με $k_t=3$, αντιπροσωπεύοντας ένα σχέδιο κοντά στη βέλτιστη αντοχή και με διάμετρο τρύπας 25,4mm. Οι τυποποιημένες σ_{an} και σ_{mn} αποκομίζονται από τις σ_{an} και σ_{mn} οποιασδήποτε υποδοχής από τις σχέσεις 29 και 30, για την κατάσταση ισότητας μεταξύ της μέγιστης τιμής των σ_{an} και σ_{mn} . Υποτίθεται επίσης ότι ο παράγοντας συγκέντρωσης στατικής τάσης, k_s , ισούται με 1 οδηγώντας στη σχέση:

$$\frac{\sigma'_{mn}}{\sigma'_t} = \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_t} \cdot \left\{ \frac{1 + (k_t - 1) \cdot [1 - (\sigma_{mn} + \sigma_{an})/\sigma]^2}{1 + 2 \cdot [1 - (\sigma'_{mn} + \sigma'_{an})/\sigma'_t]} \right\} \quad (\text{Σχέση 31})$$

και

$$\frac{\sigma'_{mn}}{\sigma'_t} = \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_t} \cdot \left[\frac{1000 + k_t \cdot (1 + d) \cdot \beta \cdot n^4}{1000 + 6 \cdot \beta \cdot n^4} \right] \quad (\text{Σχέση 32})$$

όπου: σ'_{mn} = η τυποποιημένη κύρια τάση για $k_t=3$ και $d=25,4\text{mm}$.

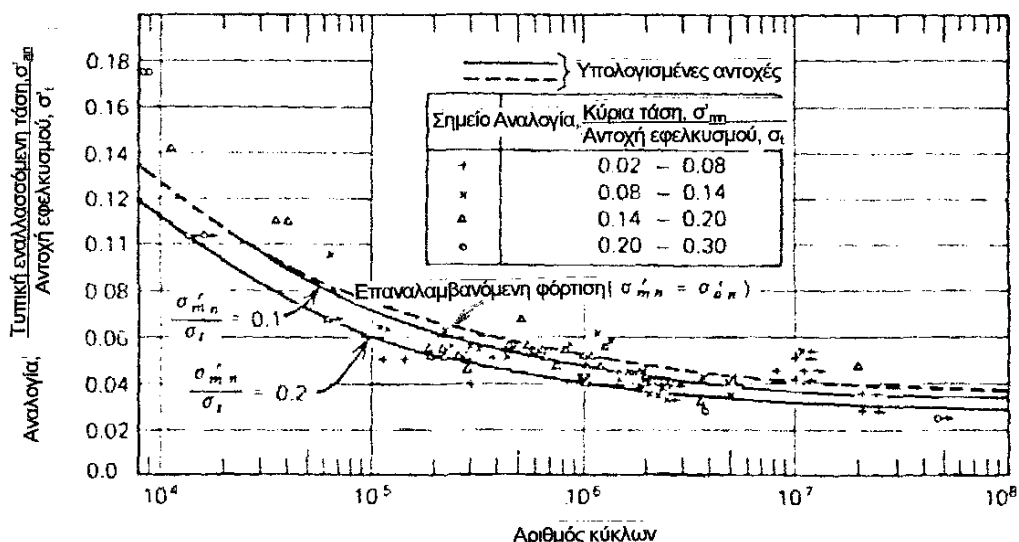
σ'_{an} = η εναλλασσόμενη κύρια τάση για $k_t=3$ και $d=25,4\text{mm}$.

σ'_t = η αντοχή εφελκυσμού.

$n = \log N$.

Τα αποτελέσματα έχουν τοποθετηθεί σε μια γραφική παράσταση συναρτήσεως του λόγου σ'_{an}/σ'_t για τους χάλυβες, στο σχήμα 27.

Σχεδιάζοντας μια υποδοχή για να έχει μια δεδομένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, η πιο απλή διαδικασία είναι να αρχίσουμε από το σχήμα 27 και να λάβουμε υπόψη την υποδεικνυόμενη ακτίνα διασποράς. Αυτές οι καμπύλες μας δείχνουν το μέγεθος της τυποποιημένης εναλλασσόμενης τάσης σ'_{an} , η οποία θα λαμβάνονταν για οποιαδήποτε δεδομένο αριθμό κύκλων. Αυτή η τάση θα μπορούσε τότε να μεταφραστεί σε μια εναλλασσόμενη τάση για την υπό μελέτη υποδοχή με αντικατάσταση στη σχέση 32. Σπανίως χρειάζεται μια μείωση της κύριας τάσης όταν $\sigma_{mn} > \sigma_{an}$, αλλά αν δεν συμβαίνει αυτό τότε κάνουμε αντικατάσταση στη σχέση 31.



Σχήμα 27: Αντοχή σε κόπωση ατσαλένιων υποδοχών ως παράγοντας της κύριας τάσης.

Η χρησιμοποίηση υποδοχών μεγάλου πλάτους δεν ενδείκνυται, και πιο συγκεκριμένα μεγαλύτερες από τη διάμετρο της οπής, καθώς η αντοχή σπάνια επηρεάζεται από τις επιδράσεις της κάμψης του κοχλία. Συνεπώς, η διάμετρος του κοχλία θα έπρεπε να ξεπεράσει τα 12,7mm. Το βάρος της υποδοχής πιθανώς εξαρτάται από την περιοχή D_t , και γι' αυτή τη περίπτωση τα παραπάνω σχήματα δείχνουν ότι η μικρότερη διάμετρος του κοχλία δίνει το μικρότερο βάρος. Το καλύτερο σχέδιο συνεπώς αντιπροσωπεύεται κατά προσέγγιση από τις διαστάσεις με διάμετρο κοχλία 12,7mm. Όλες οι υποδοχές στον πίνακα 10 θα έπρεπε να έχουν ίσες αντοχές και είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η ονομαστική τάση σ_{an} ποικίλει με το μέγεθος του κοχλία, αφού η επίδραση του μεγέθους περιλαμβάνεται στη σχέση 30.

Πίνακας 10

| | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| d | 6.35 | 12.70 | 19.05 | 25.40 |
| T | 19.30 | 11.18 | 8.64 | 7.37 |
| D | 15.98 | 31.75 | 47.50 | 63.50 |
| Περιοχή D_t | 303.22 | 361.29 | 412.90 | 464.52 |
| $\sigma_{an}=5/(D-d) \cdot t$, σε kg/mm ² | 1.36 | 1.16 | 1.02 | 0.90 |
| Τάση κάμψης (μέγιστη)= $10/d \cdot t$, σε kg/mm ² | 4.11 | 3.49 | 3.02 | 2.71 |

2.1 Χρήση αντιτριβικών δακτυλίων

Από πλευράς μελέτης σε κόπωση ο σύνδεσμος κοχλία-αντιτριβικού δακτυλίου δύσκολα είναι ισοδύναμος με ένα κοχλία της εξωτερικής διαμέτρου της του αντιτριβικού δακτυλίου όταν υπάρχει διάκενο στην εξωτερική διάμετρο του. Για υποδοχές με αντιτριβικούς δακτυλίους που εφαρμόζουν με παρεμβολή (0.08mm – 0,16mm ανά mm διαμέτρου), οι δοκιμές έδειξαν σταθερά μεγαλύτερες διάρκειες ζωής από κοχλίες που εφαρμόζουν με παρεμβολή μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερη.

2.2 Κοχλίες που εφαρμόζουν με παρεμβολή

Οι κοχλίες που εφαρμόζουν με παρεμβολή εμφανίζουν μεγαλύτερες διάρκειες ζωής από της κοχλίες που έχουν χάρη. Συνήθως μπορούμε να μην έχουμε αστοχία της 10^7 κύκλους για όλους της αλουμινένιους συνδυασμούς κοχλία-υποδοχής με αρνητική χάρη τουλάχιστον 0,1mm ανά mm διαμέτρου το ελάχιστο.

2.3 Καταστάσεις επιφάνειας οπής

Αυτές οι καταστάσεις εμφανίζονται να έχουν κατά προσέγγιση την ίδια επίδραση στη διάρκεια ζωής και στην αντοχή της υποδοχής της και της κοχλιωτούς συνδέσμους, αλλά η διασπορά και της δύο διάρκειες ζωής, αλλά και της δύο αντοχές είναι πολύ μεγαλύτερη. Γενικά χρειάζεται ένα λιπαντικό. Οι οπές για υποδοχές από χάλυβα που έχουν ανοιχτεί με τρυπάνι είναι ανώτερες από αυτές που έχουν τورνευτεί και το αντίθετο ισχύει για το αλουμίνιο. Η οξειδωση με ανοδική επεξεργασία της οπής της αλουμινένιες υποδοχές είναι κάπως βλαβερή για τη διάρκεια ζωής αλλά δεν επηρεάζει πολύ τη στατική αντοχή. Η επιμετάλλωση με κάδμιο ή ψευδάργυρο προσφέρει κάποια βελτίωση της διάρκειας ζωής του κοχλία, αλλά έχουμε περισσότερη βελτίωση με επιμετάλλωση και του κοχλία και της υποδοχής, ιδιαίτερα με τον ψευδάργυρο. Μικρές δειγματοληπτικές δοκιμές υποδεικνύουν ότι η επιμετάλλωση με χρώμιο μπορεί να είναι πολλή βλαβερή. Ενώ αυτές οι αναφορές μπορεί να είναι άχρηστες ποιοτικά, οι απόπειρες συσχετισμού σύγχρονων δεδομένων δεν αποδίδουν πιο αυστηρά συμπεράσματα. Τα σχέδια βέλτιστης

γεωμετρίας και ελαχίστων παραγόντων συγκέντρωσης τάσης, μαζί με αντιτριβικούς δακτυλίους που μπαίνουν με παρεμβολή, είναι η καλύτερη προσέγγιση για μεγάλη διάρκεια ζωής.

Κεφάλαιο 3

3.0 Σύνδεσμοι με πείρους

Ο σχεδιασμός των εφαπτόμενων συναρμογών και των συνδέσμων με διάκενο βασίζεται αναγκαία στην αναλογία εφελκυσμού-διάτμησης, η τιμή της οποίας μπορεί να ποικίλει ευρέως. Οι σύνδεσμοι με πείρους σπάνια σχεδιάζονται ώστε να φέρουν οποιοδήποτε συγκεκριμένο μέρος του φορτίου της πλάκας από την τριβή που προκαλείται από τον εφελκυσμό στον οδηγούμενο πείρο, γιατί είναι βασικά αδύνατο να καθορίσεις αυτή την εφελκυστική δύναμη. Οι μετρήσεις της εφελκυστικής δύναμης σε ασαλένιους πείρους που τοποθετούνται εν θερμώ, υποδεικνύουν μεγάλη σταθερότητα και όπως είναι αναμενόμενο έχουμε μια αυξανόμενη δύναμη αυξανόμενου του σφιξίματος. Η «κατάλληλη» δύναμη συσφίξεως ή εφελκυσμού στον τοποθετημένο πείρο συνήθως λαμβάνεται με δοκιμές σε αποθηκευμένα τεμάχια με σωστά διαστασιολογημένους πείρους για να καθοριστεί μια κατάλληλη δύναμη τοποθέτησης. Οι πείροι φυσικά καταπονούνται σε εφελκυσμό και με εφαρμογή συντηρητικής κρίσης στον παρακάτω τύπο περιορισμών, συνήθως έχουμε επιτυχία.

- 1) Ο εφελκυσμός στους πείρους θα έπρεπε να περιορίζεται σε συνθήκες στις οποίες το φορτίο εφελκυσμού είναι δευτερεύον σε σχέση με το φορτίο που φέρει ο πείρος (διατμητικό). Όταν είναι δύσκολο να καθοριστεί αν η συνιστώσα εφελκυσμού είναι δευτερεύουσα ή κύρια θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας κοχλίας. Η ικανότητα φόρτισης ενός πείρου σε εφελκυσμό είναι:

$$B_{ult}=A \cdot S_{ult}$$

όπου: A είναι η περιοχή που δεν περιέχει τους πείρους και η S_{ult} συνήθως λαμβάνεται $46,50\text{kg/mm}^2$ για A502 Gr1 και $62,00\text{kg/mm}^2$ για Gr2 πείρους.

- 2) Η αναλογία της διατμητικής προς την εφελκυστική αντοχή για τους πείρους είναι περίπου 0,75 και είναι ανεξάρτητη από το βαθμό του πείρου (για χάλυβες), τη διάμετρο, το μήκος σύσφιξης και τη διαδικασία τοποθέτησης.
- 3) Οι πείροι που φορτίζονται και σε διάτμηση και σε εφελκυσμό θα πρέπει να ελέγχονται για συνδυαζόμενες τάσεις χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\frac{x^2}{0.75^2} + y^2 = 1$$

όπου x είναι η αναλογία της διαμητικής τάσης στην επιφάνεια που καταπονείται σε διάτμηση προς την αντοχή εφελκυσμού.

- 4) Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος αριθμός πείρων για να εξασφαλίσουμε ότι η αστοχία ενός πείρου, εξαιτίας ακατάλληλης εγκατάστασης ή κομμένης κεφαλής δεν θα έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία ολόκληρης της κατασκευής.
- 5) Αν δεν υπάρχει αντιστρεφόμενο φορτίο στη συναρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι επιτρεπόμενες τιμές. Αν υπάρχει αντιστρεφόμενο φορτίο στη συναρμογή, το εφελκυστικό φορτίο στον πείρο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 25% των τιμών στους πίνακες. Οι επιτρεπόμενες τιμές σε εφελκυσμό δεν τροποποιήθηκαν, όπως στη διάτμηση και έτσι είναι αναγκαίο η πρακτική σχεδιασμού να είναι ίδια με το δοκιμαστικό σύνδεσμο.
- 6) Να μην χρησιμοποιούνται πείροι για το δέσιμο προβόλων αεροσκαφών σε μια κατασκευή υποστήριξης.

Τα ακόλουθα είναι παραδείγματα συνδέσμων στους οποίους οι πείροι θεωρούνται ικανοί για εφελκυστική φόρτιση:

- 1) Επιφανειακές συνδέσεις σε νεύρα και πλαίσια.
- 2) Συνδέσεις φύλλων σε φλάντζες και εντατήρες δοκαριών όπου η κάμψη μέσα στον πείρο ή το διαγώνιο τσαλάκωμα των φύλλων προκαλεί εφελκυστικά φορτία στους πείρους.
- 3) Επιφανειακές συνδέσεις σε μια καταπονούμενη άτρακτο ή σώμα.

Για συμβατικούς συνδέσμους, το φορτίο λαμβάνεται κυρίως από τη διάτμηση στους πείρους και αυτή η κατάσταση είναι που κάνει το σύνδεσμο τόσο ευαίσθητο στις συγκεντρώσεις τάσεων στο φύλλο. Όπως σημειώθηκε νωρίτερα οι τιμές του k_t για μη κυκλικές τρύπες μπορούν να αυξηθούν εύκολα ως το 20. Τα αποτελέσματα αξονικών δοκιμών σε κόπωση, συνδέσμων ενωμένων με κρούση σε αλουμίνιο υποδεικνύουν ότι με τη μικρότερη τάση και σε μεγαλύτερα επίπεδα διάρκειας ζωής η αστοχία είναι πιο συχνή στο φύλλο. Η αστοχία προκαλείται από εφελκυστικές ρωγμές αρχίζοντας από συγκεντρώσεις τάσεων στις επιφάνειες των οπών. Στη μεγαλύτερη τάση και μικρότερη διάρκεια ζωής, η αστοχία μπορεί να οφείλεται είτε στη διάτμηση του πείρου είτε σπάσιμο του φύλλου, ενώ σε στατικές δοκιμές ο συνήθης τύπος της αστοχίας είναι η διάτμηση του πείρου. Αυτές οι καταστάσεις δίνουν έμφαση στο ότι οι

συγκεντρώσεις τάσεων γενικά επιδρούν πιο πολύ στις μικρές τάσεις και τους πολλούς κύκλους.

Η επίδραση της κύριας τάσης δεν έχει καθοριστεί ακόμα αυστηρά. Η μόνη γενίκευση που φαίνεται δυνατή είναι ότι οι σύνδεσμοι με πείρους φαίνονται λιγότερο ευαίσθητοι στην κύρια τάση απ' ό,τι το υλικό του φύλλου. Οι σύνδεσμοι που είναι διπλά στερεωμένοι έχουν κάπως μεγαλύτερη ποικιλία στη διάρκεια ζωής σε σχέση με την κύρια τάση απ' ό,τι οι σύνδεσμοι με διάκενα, αλλά σε οποιαδήποτε περίπτωση η έλλειψη μιας λειτουργικής σχέσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των τοπικών τάσεων μέχρι τη κάμψη κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων. Η τοπική τάση ελέγχει τη διάρκεια ζωής, αφού η αλλαγή στην κύρια τάση δεν μεταβάλλει την τοπική τάση αξιοσημείωτα. Η τιμή της κύριας τάσης γίνεται σχετικά σημαντική.

Οι αποστάσεις μεταξύ των πείρων έχουν εξεταστεί σαν παράγοντας στην αντοχή σε κόπωση του συνδέσμου και μπορούν να γίνουν κάποιες γενικεύσεις:

- 1) Για συνδέσμους σε μια σειρά (τρεις πείροι στη σειρά) η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται με τη μείωση του βήματος.
- 2) Για συνδέσμους τριών σειρών (ένας πείρος στη σειρά) η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται με αυξανόμενο το διάστημα μεταξύ των σειρών.
- 3) Για συνδέσμους πολλαπλών σειρών (τρεις πείροι στη σειρά) η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σειρών.

Πίνακας 11: Αντοχή σε κόπωση συνδέσμων με πείρους κράμα αλουμινίου 2024-T3.

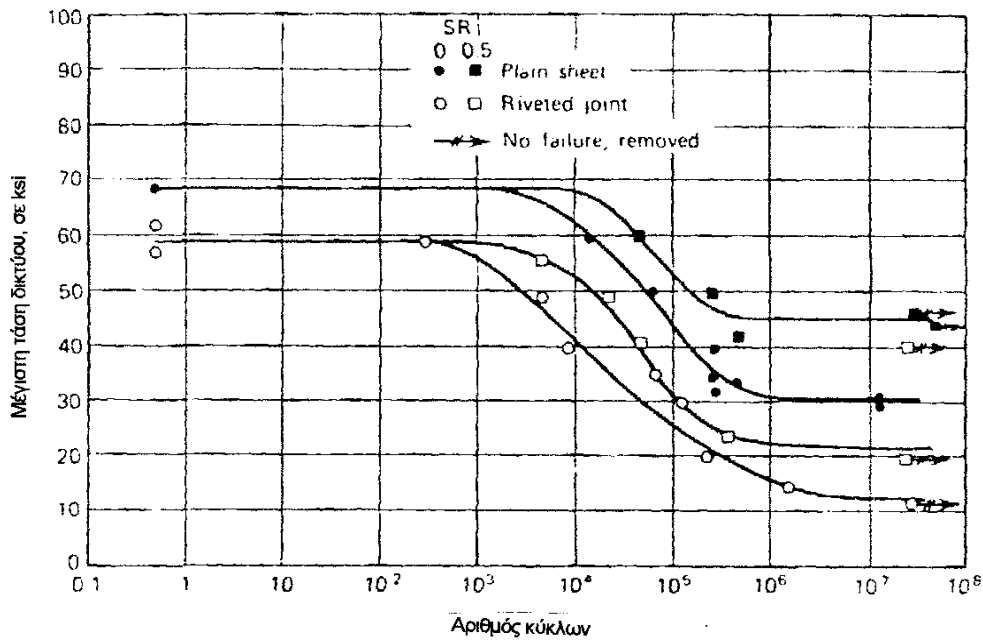
| Αριθμός σειρών | Απόσταση μεταξύ των σειρών | | Θέση πείρου | Μέση στατική αντοχή, kg/πείρο | Αντοχή σε κόπωση (μέγιστο φορτίο), kg/πείρο | |
|-------------------|----------------------------------|----------|-------------|--|--|------------------------|
| | | | | | 10 ⁵ κύκλοι | 10 ⁷ κύκλοι |
| 1 | --- | --- | | 346.0 | 141.0 | 85.0 |
| 2 | 4.8 | Χιαστί | | 334.0 | 111.0 | 78.0 |
| 3 | 9.6 | Χιαστί | | 345.0 | 133.0 | 66.5 |
| 4 | 17.5 | Χιαστί | | 352.5 | 145.0 | 68.5 |
| 5 | 19.2 | Σε σειρά | | 362.5 | 144.0 | 67.5 |

Το διαφορετικό τελείωμα της επιφάνειας της τρύπας έχει λίγη επίδραση στη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Οι σύνδεσμοι με πείρους με επίπεδες κεφαλές έχουν γενικά χειρότερη συμπεριφορά σε κόπωση απ' ό τι οι σύνδεσμοι με προεξέχουσες κεφαλές. Σε δοκιμές αξονικού εφελκυσμού που έγιναν σε δοκίμιο από 7075-T6 Alclad 4,8mm με διευρυμένες οπές, κατασκευάστηκε μια γραφική παράσταση για τη διάρκεια ζωής, από 1000 ως 6000 κύκλους σε συνάρτηση με την αναλογία της απόστασης της άκρης προς τη διάμετρο της οπής. Είχαμε μια διάρκεια ζωής για επίπεδες οπές τουλάχιστον διπλάσια από τις διευρυμένες οπές, σε οποιαδήποτε τιμή του E/D μεταξύ 1,0 και 2,0. Μια φωτοτασική μελέτη των συγκεντρώσεων τάσης σε διάφορα σημεία στην επιφάνεια των διευρυμένων οπών είχε σαν αποτέλεσμα ο k_t στη βάση της διεύρυνσης (κώνος) να είναι 13-23% μεγαλύτερος από το συντελεστή k_t για την επίπεδη οπή, με τις τιμές του να βρίσκονται μεταξύ 2,7 και 3,2. Έχει αναπτυχθεί μια σχέση για τη συνολική επίδραση του k_t γι' αυτή τη γεωμετρία:

$$k_t = 1 + \frac{(k_{t_1} - 1) \cdot (k_{t_2} - 1) \cdot (k_{t_3} - 1)}{4}$$

Οι λεπτομερείς διαστάσεις της οπής είναι σημαντικές για την διάρκεια ζωής του συνδέσμου, ειδικότερα στο πάνω φύλλο. Ο κώνος δεν θα πρέπει να εκτείνεται ποτέ διαμέσου του φύλλου για να παράγει ένα επιπλέον σημείο συγκέντρωσης τάσης με τον υπερβολικά μεγάλο k_t . Επίσης η μέθοδος παραγωγής που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να μεταβάλει σημαντικά τη διάρκεια ζωής. Η συμπεριφορά σε κόπωση στον συνήθη διπλά διατμητόμο σύνδεσμο όπως ο πείρος είναι σημαντικά καλύτερη από τους συμβατικά τοποθετημένους πείρους και περίπου η ίδια με αυτή των συνδέσμων τύπου κώνου ή των πείρων τοποθετημένων με μεγάλη πίεση. Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για συνδέσμους με πείρους που φορτώνονται σε κάμψη και αξονικό εφελκυσμό, αλλά για την τελευταία κατάσταση φόρτισης τα σχήματα 28 και 29 είναι τα πιο εκτεταμένα για κράματα αλουμινίου. Το υλικό, ο τύπος (διπλή διάτμηση) και το μέγεθος του συνδέσμου μας δίνουν την καλύτερη μοντέρνα πρακτική.

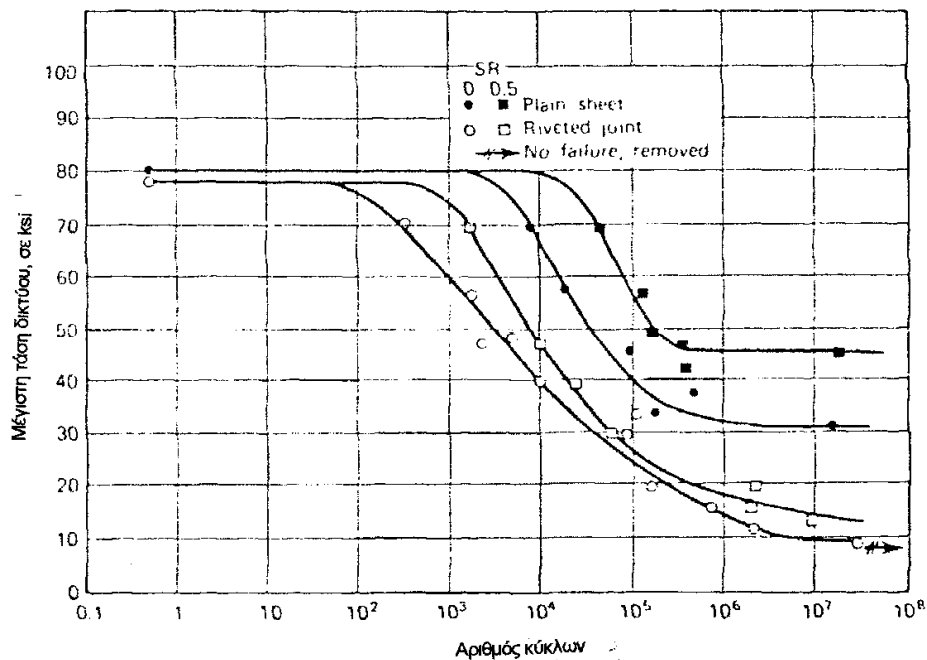


Σχήμα 28: Αξονική τάση και αντοχές σε κόπωση ενός φύλλου από 2024-T3.

Τα δεδομένα είναι επιπλέον χρήσιμα όχι μόνο από την ευρεία ποικιλία κραμάτων που περιλαμβάνουν, αλλά και για τη σύγκριση της διάρκειας ζωής των επίπεδων δοκιμίων και αυτής των πραγματικών συνδέσμων που είναι φτιαγμένοι από το ίδιο υλικό. Οι σύνδεσμοι σχεδιάστηκαν με μια αναλογία εφελκυσμού/διάτμησης περίπου 1,0/1,0 (κάμψη δεν δόθηκε). Η αναλογία εφελκυσμού/διάτμησης/κάμψης εμφανίζεται να είναι κάπως λιγότερο κρίσιμη για τους αλουμινένιους συνδέσμους από τους χαλύβδινους και το γεγονός ότι ο παράγοντας μείωσης της αντοχής σε κόπωση γι' αυτούς τους συνδέσμους, ήταν γενικά κάτω του k_f ενισχύει την παρακολούθηση. Ο παράγοντας μείωσης της αντοχής σε κόπωση, k_f , ορίζεται ως εξής:

$$k_f = \frac{\text{αντοχή σε κόπωση του επιπέδου συνδέσμου του φύλλου}}{\text{αντοχή σε κόπωση του συνδέσμου με πείρους}}$$

και βρίσκεται μεταξύ του 1,04 (για υλικό 2014-T6 στους 10^3 κύκλους) και 4,16 (για 7178-T6 στους $2,5 \times 10^7$ κύκλους). Οι τιμή του k_f γι' αυτούς τους συνδέσμους ήταν 3,2.



Σχήμα 29: Αξονική τάση και αντοχές σε κόπωση ενός φύλλου από 7075-T6.

Οι δοκιμές υπέδειξαν ότι οι πείροι που είναι σχεδιασμένοι σύμφωνα με τις απαιτήσεις αυτών των ιδιοτήτων και κατασκευασμένοι έτσι ώστε να μην έχουν διάφορες γωνίες μεγαλύτερες των 180° και άλλες άχρηστες αιτίες ανύψωσης της τάσης, θα αντέξουν τουλάχιστον 10⁵ επαναλήψεις μέγιστου φορτίου.

Μελετώντας τη δράση της κόπωσης στις κατασκευές είναι σωστό να έχουμε κατά νου τα ακόλουθα σημεία:

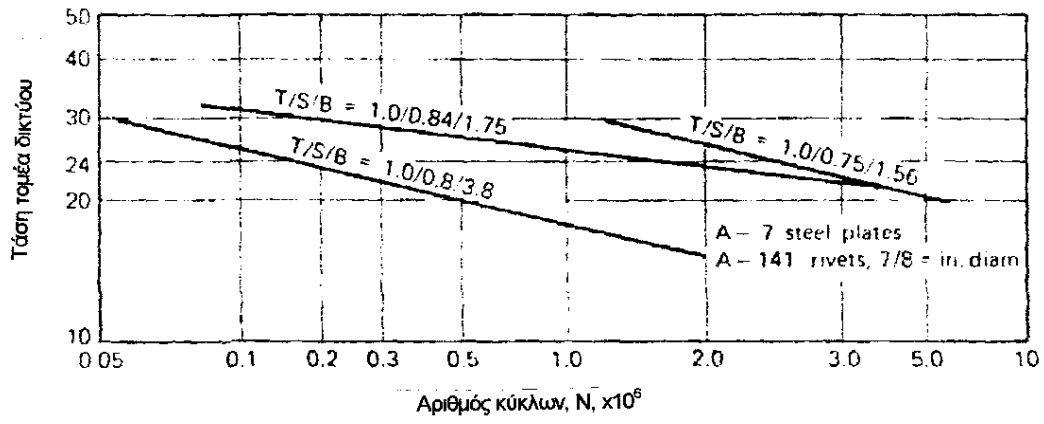
- 1) Ο δυσχερής συνδυασμός φορτίσεων για τον οποίο σχεδιάζεται μια κατασκευή (νεκρό φορτίο, μέγιστο ζωντανό φορτίο, μέγιστη κρούση, μέγιστος άνεμος κ.α.) συμβαίνει σπάνια στην πραγματικότητα και παρουσιάζει λίγο ή καθόλου ενδιαφέρον από πλευράς κόπωσης.
- 2) Η φόρτιση με το περισσότερο ενδιαφέρον από τη μεριά της κόπωσης το σταθερό νεκρό φορτίο με ένα υπερβολικά επιβαλλόμενο και επαναλαμβανόμενο ζωντανό φορτίο έχοντας μια σταθερή ένταση με τις φυσικές καταστάσεις λειτουργίας μέρα παρά μέρα.
- 3) Ο αριθμός των κύκλων του φορτίου που προσμετρούνται στις κατασκευές, συνήθως συγκρίνεται ελαφρώς με εκείνες των προβλημάτων κόπωσης σε στοιχεία μηχανών. Για παράδειγμα 100.000 κύκλοι αντιπροσωπεύουν 10 κύκλους κάθε μέρα για 27 χρόνια· 10⁷ κύκλοι αντιπροσωπεύουν 20 κύκλους κάθε ώρα για 57 χρόνια. Θα πρέπει να δώσουμε προσοχή ώστε να μην

υπερεκτιμήσουμε τον αριθμό των κύκλων για οποιαδήποτε δεδομένη κατάσταση φόρτισης.

- 4) Η μεγάλη προσοχή σε λεπτομέρειες κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή δίνει μια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Όταν συμβαίνει μια αστοχία λόγω κόπωσης σε μια κατασκευή, αυτή βρίσκεται συνήθως στο σημείο συγκέντρωσης τάσης όπου η κατάσταση της τάσης θα μπορούσε να βελτιωθεί με λίγα ή καθόλου «έξοδα».

Θα ήταν χρήσιμο να σημειώσουμε ότι το «σταθερό νεκρό φορτίο» για μερικούς τύπους κατασκευών (ειδικότερα γέφυρες) είναι πολύ πιθανόν να δημιουργήσει ένα παλλόμενο φορτίο που είναι αποτέλεσμα σεισμικών ή ανεμικών δυνάμεων. Η μάζα, το μήκος και η ακαμψία πολλών ανοιγμάτων γεφυρών είναι τέτοια ώστε να έχουμε το φαινόμενο του συντονισμού με τις φυσικές δυνάμεις, 0,1Hz, κατά προσέγγιση· συνεπώς το αποκαλούμενο νεκρό φορτίο στην πραγματικότητα ελέγχει τη διάρκεια ζωής σε κόπωση της κατασκευής. Η παραπάνω παρατήρηση ενισχύεται με δύο πρόσφατα παραδείγματα αστοχίας στα στενά Tacoma και στο Point Pleasant του ποταμού Ohio με την τελευταία να εκδηλώνει μια διάρκεια ζωής της κατά-σκευής των $6,5 \times 10^6$ κύκλους μέσα στο 10% της πρόβλεψης του σχεδιαστή.

Μια επανάληψη πολλών δοκιμών σε καθαρούς ανθρακούχους χάλυβες και κραμάτων τους για βαριά κατασκευή, δίνει έμφαση στο κρίσιμο σημείο ότι παρά την μεγάλη ακτίνα των διαθέσιμων στατικών αντοχών από $4,65 \text{ kg/mm}^2$ ως $7,75 \text{ kg/mm}^2$ η αντοχή σε κόπωση των συνδέσμων στους 2×10^6 κύκλους ήταν περίπου η ίδια, περίπου $2,02 \text{ kg/mm}^2$. Αυτή η κατάσταση μπορεί κάλλιστα να θέσει το ερώτημα του κόστους, καθορίζοντας τη μεγαλύτερη αντοχή και το ανώτερο κόστος, νικελιούχους ή πυριτιούχους χάλυβες, εκτός αν υπάρχει η απαίτηση της αντίστασης στη διάβρωση. Εξαιτίας της σημασίας της αναλογίας εφελκυσμού/διάτμησης/κάμψης, δίνεται το σχήμα 30 για να δείξει την ευρεία ποικιλία στη διάρκεια ζωής για διαφορετικές αναλογίες. Σημειώστε ότι έχουμε μικρότερη διάρκεια ζωής για μεγαλύτερες τιμές κάμψης που είναι άλλη μια απόδειξη της τρομερής επίδρασης των συγκεντρώσεων τάσεων στην επιφάνεια της οπής στην επιτρεπόμενη αντοχή κάμψης. Αυτή η κατάσταση είναι πιο ουσιαστική προωθώντας την χρήση κοχλιών μεγάλης αντοχής αντί για πείρους γι' αυτή τη δουλειά. Σε έναν κοχλιωτό σύνδεσμο είναι πιθανόν να μεταφέρεται το φορτίο διάτμησης, με κατάλληλο σχεδιασμό, με την τριβή και έτσι να αποφεύγονται αυτές οι ιδιαίτερες δυσκολίες.



Σχήμα 30: Η διάρκεια ζωής σε κόπωση σαν παράγοντας της αναλογίας εφελκυσμού-διάτμησης-κάμψης.

Κεφάλαιο 4

4.0 Σύνδεσμοι με συγκόλληση

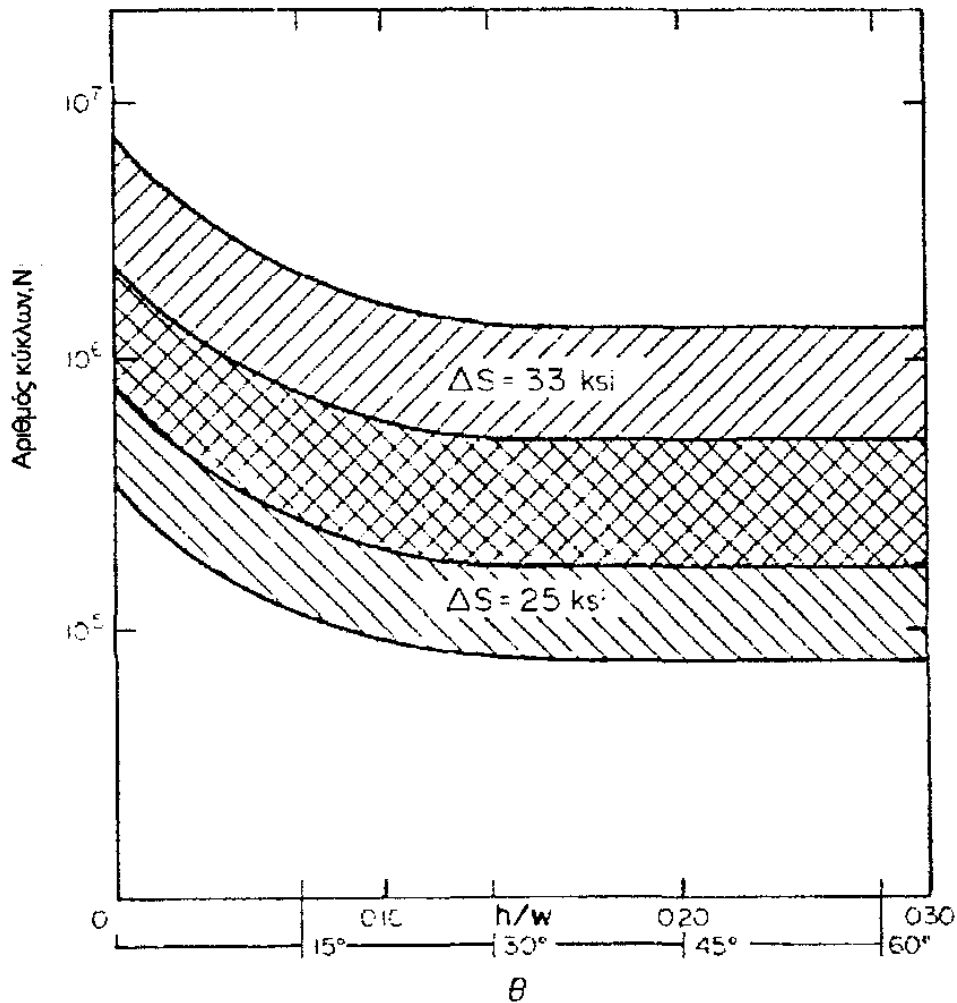
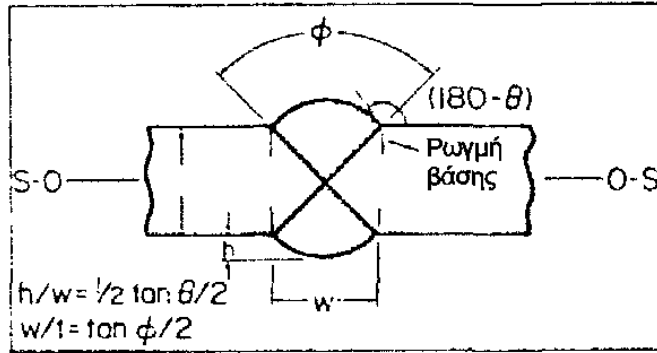
Οι συγκολλήσεις που θα αναφερθούμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και αερίου, οι συγκολλήσεις σημείου και Bonded joints

4.1 Συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου και αερίου

Οι τρεις κυρίαρχοι παράγοντες που ελέγχουν τη διάρκεια ζωής σε κόπωση των συγκολλήσεων είναι:

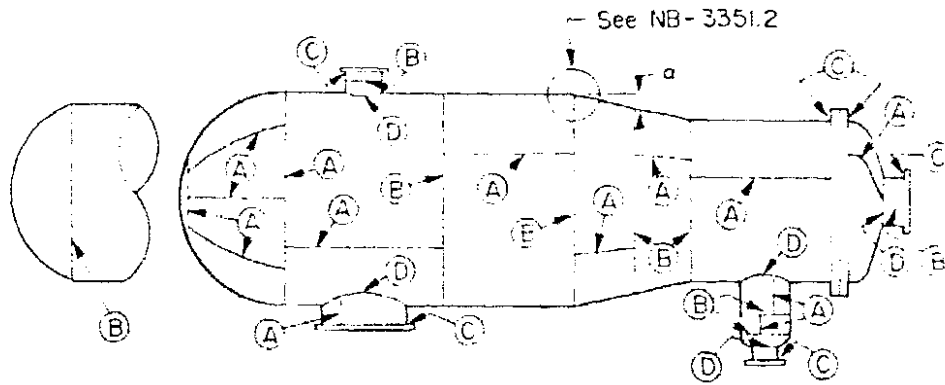
- 1) η γεωμετρία του συνδέσμου,
- 2) το μέγεθος του αρχικού ελαττώματος και
- 3) το εύρος των τάσεων.

Στη γεωμετρία του συνδέσμου στη γωνία της φλάντζας, το σχήμα 31 είναι πιθανώς ο πιο ουσιαστικός παράγοντας και για χρήσιμες διάρκειες ζωής η γωνία θα έπρεπε να ελαχιστοποιείται με προσεκτικό έλεγχο της εναπόθεσης του μετάλλου για ομαλό, χαμηλό προφίλ. Στο σχήμα 31 φαίνονται επίσης τυπικές διάρκειες ζωής σε σχέση με τις γωνίες.

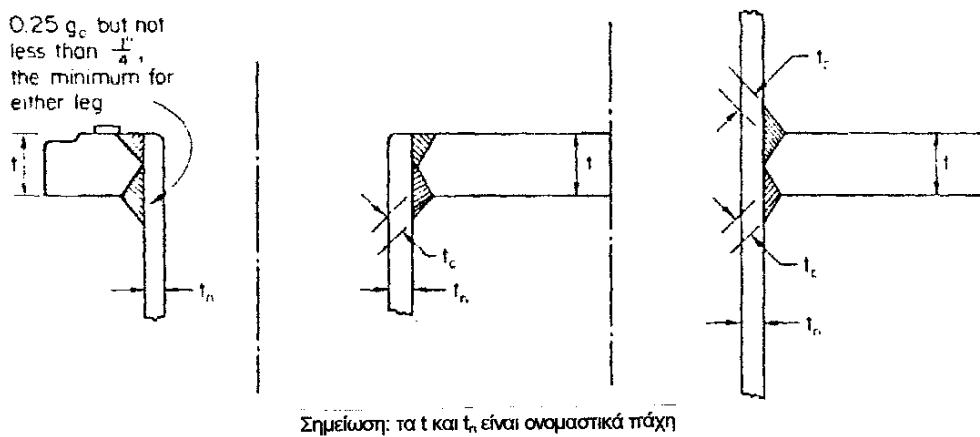


Σχήμα 31: Διάρκεια ζωής σε κόπωση εναντίον γωνίας φλάντζας.

Οι απαιτήσεις είναι σχεδόν οι ίδιες. Ο βασικός σκοπός είναι ο σχεδιασμός για υψηλή απόδοση και αποτελεσματικότητα. Το σχήμα 32 δείχνει την κατηγοριοποίηση κατά ASME των τύπων των συνδέσμων και δείγματα των σχεδίων.



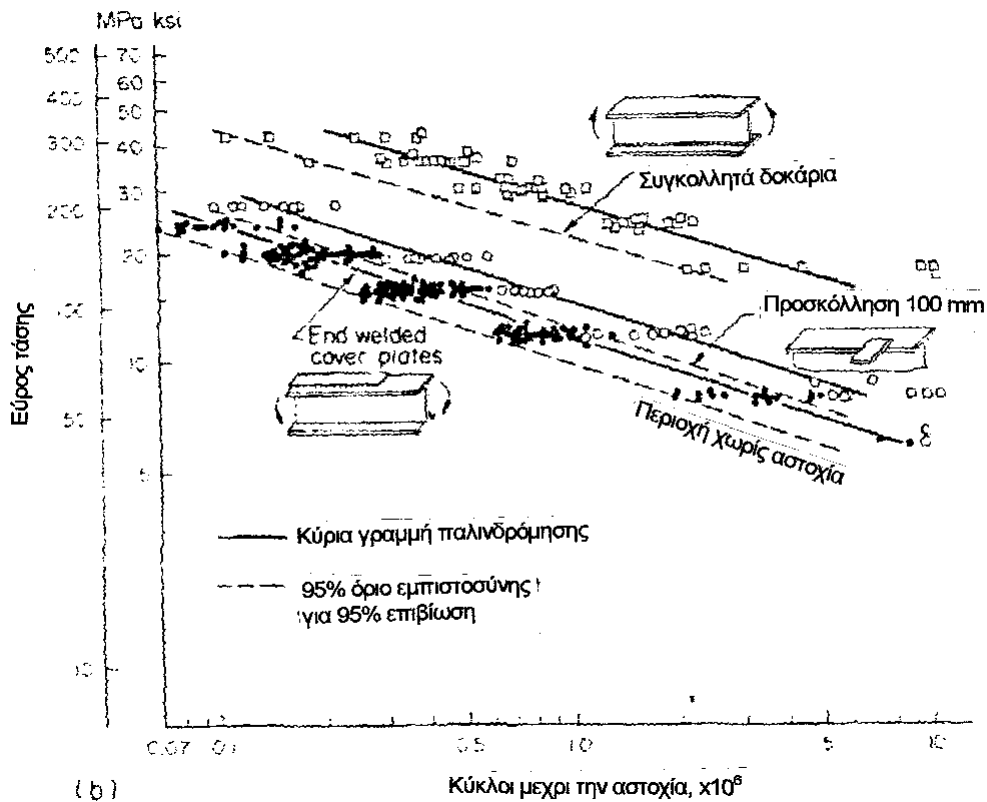
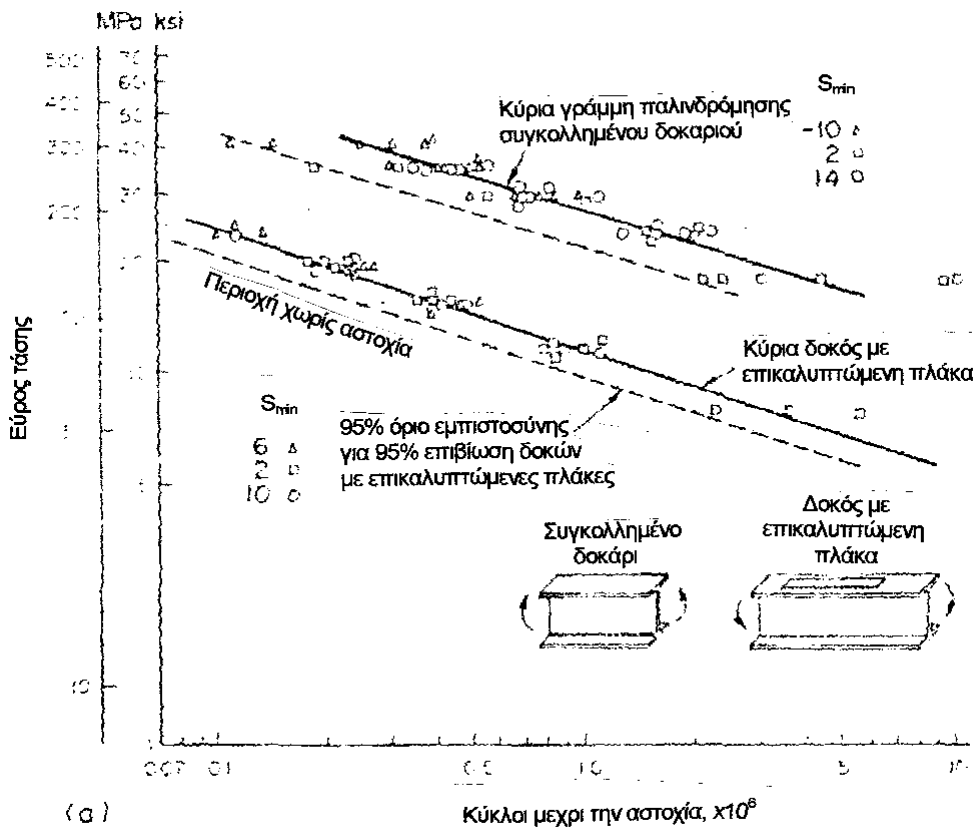
Σχήμα 32α: Τυπικές περιοχές συγκολλητών συνδέσμων των κατηγοριών A, B, C και D.



Σχήμα 32β: Αποδεκτές λεπτομέρειες συγκολλήσεων πλήρους διείσδυσης για συνδέσμους κατηγορίας C.

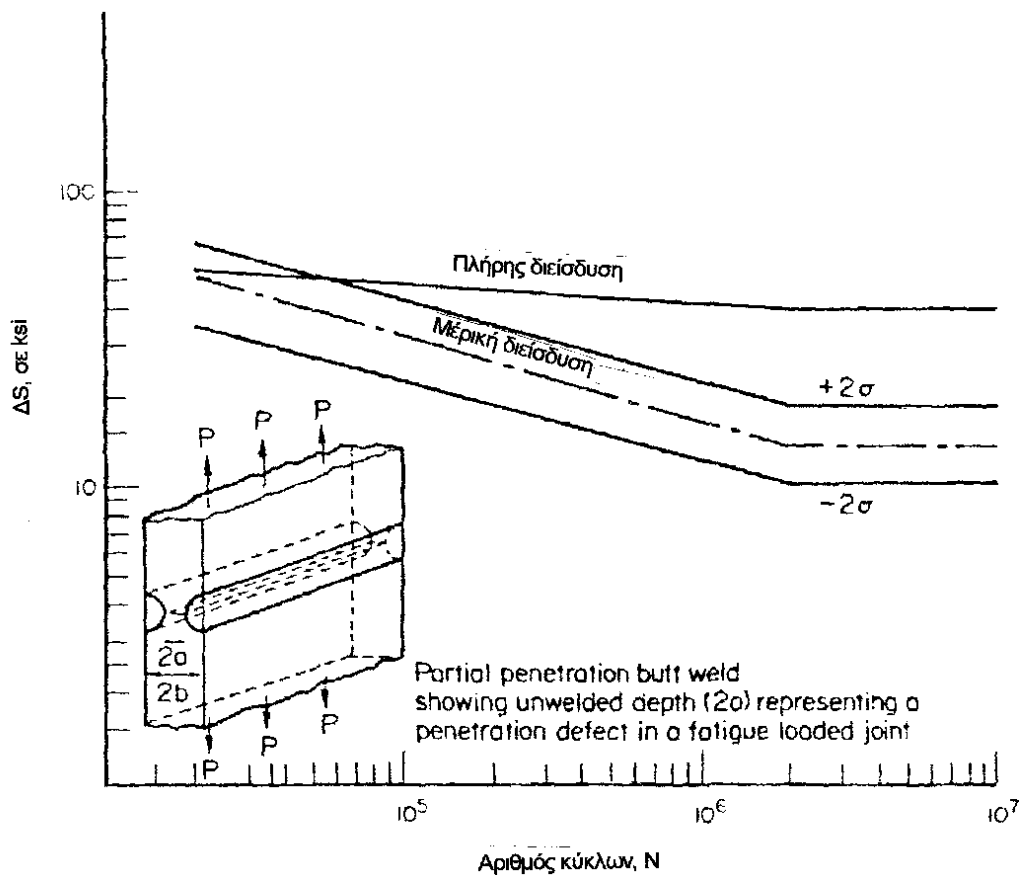
Ο σχεδιασμός μιας συγκόλλησης δεν έχει και τόσο μεγάλη σημασία, αλλά χρειάζεται έμφαση στις εφαιπτόμενες και επικαλυπτόμενες πλάκες. Το σχήμα 33 δίνει αποτελέσματα εκτεταμένων δοκιμών σε δοκούς γεφυρών. Μια κύρια λεπτομέρεια είναι το τελείωμα της επικαλυπτόμενης πλάκας και υπάρχουν αποδείξεις που δείχνουν ότι η προεξοχή της συγκόλλησης δεν θα έπρεπε να συναντιέται με το τέλος της επικαλυπτόμενης πλάκας επειδή η αναπόφευκτη ρωγμή συρρίκνωσης στην άκρη της συγκόλλησης θα προσανατολιζόταν φυσικά στον καμπτικό εφελκυσμό. Εντούτοις ο παράγοντας που ελέγχει την κατάσταση είναι η περάτωση του εξογκώματος.

Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επίδραση της λεπτομέρειας της επαφής, βγήκε πρόσφατα στην επιφάνεια σε συγκολλητά δοκάρια που υποστηρίζουν ράγες γερανών.



Σχήμα 33: Συμπεριφορά σε κόπωση συγκολλημένων δοκών.

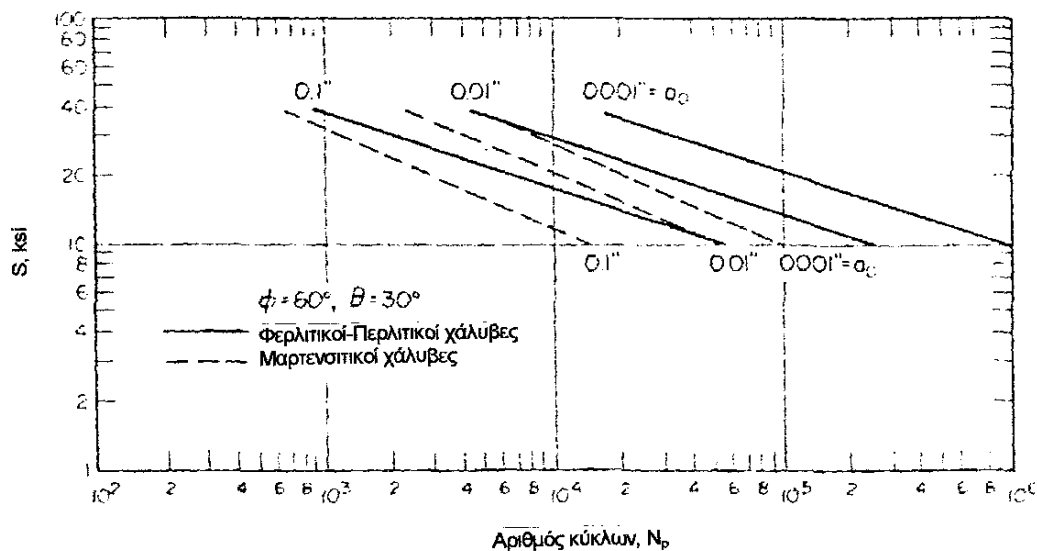
Τα ελαττώματα των συγκολλήσεων είναι μέγιστης σημασίας στον καθορισμό της διάρκειας ζωής σε κόπωση αφού αποτελούν ένα αρχικό μειονέκτημα. Τα εσωτερικά ελαττώματα, η πορώδης κατάσταση, η σκουριά κ.α. δεν επηρεάζουν τόσο πολύ, όσο αυτά της επιφάνειας, εκτός από μεγάλους τομείς (>~45mm). Μια κύρια εξαίρεση αυτής της κατάστασης είναι η μη ολοκληρωμένη εισχώρηση, σχήμα 34. Ως ζήτημα καλής σχεδιαστικής πρακτικής και κατασκευής, οι συγκολλήσεις μερικής εισχώρησης θα πρέπει να αποφεύγονται.



Σχήμα 34: Διάρκεια ζωής σε κόπωση συναρτήσει της διείσδυσης.

Η γενική επίδραση στην διάρκεια ζωής των επιφανειακών ατελειών φαίνονται στο σχήμα 35 και σημειώνοντας αμέσως ότι το «σύννηθες» των μεγεθών από 1,3-1,8mm, είναι επαρκές για να μειώσει τη διάρκεια ζωής σε χαμηλές τιμές, εκτός από τις μη κατάλληλα χαμηλές τάσεις. Συνεπώς είναι υποχρεωτικό και στον σχεδιαστή αλλά και στον κατασκευαστή να ελαχιστοποιούν το εμπόδιο κατά τη διάρκεια της ψύξης, που είναι ο κύριος λόγος δημιουργίας ρωγμής. Σημαντικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι η αναλογία αύξησης της ρωγμής d_a/d_N σε ένα κατάλληλα

τοποθετημένο μέταλλο δεν είναι μικρότερη από το προηγούμενο μέταλλο και με προσοχή η αναλογία για το HAZ μπορεί να μείνει σε παρόμοιες τιμές. Θα σημειωθεί παρακάτω ότι στο σχήμα 35 οι διαφορετικοί χάλυβες παράγουν βασικά τις ίδιες διάρκειες ζωής (εκτός όταν έχουμε πολύ μικρές τάσεις) και ότι η αναλογία αύξησης της ρωγμής για τις τρεις γενικές κλάσεις χαλύβων (ωστενιτικός, μαρτενσιτικός και φερριτικός – περλιτικός) δεν διαφέρουν και πολύ.



Σχήμα 35: Επίδραση του αρχικού μεγέθους του ελαττώματος στη διάρκεια ζωής σε κόπωση από πολλαπλασιασμό της ρωγμής.

Συνεπώς ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση μιας χαλύβδινης συγκόλλησης δεν επηρεάζεται και πολύ από τη μεταλλουργική του δομή ή την στατική του αντοχή. Ενώ το ίδιο είναι γενικά αληθινό για τα μη σιδηρούχα κράματα. Υπάρχουν εντούτοις ορισμένες εξαιρέσεις.

Η ποικιλία στην γεωμετρία της επικαλυπτόμενης πλάκας για το κάθε άκρο, δεν είχαν κανένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα στην αντοχή σε κόπωση εκτός από δοκάρια με επικαλυπτόμενες πλάκες μεγαλύτερες σε πλάτος από τη περιφέρεια του δοκαριού στο άκρο. Οι υπάρχουσες προβλέψεις προδιαγραφών που οριοθετούν το πάχος της επικαλυπτόμενης πλάκας (ή το συνολικό πάχος πολλαπλών πλακών) στην περιφέρεια ως 1,5 φορές το πάχος της περιφέρειας μπορούν να εφαρμοστούν ελεύθερα. Οι επικαλυπτόμενες πλάκες μπορούν επίσης να συνδεθούν χωριστά ή σε συμπλέγματα χωρίς να υπάρχει διαφορά στην αντοχή.

Όταν οι επικαλυπτόμενες πλάκες είναι φαρδύτερες από την περιφέρεια με την οποία συνδέονται, θα έχουμε σαν αποτέλεσμα μια μείωση στην αντοχή σε κόπωση εκτός αν χρησιμοποιηθούν συγκολλήσεις με εγκάρσια άκρα. Ως εκ τούτου οι συγκολλήσεις με εγκάρσια άκρα θα πρέπει να απαιτούνται σε πλατιές επικαλυπτόμενες πλάκες. Το άκρο της συγκόλλησης μπορεί να γυρίσει γύρω από την περιφέρεια του δοκαριού. Επίπεδα συγκολλητά δοκάρια δεν παρουσιάζουν την ίδια αντοχή σε κόπωση όπως το βασικό μέταλλο. Θα πρέπει να ληφθεί προσοχή επίσης για να ελέγξουμε την ομαλότητα των άκρων της περιφέρειας. Οι φανερές εγκοπές στα άκρα της περιφέρειας θα πρέπει να αφαιρούνται με τρόχισμα αφού το μέγεθος των ρωγμών είναι πιο κρίσιμο όταν αρχίζουν από τα άκρα.

Η παρουσίαση των επιτρεπόμενων πιέσεων σε κόπωση στις συγκολλήσεις ποικίλει με τις διάφορες επενέργειες. Η A.W.S. δίνει έναν τύπο όπως στον πίνακα 12 και οι διαθέσιμοι πίνακες καλύπτουν τους υπόλοιπους κατασκευαστικούς χάλυβες. Το A.I.S.C. δίνει λίστες από τις οποίες λαμβάνεται το σχήμα 36. Ο κώδικας ASME προμηθεύει ένα τύπο καμπύλης S-N για κάθε μία από τις γενικές κλάσεις χαλύβων και για τα μη φερρετικά κράματα που χρησιμοποιούνται στον κώδικα εργασίας, για παράδειγμα Sec III, Div. 1 και NA App XIV. Ο A.S.C.E. δίνει πληροφορίες όπως αυτές στον πίνακα 13 για το 6061-T6. Ο βαθμός συντηρητισμού ποικίλει κάπως από την παρουσίαση (οι καμπύλες του A.S.M.E. είναι γνωστό ότι είναι «κάπως συντηρητικές») και γενικά ο σχεδιαστής έχει το καθήκον να εξετάσει το πρόβλημα περισσότερο από την επιλογή της κατηγορίας και της τάσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης το τυποποιημένο διάγραμμα του Goodman για να παρουσιάσει τάσεις σε κόπωση· το σχήμα 37 είναι τυπικό.

Βασικά όλοι οι βαθμοί ανοξειδωτων χαλύβων είναι ως ένα βαθμό συγκολλησιμοι και το πρόβλημα δεν είναι τόσο η απώλεια αντοχής σε κόπωση μέσα ή κοντά στη συγκόλληση, όσο είναι η απώλεια της αντίστασης σε διάβρωση. Εξαιτίας της τελευταίας κατάστασης, προτιμάται το ηλεκτρικό τόξο από τη συγκόλληση οξυγόνου-ασετιλίνης για πολλά κράματα. Ένα κύριο κράμα για το κέλυφος των αεροσκαφών Mach 3 είναι το AM-350CRT, ένα κράμα 17Cr-4Ni με Mo. Τα αποτελέσματα αξονικών δοκιμών σε εγκάρσιες συγκολλήσεις που έγιναν σε MIL-W-8611 έδειξαν ότι ενώ η αντοχή σε κόπωση σε οποιονδήποτε συνδυασμό θερμοκρασιών, ζωής και κύριων τάσεων ($28,1\text{kg/mm}^2$ σ' αυτές τις δοκιμές) είναι σημαντικά χαμηλότερη από τις στατικές τιμές. Η απόλυτη τιμή της αντοχής σε

κόπωση παραμένει σε επαρκώς υψηλά επίπεδα για να κατασκευάσουμε πολυάριθμες σχεδιαστικές προσεγγίσεις.

Ένα άλλο σημαντικό γκρουπ συγκολλησιμων χαλύβων υψηλής αντοχής και σκληρότητας είναι το 9Ni-4Co με άνθρακα από 0,20 ως 0,45%. Στα μέταλλα με μικρό ποσοστό άνθρακα οι αντοχές σε κάμψη των 126,6-140,1kg/mm² μπορούν να ληφθούν σε συγκολλητούς συνδέσμους χωρίς θερμική κατεργασία πριν ή μετά και αυτές οι μάλλον υψηλές τιμές είναι χαρακτηριστικές με την εγγενή σκληρότητα αυτού του συστήματος κραμάτων και της ευεργετικής επίδρασης της αυτοβαφής του μετάλλου συγκόλλησης. Ακόμα μεγαλύτερες αντοχές είναι πιθανές σε κράματα με μεγαλύτερα ποσοστά σε άνθρακα με θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση. Ωστενητικά χυτά μέταλλα με μαγγάνιο συγκολλούνται επιτυχώς με τεχνικές μετάλλου αδρανούς αερίου και ελαχιστοποιώντας τον χρόνο θέρμανσης. Η συγκόλληση με ακτίνα ηλεκτρονίων αναπτύσσεται ραγδαίως, αλλά έχουν δημοσιευτεί πολύ λίγα συγκεκριμένα δεδομένα όσον αφορά την κόπωση.

Μια ευρεία επιλογή κραμάτων αλουμινίου είναι εύκολα συγκολλησιμη-δοκιμές εγκάρσιων συγκολλήσεων στα 2014-T6 και 6061-T6 υποδεικνύουν μια κατά προσέγγιση 2 προς 1 βελτίωση για την εξάλειψη των καταναγκασμών και για παράδειγμα το 6061 από 3,1kg/mm² στα 6,5kg/mm² στους 10⁶ κύκλους. Η στατική του ίδιου συνδέσμου ήταν 16,5kg/mm² δίνοντας ένα επίπεδο τάσης μικρότερου του 50% στατικού. Σε μια έκθεση στους 10⁶ κύκλους αυτή η ροπή φαίνεται να αντέχει για τα περισσότερα αλουμίνια, αλλά για το μαγνήσιο πέφτει ως και 12%. Συνεχίζεται η εκτεταμένη δουλειά στην προσπάθεια ταξινόμησης των εσωτερικών ασυνεχειών των συγκολλήσεων ως προς την επίδραση τους στη διάρκεια ζωής σε κόπωση, όπως και οι μελέτες των επιφανειακών ατελειών. Οι σύνδεσμοι λαβών στο κράμα 5456 μελετήθηκαν και αναγνωρίστηκαν ραδιογραφικά σαν κλάση I, III και IV σύμφωνα με το NAS 1514. Οι δοκιμές με φορτία κατάλληλα ώστε να προκαλέσουν αστοχία στους 10⁴ ή 10⁶ κύκλους (R=0,1) προσφέρουν αποτελέσματα και για τις τρεις κλάσεις οι οποίες υπερκαλύπτουν άλλες πιο εκτεταμένες που δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή κανενός συμπεράσματος.

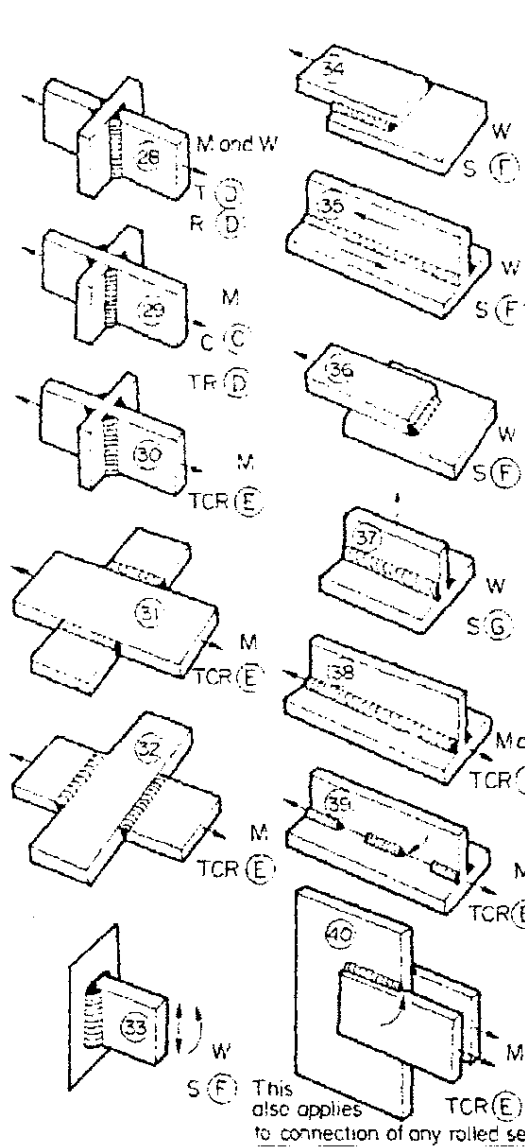
Πίνακας 12: Επιτρεπόμενες τάσεις σε κόπωση για χάλυβες A7, A373 και A36 και τις συγκολλήσεις τους.

| | 2.000.000 κύκλοι | 600.000 κύκλοι | 100.000 κύκλοι | Αλλά να μην υπερβαίνει |
|--|---|---|---|---|
| Ευτελής μέταλλο σε εφελκυσμό συνδεδεμένο με συγκολλητά φύλλα Αλλά να μην υπερβαίνει | 1 $\sigma = \frac{5,3}{1 - 2/3 \cdot K}$ kg/mm ² P _t | 3 $\sigma = \frac{7,4}{1 - 2/3 \cdot K}$ kg/mm ² P _t | 5 $\sigma = \frac{5,3}{1 - 2/3 \cdot K}$ kg/mm ² P _t | $\frac{2 \cdot P_c}{3 \cdot K}$ kg/mm ² |
| Ευτελής μέταλλο σε θλίψη συνδεδεμένο με συγκολλητά φύλλα | 2 $\sigma = \frac{5,3}{1 - \frac{2}{3} \cdot K}$ kg/mm ² | 4 $\sigma = \frac{7,4}{1 - \frac{2}{3} \cdot K}$ kg/mm ² | 6 $\sigma = \frac{10,5}{1 - \frac{2}{3} \cdot K}$ kg/mm ² | P _c kg/mm ² $\frac{P_c}{1 - K/2}$ kg/mm ² |
| Σφουρίλατη συγκόλληση σε εφελκυσμό | 7 $\sigma = \frac{11,2}{1 - 0,8 \cdot K}$ kg/mm ² | 11 $\sigma = \frac{12,0}{1 - 0,7 \cdot K}$ kg/mm ² | 15 $\sigma = \frac{12,7}{1 - \frac{2}{3} \cdot K}$ kg/mm ² | P _t kg/mm ² |
| Σφουρίλατη συγκόλληση σε θλίψη | 8 $\sigma = \frac{12,7}{1 - K}$ kg/mm ² | 12 $\sigma = \frac{12,7}{1 - 0,8 \cdot K}$ kg/mm ² | 16 $\sigma = \frac{12,7}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm ² | P _c kg/mm ² |
| Σφουρίλατη συγκόλληση σε διάτμηση | 9 $\tau = \frac{6,3}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm ² | 13 $\tau = \frac{7,4}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm ² | 17 $\tau = \frac{9,1}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm ² | 9,1 kg/mm ² |
| Συγκολλήσεις φύλλων ω=μεγεθος ποδιού | 10 $f = \frac{100 \cdot \omega}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm | 14 $f = \frac{140 \cdot \omega}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm | 18 $f = \frac{183}{1 - 0,5 \cdot K}$ kg/mm | 173·ω kg/mm |

όπου: K=min/max

P_c=Επιτρεπόμενη μονάδα τάσης θλίψης για το μέλος.

P_t= Επιτρεπόμενη μονάδα τάσης εφελκυσμού για το μέλος.



| | | | | | |
|----------|-----------|------------|------------|--------------|-------------------|
| | 20,000 lb | 100,000 lb | 500,000 lb | 2,000,000 lb | Over 2,000,000 lb |
| (A) A514 | 45 | 35 | 25 | 25 | |
| (A) | 40 | 32 | 24 | 24 | |
| (B) | 33 | 25 | 17 | 15 | |
| (C) | 28 | 21 | 14 | 12 | |
| (D) | 24 | 17 | 10 | 9 | |
| (E) | 17 | 12 | 7 | 6 | |
| (F) | 17 | 14 | 11 | 9 | |
| (G) | 15 | 12 | 9 | 8 | |

Αλλά δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις σταθερές επιτρεπόμενες τιμές

Επιτρεπόμενη τάση κόπωσης

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{ST}}{1-K}$$

Για τις κατηγορίες με αστερίσκο στην περίπτωση αντιστρεφόμενης χρήσης~

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{ST}}{1-6K}$$

σ_{max} ή T_{max} = μέγιστη επιτρεπόμενη τάση κόπωσης, σε ksi
 σ_{ST} ή T_{ST} = επιτρεπόμενο εύρος τάσης από πίνακα, σε ksi

$$K = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{M_{min}}{M_{max}} = \frac{F_{min}}{F_{max}} = \frac{T_{min}}{T_{max}} = \frac{V_{min}}{V_{max}}$$

S (F) This also applies to connection of any rolled sections

- Το κυρτό βέλος υποδεικνύει την περιοχή εφαρμογής των επιτρεπόμενων τιμών σε κόπωση
- Τα ευθύγραμμα βέλη υποδεικνύουν τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις

- S=διάτμηση
- T=εφελκυσμός
- C=θλίψη
- R=αντιστροφή
- M=τάση στο μέταλλο
- W=τάση στη συγκόλληση
- t=επιτρεπόμενη σταθερή διαμετρική τάση, ksi

Grind in the direction of stressing only (when slope is mentioned (ex 1 in 2-1/2) this is always the maximum value. Less slope is permissible

Σχήμα 36: Επιτρεπόμενες τάσεις σε κόπωση A.I.S.C.

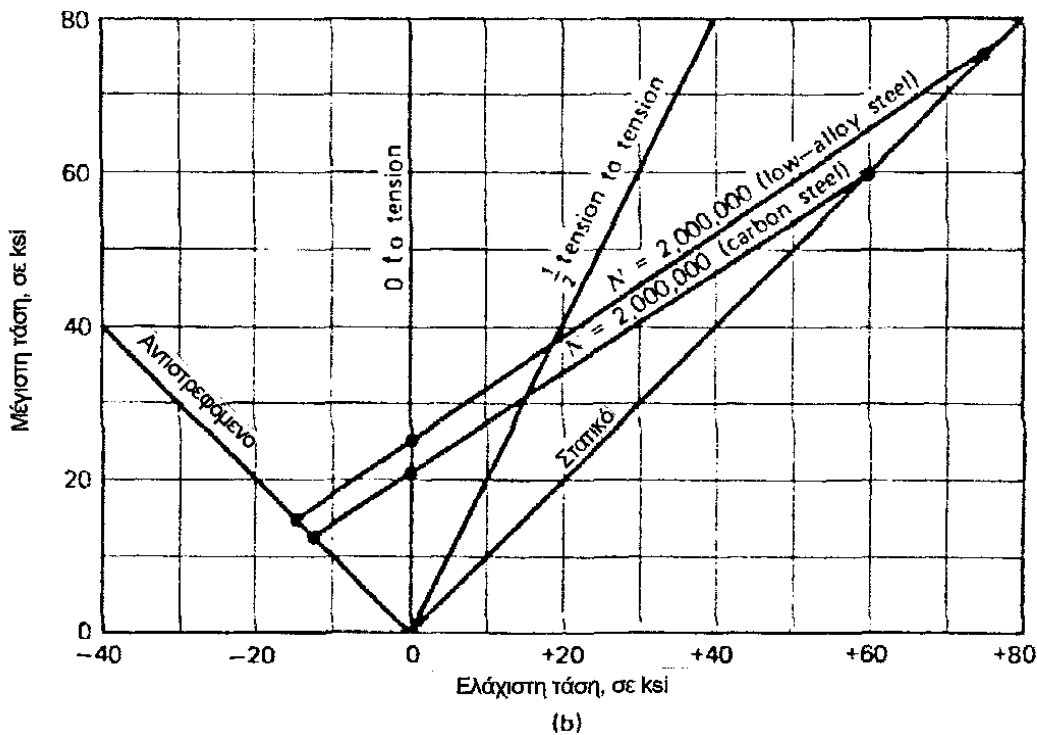
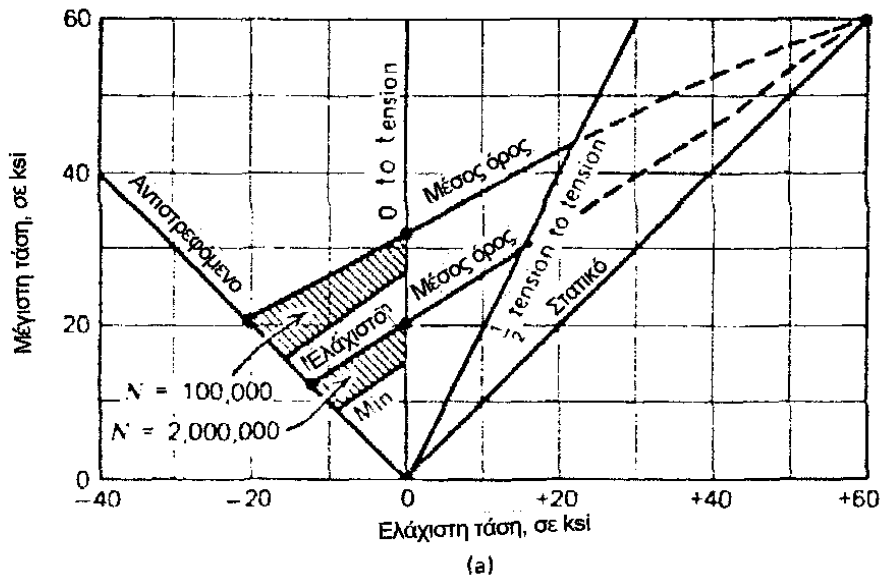
Πίνακας 13: Επιτρεπόμενες τάσεις εφελκυσμού για επαναλαμβανόμενα φορτία σε κατασκευές από συγκολλητό αλουμίνιο (6061-T6 και 6062-T6).

| Αριθμός επαναλήψεων του εφαρμοζόμενου φορτίου | Επιτρεπόμενη τάση στον τομέα του δικτύου, F_{max} | |
|---|--|---|
| | Εφελκυσμός σε εγκάρσιες ή γεωγραφικά σφυρήλατες συγκολλήσεις και εφελκυσμός σε παρακείμενες γεωγραφικά περιοχές με συνεχόμενες συγκολλήσεις φύλλων | Εφελκυσμός σε παρακείμενες περιοχές με εγκάρσιες συγκολλήσεις φύλλων ή τελειώματα γεωγραφικών συγκολλήσεων φύλλων και διάτμηση σε συγκολλήσεις φύλλων |
| 20000 | F | F |
| 100000 | $F+0.67F_{min}$ | $0.68F+0.67F_{min}$ |
| 500000 | $0.73F+0.67F_{min}$ | $0.40F+0.67F_{min}$ |
| 1000000 | $0.67F+0.67F_{min}$ | $0.34F+0.67F_{min}$ |
| 2000000 | $0.65F+0.67F_{min}$ | $0.29F+0.67F_{min}$ |
| 10000000 | $0.64F+0.67F_{min}$ | $0.23F+0.67F_{min}$ |

F_{max} = μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εφελκυσμού στον τομέα δικτύου για επαναλαμβανόμενα φορτία.

F_{min} = ελάχιστη τάση στον τομέα δικτύου κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτωσης (Η F_{min} είναι η μικρότερη τάση εφελκυσμού σε ένα κύκλο εφελκυσμού-εφελκυσμού ή η μεγαλύτερη τάση θλίψης σε ένα κύκλο θλίψης-εφελκυσμού. Στην τελευταία περίπτωση η F_{min} είναι αρνητική).

F= επιτρεπόμενη τάση για μη επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

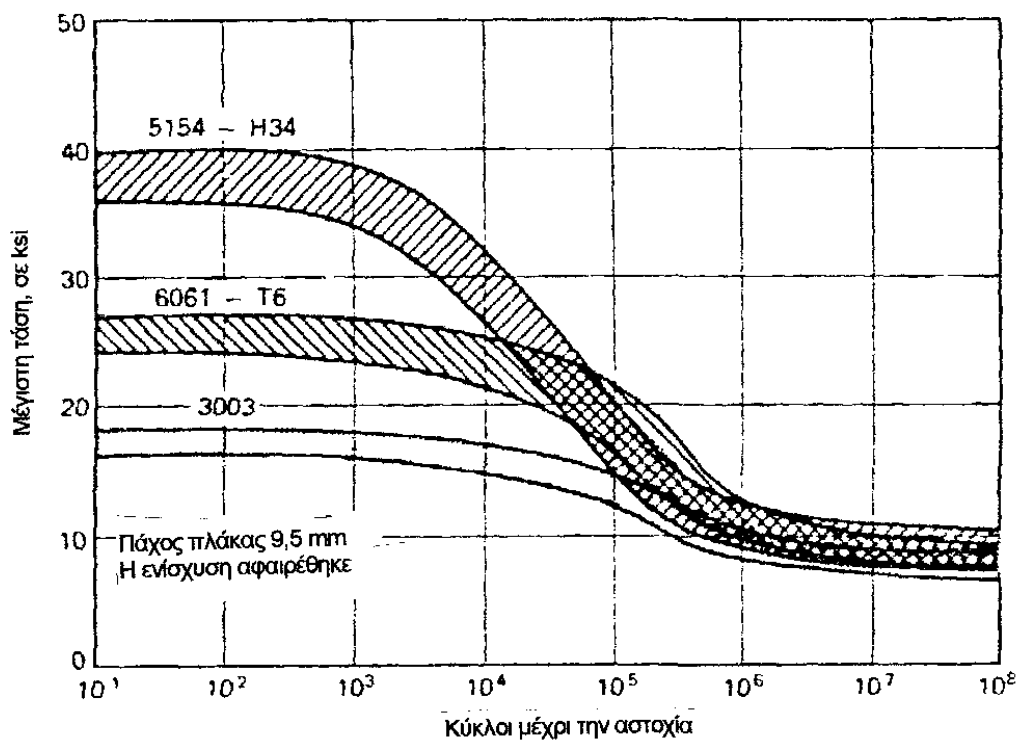


Σχήμα 37: Αντοχές σε κόπωση για συνδέσμους από συγκολλητά φύλλα με εγκάρσιο διπλό-V. (a) κατασκευαστικός χάλυβας. (b) σύγκριση κατασκευαστικού χάλυβα με χαμηλού κράματος χάλυβα μεγάλης αντοχής.

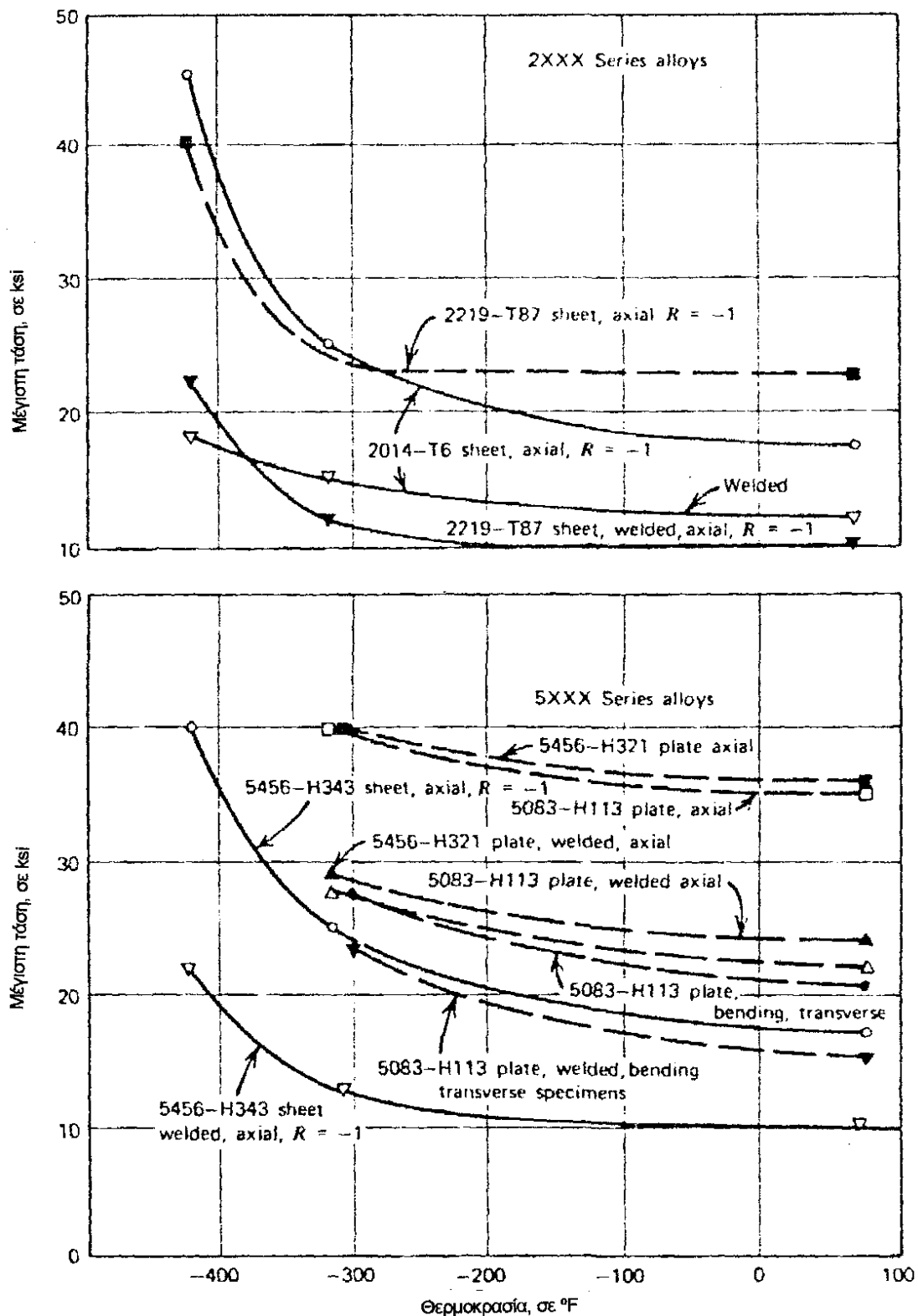
Οι επιτρεπόμενες τάσεις για κατασκευές από αλουμινένιες πλάκες δόθηκαν στον πίνακα 13· το σχήμα 38 υποδεικνύει συγκεκριμένα αποτελέσματα δοκιμών. Σημειώστε ιδιαίτερα τις κοντινές τιμές των τάσεων και των εκθέσεων των 10^5 κύκλων ή και περισσότερο. Η σφυρηλάτηση βελτίωσε την συμπεριφορά σε κόπωση περισσότερο από τη θερμική ανώπτηση. Η σφυρηλάτηση άλλαξε την υπολειπόμενη

επιφανειακή τάση από εφελκυσμό σε θλίψη, αλλά δεν επηρέασε τη μέση υπολειπόμενη τάση, ούτε τη στατική αντοχή. Έχουν αναπτυχθεί αρκετά καινούρια κράματα αλουμινίου (X7002, X7106) για βελτιωμένη ικανότητα συγκόλλησης, ειδικότερα για μεγάλες αντοχές με θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση. Η επίδραση της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά σε κόπωση των αλουμινίων αντιπροσωπεύονται στο σχήμα 39 με μια αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής στην κρυογονική ακτίνα και για τις πλάκες και για τις συγκολλήσεις.

Το κράμα τιτανίου 6Al-4V συγκολλήθηκε κανονικά με την τεχνική της ακτίνας ηλεκτρονίων· τα σφυρηλατημένα τμήματα αεροσκαφών έδειξαν σαν αποτέλεσμα κατασκευαστική σκληρότητα στο αποδεκτά υψηλό επίπεδο περίπου των $49,2\text{kg/mm}^2$. Το κράμα 8Al-Mo-V είναι εύκολα συγκολλητό με τη διαδικασία T.I.G. Το σχήμα 40 δίνει μερικά διαγράμματα σταθερής ζωής.



Σχήμα 38: Κόπωση συγκολλημένων συνδέσμων με τόξο σε αλουμινένια πλάκα.



Σχήμα 39: Αντοχές σε κόπωση συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου σε χαμηλή θερμοκρασία, στους 10^6 κύκλους.

Σχήμα 40: Συνεχή διαγράμματα διάρκειας ζωής για συγκολλητό φύλλο Ti-8Al-1Mo-1V, πάχους 1,27mm.

4.2 Συγκολλήσεις σημείου

Η συμπεριφορά σε κόπωση των συνδέσμων που ηλεκτροσυγκολλούνται με πόντες είναι παρόμοια με αυτή των συνδέσμων με πείρους, με την αντοχή να επηρεάζεται με τον τύπο του συνδέσμου, το ίχνος του πονταρίσματος και την ποιότητα της συγκόλλησης. Ο τύπος της αστοχίας σε κόπωση οφείλεται σχεδόν πάντα από σπάσιμο του φύλλου, και όχι στη στατική αστοχία στη διάτμηση του σημείου συγκόλλησης. Για συνδέσμους από χάλυβα και αλουμίνιο, η αντοχή σε κόπωση κυμαίνεται μεταξύ του 10 και 15% της στατικής αντοχής υποδεικνύοντας ξανά την ισχυρή επίδραση της συγκέντρωσης τάσης στις κατασκευές από φύλλα. Η αντοχή σε κόπωση βρέθηκε γενικά να αυξάνεται με το αυξανόμενο μέγεθος και τον αριθμό των σημείων σε κάθε σειρά και με τον αριθμό των σειρών. Οι σύνδεσμοι διπλής διάτμησης είναι με διαφορά ο τύπος που προτιμάται από τους σχεδιαστές· σε απλές επικαλύψεις η συνιστώσα της κάμψης μειώνει και την αντοχή και την αξιοπιστία. Μπορούμε να πετύχουμε μια καλή βελτίωση στην αντοχή σε κόπωση μέσω των υπολειπόμενων θλιπτικών τάσεων που δημιουργούνται από υψηλή πίεση ή από σφυρηλάτηση. Αν και η μέθοδος είναι γνωστή εδώ και αρκετά χρόνια, δεν χρησιμοποιείται εξαιτίας της δυσκολίας ελέγχου του επιπέδου της υπολειπόμενης τάσης.

Η συγκόλληση με πόντες αναπτύχθηκε πολύ σε μια μέθοδος παραγωγικής συναρμογής και οι σχεδιαστικές αντοχές έχουν καθοριστεί πειραματικά για πολλά υλικά και για τη γεωμετρία των συνδέσμων. Ο πίνακας 14 δείχνει τυπικές αντοχές σε κόπωση.

Πίνακας 14: Τυπικά δεδομένα κόπωσης συγκολλήσεων σημείου σε φύλλο.

| Υλικό φύλλου | Σημεία ανά σύνδεσμο | Πάχος φύλλου σε mm | Στατική αντοχή ανά σύνδεσμο, σε kg/mm ² | Τύπος δοκιμής | Καταστάσεις φόρτισης | Αντοχή σε κόπωση του συνδέσμου (σε δεδομένο αριθμό κύκλων) | | | |
|----------------|---------------------|--------------------|--|-------------------------|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | | 10 ⁴ | 10 ⁵ | 10 ⁶ | 10 ⁷ |
| 24S-T Alclad | 4 | 6.350 | 167.5 | Αξονική | +0,25 | 105 | 70 | 55 | 50 |
| 24S-T Alclad | 4 | 6.350 | 167.5 | Αξονική | +0,75 | --- | 112 | 80 | 70 |
| 24S-T Alclad | 6 | 6.350 | 156.5 | Αξονική | +0,25 | 92 | 75 | 50 | 37 |
| 24S-T Alclad | 6 | 6.350 | 156.5 | Αξονική | +0,75 | --- | 100 | 77 | 72 |
| 24S-T Alclad | 4 | 8.128 | 156 | Αξονική | +0,25 | 122 | 85 | 68 | 62 |
| 24S-T Alclad | 6 | 8.128 | 162.5 | Αξονική | +0,25 | 105 | 90 | 60 | 45 |
| 24S-T81 Alclad | 1 | 16.256 | 530 | Αντιστρεφόμενη διάτμηση | -1,0 | 220 | 175 | 80 | 50 |
| 24S-T3 Alclad | 1 | 16.256 | 610 | Αντιστρεφόμενη διάτμηση | -1,0 | 225 | 195 | 100 | 55 |
| 24S-T86 Alclad | 1 | 17.272 | 550 | Αντιστρεφόμενη διάτμηση | -1,0 | 255 | 180 | 80 | 43 |
| 75S-T6 Alclad | 1 | 16.256 | 660 | Αντιστρεφόμενη διάτμηση | -1,0 | 265 | 190 | 90 | 60 |
| 14S-T4 Alclad | 1 | 16.256 | 605 | Αντιστρεφόμενη διάτμηση | -1,0 | 240 | 160 | 85 | 50 |

Από μεταλλουργικής πλευράς και ιδιαίτερα όλα τα κατασκευαστικά κράματα αλουμινίου εξελασμένα ή όχι μπορούν να συγκολληθούν με πόντες με οποιοδήποτε συνδυασμό· αλλά ο μελέτες για τη διάβρωση μπορούν να αποκλείσουν ορισμένους συνδυασμούς 2014, 2024 και 7075. Αν και οι σύνδεσμοι από αλουμίνιο που είναι συγκολλημένοι με πόντες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι και για στατικές και για κυκλικές φορτίσεις, η πρακτική του σχεδιασμού και οι περιορισμοί ασφαλείας οδήγησαν σε έναν αριθμό επιλογών που είναι φυσικά απαγορευμένες:

- 1) Σύνδεση φλαντζών με διατμηνόμενα πλέγματα σε σκληρυμένες κυψελωτές κατασκευές σε πτέρυγες.
- 2) Σύνδεση διατμηνόμενων δικτυωτών φλαντζών με φύλλο επικάλυψης πτέρυγας.
- 3) Συνδέοντας τα νεύρα μιας πτέρυγας με πλέγματα που καταπονούνται σε ακτινική διάτμηση.

- 4) Σύνδεση μεντεσέδων, υποστηριγμάτων και εξαρτημάτων στην κατασκευή υποστήριξης.
- 5) Σε συνδέσμους σε ενισχυτικές κατασκευές.
- 6) Σε σημεία σύζευξης εντατήρων με νεύρα εκτός αν χρησιμοποιείται κοχλίας ασφαλίσεως.
- 7) Στο τέλος των εντατήρων ή ενισχυτικών ελασμάτων εκτός αν χρησιμοποιείται ένας κοχλίας ασφαλίσεως.
- 8) Σε κάθε πλευρά υπάρχει η πιθανότητα μιας συνιστώσας φορτίου εφελκυσμού, εκτός αν χρησιμοποιούνται κοχλίες ασφαλίσεως.

4.3 Bonded joints

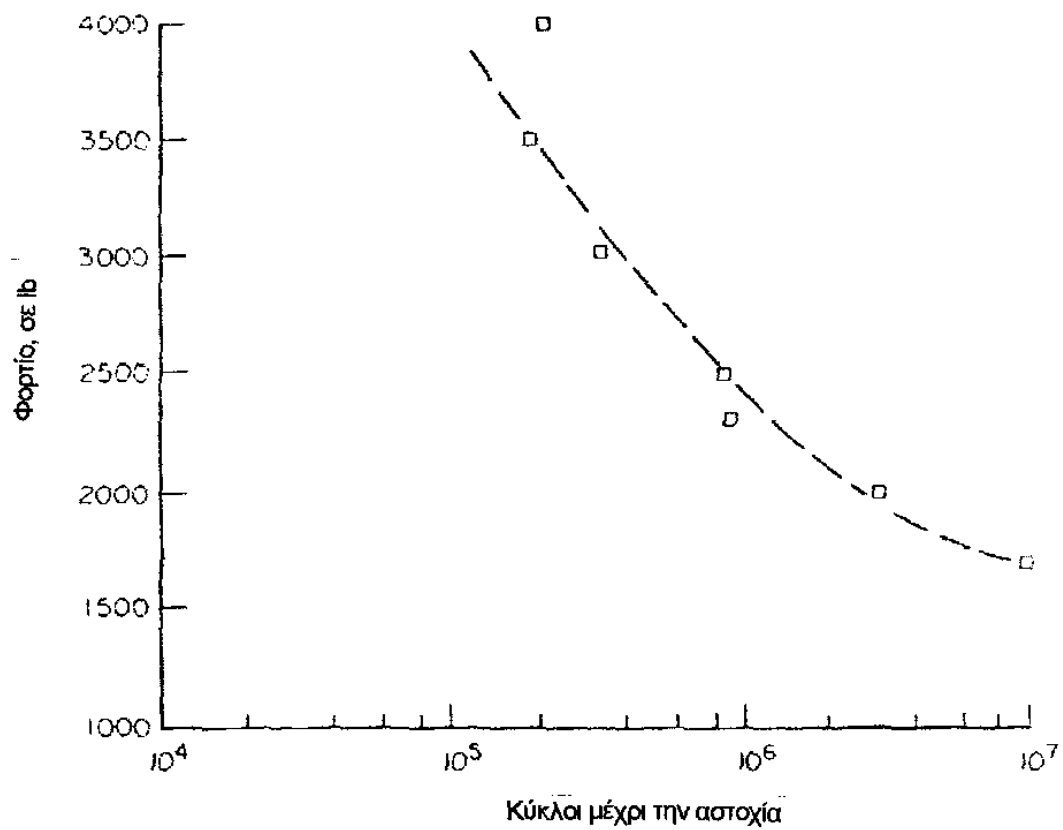
Η αυξανόμενη χρήση κραμάτων τιτανίου και ειδικότερα του Ti-8Al-Mo-v και του Ti-6Al-4V για αεροσκάφη και διαστημικά οχήματα οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών δεδομένων· το σχήμα 41 φανερώνει τα άριστα αποτελέσματα της συγκόλλησης με πόντα σε φύλλα που έχουν υποστεί ανόπτηση. Ένας πολύ μεγάλος αριθμός συνδυασμών των χαλύβων μπορεί να συγκολληθεί με πόντα· ο πίνακας 15 προμηθεύει δεδομένα σε διάφορα κράματα χαλύβων για συνδέσμους μεγάλης απόδοσης.

Οι στατικές αντοχές και οι αντοχές σε κόπωση είναι λειτουργίες του παράγοντα του συνδέσμου ορισμένου σαν: \sqrt{t}/l όπου το t είναι το πάχος του φύλλου και l το μήκος επικάλυψης. Η σχέση της κόπωσης δίνεται στο σχήμα 42 για τυποποιημένους επικαλυπτόμενους συνδέσμους με την εναλλασσόμενη τάση στο φύλλο να εκφράζεται ως:

$$S_a = \frac{0.81/\sqrt{t}}{1+1.5 \cdot \sqrt{t}} \quad \text{σε kg/mm}^2$$

βασισμένη στην αντοχή σε κόπωση του υλικού του συνδέσμου και όχι του φύλλου. Συνεπώς για λεπτά φύλλα και μεγάλη επικάλυψη, η ικανότητα φόρτισης σε κόπωση του στοιχείου συνδέσεως θα ήταν πολύ μεγάλη, όπως ίσως να ήταν αναμενόμενο· αλλά για ακραίες τιμές του παράγοντα του συνδέσμου αυτή η εξίσωση δεν ισχύει και μπορεί να συμβεί αστοχία του φύλλου σε μια μικρότερη τάση από την υποδεικνυόμενη. Σε μια άλλη ακρότητα της γεωμετρίας του συνδέσμου, πάχους των φύλλων και μικρής επικάλυψης, η αστοχία θα συνέβαινε στο στοιχείο συνδέσεων σε

μικρότερες τάσεις, όπως δίνεται και από την εξίσωση. Ένας τυπικός σύνδεσμος μήκους $l=25,4\text{mm}$ και πάχους $t=1,3\text{mm}$ συνδεδεμένου με μια εποξική ρητίνη (Araldite), θα έδειχνε μια αντοχή σε κόπωση σε αξονικό εφελκυσμό περίπου $0,0025\text{Kg/mm}^2$ ως $0,0028\text{kg/mm}^2$ ή περίπου 8% της στατικής αντοχής. Για μεγάλες τιμές του παράγοντα του συνδέσμου (μικρές επικαλύψεις), η επίδραση της αντιστάθμισης σε μια επικάλυψη γίνεται σημαντική. Για μεγάλη επικάλυψη (μικρός παράγοντας συνδέσμου) η αντοχή σε κάμψη του συγκολλητικού υλικού είναι ισότιμη με μια μείωση στο E και αυξάνει ακόμα περισσότερο τις συγκεντρώσεις διατμητικής τάσης, με περισσότερες μειώσεις της επιταχυνόμενης κύριας διατμητικής τάσης. Αφού τα συγκολλητικά υλικά είναι συνήθως μαλακά κράματα, η συνεχιζόμενη αύξηση της επικάλυψης πέρα από μια χαρακτηριστική τιμή δεν αυξάνει την ικανότητα φόρτισης του συνδέσμου και η αστοχία του συνδέσμου πραγματοποιείται ακόμα στο συγκολλητικό υλικό.



| Πάχος φύλλου, σε mm | Φάση | | Δύναμη ηλεκτροδίου, σε kg | Αντοχή διάτμησης, σε kg/mm ² | Εφελκυσμός, σε kg/mm ² | Αναλογία % |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|---------------|
| | συγκόλλησης μετατόπιση % | Θερμότητα χρόνος, σε κύκλους | | | | |
| 0.5588 | 35 | 3 | 450 | 460 | 122.5 | 26.6 |
| 0.9906 | 40 | 6 | 500 | 983.5 | 298.5 | 30.0 |
| 1.5748 | 45 | 7 | 600 | 1558.5 | 585.5 | 34.0 |
| 1.5748-5.0800 | 45 | 4 | 500 | 699.5 | --- | --- |

Σχήμα 41: Κόπωση φύλλου Ti-8Al-1Mo-1V συγκολλημένου με ηλεκτροπόντα.

Πίνακας 15: Τυπικά δεδομένα σε κόπωση από συγκολλήσεις σημείου σε φύλλο κράματος χάλυβα.

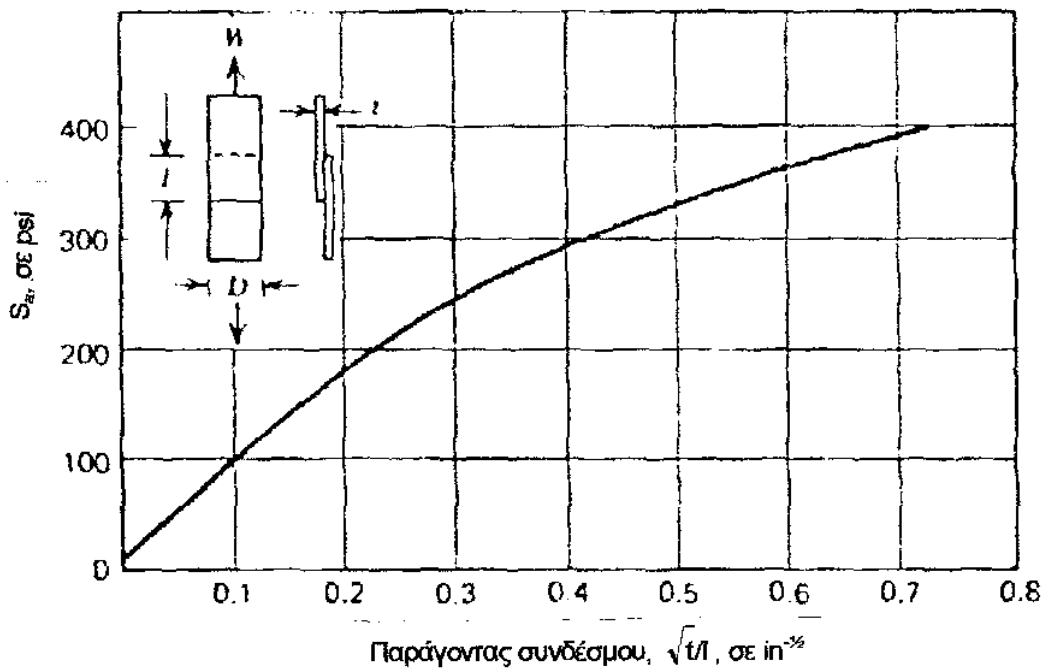
| Υλικό φύλλου | Κατάσταση | Σημεία ανά σύνδεσμο | Πάχος φύλλου, σε mm | Στατική αντοχή, σε kg/mm ² ανά σύνδεσμο | Τύπος δοκιμής | Καταστάσεις φόρτισης | Αντοχή σε κόπωση του συνδέσμου (σε δεσμομένο αριθμό κύκλων) σε kg/mm ² ανά σύνδεσμο | | | |
|---------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--|---------------|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | | | 10 ⁴ | 10 ⁵ | 10 ⁶ | 10 ⁷ |
| SAEX 4130 χάλυβας | Συγκολλημένο | 4 | 0.635 | 693.5 | Αξονική | 0 | 425 | 335 | 250 | --- |
| SAEX 4130 χάλυβας | Συγκολλημένο με ανόπτηση | 4 | 0.635 | 1332.5 | Αξονική | 0 | 480 | 380 | 210 | --- |
| SAEX 4130 χάλυβας | Συγκολλημένο με ανόπτηση | 4 | 0.635 | 1371 | Αξονική | 0 | 550 | 440 | 280 | --- |
| SAE 1010 χάλυβας | --- | --- | 0.254 | 1096 | Αξονική | 0 | 450 | 275 | 112.5 | --- |
| 18-8 ανοξείδωτος χάλυβας | --- | --- | 0.508 | 1391.5 | Αξονική | 0 | 412.5 | 212.5 | --- | --- |
| 18-8 ανοξείδωτος χάλυβας | --- | 2 | 0.762 | 1458 | Αξονική | 0 | 460 | 250-265 | 115-145 | --- |
| Ωστενιτικός Mn-Cr χάλυβας | --- | 2 | 0.889 | 1422 | Αξονική | 0 | 460 | 250-265 | 115-145 | --- |
| Ωστενιτικός Mn χάλυβας | --- | 2 | 0.889 | 1221.5 | Αξονική | 0 | 460 | 250-265 | 115-145 | --- |
| Republic Cor-ten steel | --- | 1 | 1.270 | 1295 | Κάμψη | -1 | --- | 14.5 | 13.5 | 8.5 |
| Republic Cor-ten steel | --- | 1 | 1.270 | 1510 | Κάμψη | -1 | --- | 14.0 | 11.2 | 8 |
| 18-8 ανοξείδωτος χάλυβας | --- | 1 | 1.270 | 592.5 | Κάμψη | -1 | --- | 14.2 | 12.2 | 10 |
| 18-8 ανοξείδωτος χάλυβας | --- | 1 | 1.270 | 1612.5 | Κάμψη | -1 | --- | 12 | 10.2 | 8.5 |

Αναφορικά στο σχεδιασμό για υψηλές θερμοκρασίες, αφού ο συντελεστής επίδρασης της διάτμησης του συγκολλητικού υλικού, μειώνεται γρηγορότερα με

αυξανόμενη τη θερμοκρασία, απ' ότι ο ελαστικός συντελεστής του (μεταλλικού) συγκολλητικού υλικού, μια μεγαλύτερη αναλογία μπορεί να είναι πλεονεκτική.

Για κόπωση σε λίγους κύκλους (κάτω από τους 10^6) οι αστοχίες τείνουν να συμβούν στο σύνδεσμο· αλλά για μικρότερες φορτίσεις και μεγαλύτερες διάρκειες ζωής, η αστοχία είναι συνήθως του συγκολλητικού υλικού. Το σχήμα 43 δείχνει ότι γενικά παίρνουμε μια καλύτερη απόδοση από τη χρήση μικρών παραγόντων συνδέσμων (μεγαλύτερες επικαλύψεις). Οι συγκεντρώσεις τάσης στο τέλος των (μεταλλικών) συγκολλητικών υλικών είναι λίγο μειωμένες αυξάνοντας την επικάλυψη. Ένας τυπικός προσδιορισμός απαιτεί μια αντοχή σε κόπωση $0,48\text{kg/mm}^2$ το ελάχιστο, στους 10^7 κύκλους, που είναι μη συναφής με την τιμή του παράγοντα του συνδέσμου.

Για συνδέσμους στους οποίους τα συγκολλητικά υλικά είναι διαφορετικού πάχους το πιο λεπτό από τα δύο θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να καθορίζει τον παράγοντα του συνδέσμου. Αυτή η πρακτική είναι συντηρητική γιατί το παχύτερο φύλλο φέρει περισσότερο την κάμψη, μειώνοντας την αντιστάθμιση του λεπτότερου φύλλου.



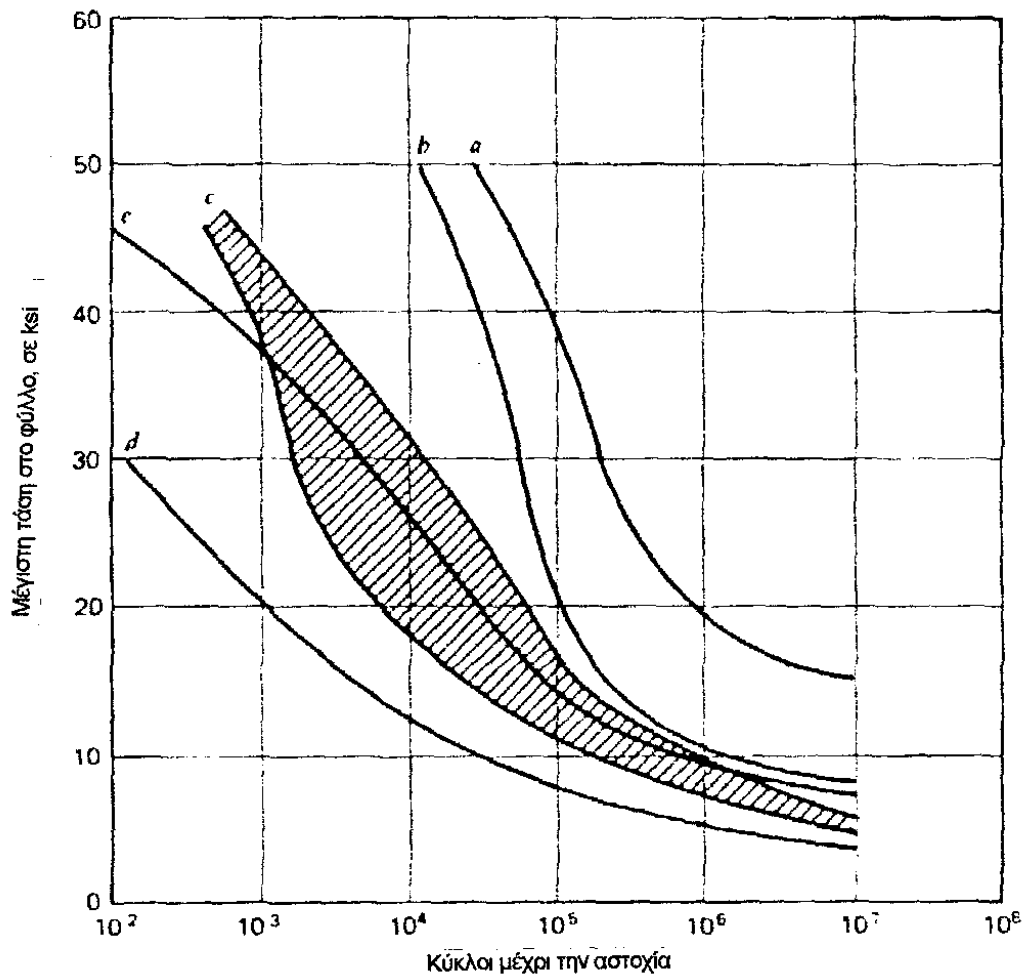
Σχήμα 42: Κόπωση σε συνδέσμους με αξονικό εφελκυσμό

Συγκρίνοντας διαφορετικά σχέδια συνδέσμων, μπορεί να ειπωθεί ότι ο ιδανικά συνδεδεμένος σύνδεσμος δεν έχει αντιστάθμιση και ότι τα λεπτότερα συγκολλητικά υλικά έχουν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων από την απλή

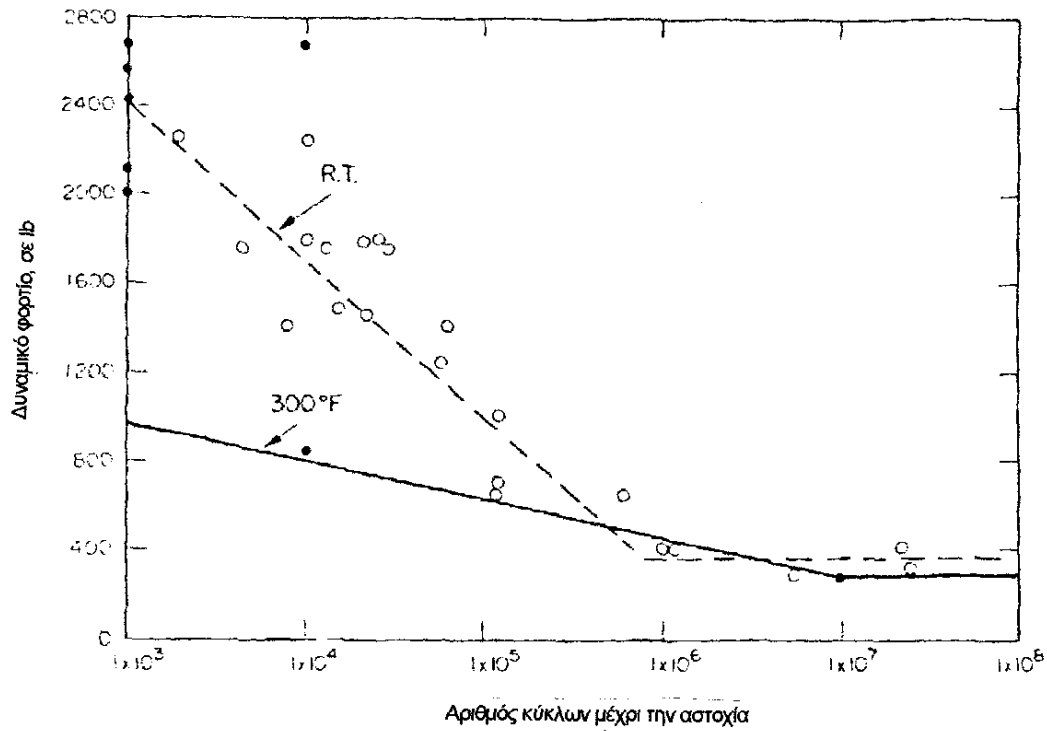
επικάλυψη και συνεπώς βελτιώνοντας την κατανομή της διατμητικής τάσης στο συγκολλητικό υλικό, ένας επικαλυπτόμενος σύνδεσμος που λεπταίνει, ενώ διατηρεί κάποια αντιστάθμιση, είναι μια βελτίωση σε βάρος της απλής επικάλυψης και εξαιτίας του συμμετρικού της συνεχιζόμενης ροής των δυνάμεων· ο διπλά επικαλυπτόμενος σύνδεσμος εξουδετερώνει την κάμψη και προμηθεύει τη μέγιστη αντοχή.

Στο σχεδιασμό τύμπανων και παρόμοιων κατασκευαστικών στοιχείων χρησιμοποιώντας συντηρητικά μεταλλικά κατασκευαστικά φύλλα, η τοπική καμπτική τάση ενός επίπεδου φύλλου, θεωρείται αναλογική με το τετράγωνο του πάχους προς το πλάτος $(t/l)^2$. Σε μια συγκολλητή κατασκευή με συνθετική ρητίνη έχει βρεθεί ότι πέρα από το πλάτος της συγκόλλησης, δύο φύλλα δρουν σαν ένα με διπλάσιο πάχος, έτσι ώστε η επιτρεπόμενη καμπτική τάση να τετραπλασιάζεται. Συγκρινόμενη με συναρμογές με πείρους ή συγκολλήσεις με πόντα, αυτή η κατάσταση προμηθεύει πολύ μεγαλύτερη ακαμψία και μειώνει σημαντικά το πλάτος επίδρασης για την κάμψη παρακείμενων συγκολλημένων φύλλων στο ίδιο επίπεδο. Οι τυπικές απαιτήσεις αντοχής είναι, για αλουμίνιο συγκολλημένο με εποξική ρητίνη, $1,8\text{kg/mm}^2$ η στατική και $0,4\text{kg/mm}^2$ στους 10^6 κύκλους, με τις συνθήκες των δοκιμών όπως στο Mil Spec MMM-A-134.

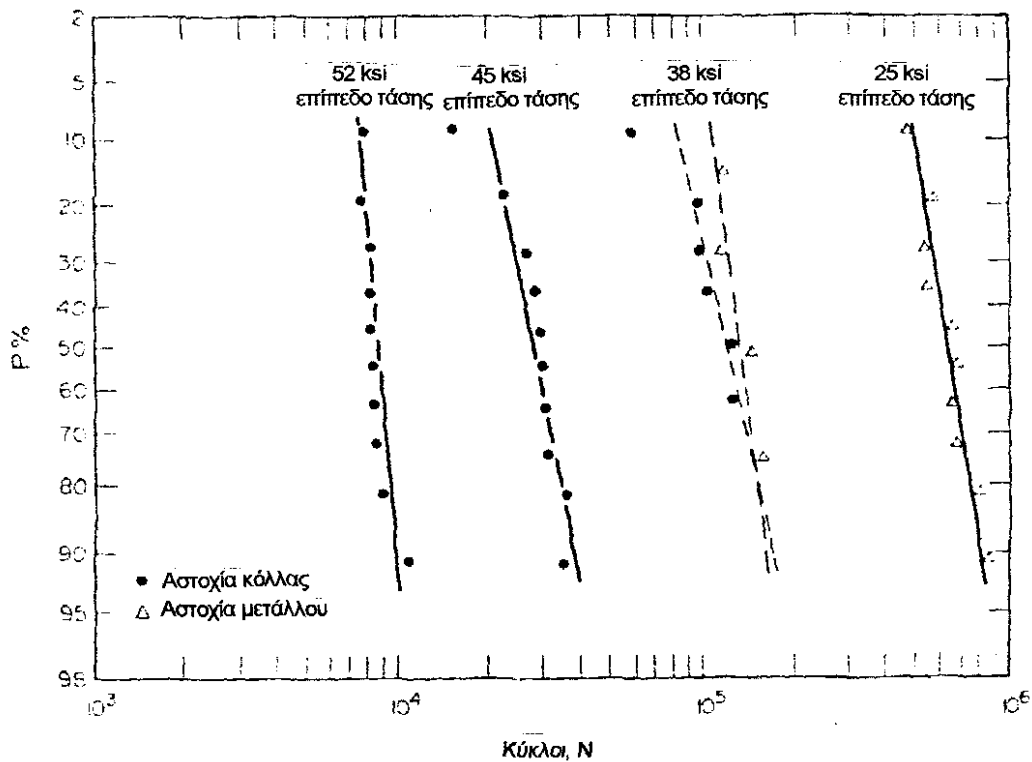
Η γενική συμπεριφορά σε κόπωση μιας ποικιλίας συνδέσμων, συγκολλητών και προσκολλημένων, απεικονίζεται στα σχήματα 41 και 45.



Σχήμα 43: Καμπύλες κόπωσης σε συνδέσμους με διάφορους παράγοντες σύνδεσης.



Σχήμα 44: Αντοχή συναρτήσεως της διάρκειας ζωής σε συγκολλημένα φύλλα.



Σχήμα 45: Καμπύλες S-N-P για αλουμίνιο 2024-T3 συγκολλημένο με FM-123-2.

Κεφάλαιο 5

5.0 Έδρανα

Τα σύγχρονα αντιτριβικά έδρανα οποιασδήποτε κλάσης ακριβείας είναι τα αποτελέσματα πολλών εκτεταμένων προσπάθειών στο σχεδιασμό, στη μεταλλουργία και στη κατασκευαστική μηχανική. Τα μεγάλα φορτία, η διάρκεια ζωής και οι ικανότητες ταχύτητας περιστροφής που είναι διαθέσιμες προμηθεύουν στο σχεδιαστή μια μεγάλη ελευθερία στην επιλογή της τελικής μορφής του εδράνου. Για να λάβουμε αυτές τις ικανότητες, τα έδρανα έχουν γίνει συναρμογές με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και ως εκ τούτου είναι ευπαθή σε φθορές. Μετά από κακομεταχείριση και λανθασμένη συντήρηση οι πιο πιθανές αιτίες αστοχίας του εδράνου είναι η μικρή ταχύτητα περιστροφής, η υπερφόρτιση και ο μη ικανοποιητικός σχεδιασμός κατά τη συναρμολόγηση. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του περιστρεφόμενου στοιχείου και της στεφάνης έχει αναγνωριστεί ευρέως σαν ένας κύριος παράγοντας για τη δημιουργία και τη διατήρηση της ταινίας του λιπαντικού. Συνεπώς η επιτρεπόμενη ταχύτητα συνδέθηκε με το επιτρεπόμενο φορτίο σαν μια βασική παράμετρος στον επιτυχή σχεδιασμό και λειτουργία των εδράνων. Η κατασκευή εδράνων ακριβείας, οποιουδήποτε επιπέδου πάνω από αυτό των πατινιών, εξαρτάται αυστηρά από το ταλέντο και την ανάγκη έρευνας και δραστηριότητας ανάπτυξης αφού ο αριθμός των κατασκευαστών είναι μάλλον μικρός. Αυτές οι εταιρίες οργάνωσαν τον A.F.B.M.A. για να παρουσιάσουν στον χρήστη δεδομένα εδράνων για τη λειτουργία και μεθόδους υπολογισμού του φορτίου και της διάρκειας ζωής.

Έχουν γίνει αποδεκτές συγκεκριμένες πρακτικές παράμετροι και επίπεδα συντηρητισμού σαν αποτέλεσμα εκτίμησης πολλών συσσωρευμένων δεδομένων. Αυτές οι παράμετροι για τον υπολογισμό της λειτουργίας των εδράνων είναι:

- 1) Η βασική εκτίμηση του φορτίου, C , ορισμένο σαν το φορτίο το οποίο θα αντέξει για 10^6 περιστροφές της εσωτερικής στεφάνης κατά το 90% ενός γκρουπ σχεδόν παρόμοιων εδράνων.
- 2) Η μέση ζωή ενός γκρουπ εδράνων, L_{50} , ορισμένη σαν τη ζωή που είναι το αποτέλεσμα μιας κατά 50% επιζώσας αναλογίας.
- 3) Η εκτίμηση ζωής ή καταλόγου, L_{10} , ορισμένη σαν τη ζωή που είναι το αποτέλεσμα μιας κατά 90% επιζώσας αναλογίας.

Τα αποτελέσματα των τυποποιημένων υπολογισμών για τη διάρκεια ζωής και το φορτίο, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων παραγόντων καταλόγου, χαρακτη-

ρίζονται από ένα μεγάλο βαθμό συντηρητισμού· η εγκυρότητα αυτών των αποτελεσμάτων υποστηρίζεται από ένα μεγάλο ποσοστό δεδομένων και πείρας. Είναι διαθέσιμες διάφορες διαδικασίες για τη μεταχείριση αυτής της «μη τυποποιημένης» απαίτησης, εξαρτώμενες από τον τύπο της κατάστασης του προβλήματος.

Η συνηθισμένη παραδοχή είναι ότι η αστοχία των εδράνων οφείλεται στην κόπωση. Αφού τα τελευταία είναι τυχαία στη φύση, θα τείνουν να ακολουθούν στατιστικές προβλέψεις· αλλά αφού η αστοχία των εδράνων δεν πραγματοποιείται σε μια σταθερή αναλογία, η βασική κατανομή του Poisson παραβλέπεται προς όφελος του Weibull, εκφρασμένης σαν:

$$P_s = \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (\text{Σχέση 33})$$

όπου: P_s = πιθανότητα επιβίωσης του εδράνου χωρίς αστοχία για δεδομένο χρόνο

t = χρόνος

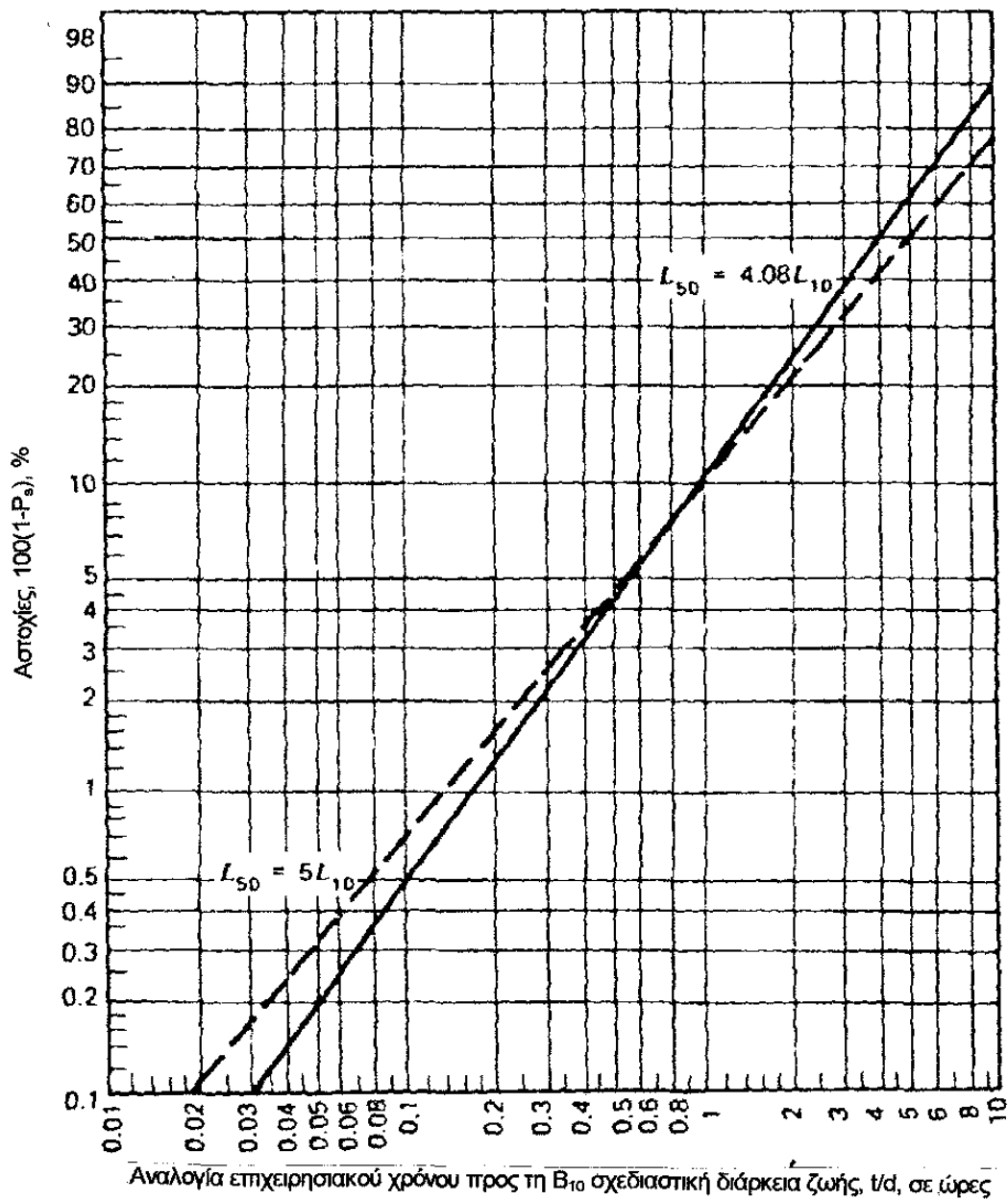
θ = πολλαπλασιαστής για τη σχεδιαστική ζωή (σταθερά).

β = λογαριθμικός εκθέτης λειτουργίας του Weibull. Αν $\beta=1$ τότε έχουμε την εξίσωση του Poisson.

Η καμπύλη του Weibull δημιουργείται στις συντεταγμένες της επί τοις εκατό αστοχίας (τεταγμένη) και της αναλογίας του επιχειρησιακού χρόνου στη B_{10} σχεδιασμένη ζωή (τετμημένη). Είναι διαθέσιμες δύο τιμές τεταγμένων από τα δεδομένα για τη ζωή, $P_s=0,90$ και $P_s=0,50$ · είναι γνωστές δύο ανταποκρινόμενες τιμές τετμημένων για κάθε τεταγμένη. Οι δύο καμπύλες σχεδιάστηκαν στο σχήμα 46. Τότε η πιθανότητα επιβίωσης του εδράνου, για την οποία η μέση ζωή των 5 (ή 4,08) φορές η B_{10} σχεδιαστική ζωή d , έχει ήδη καθοριστεί και δίνεται από το τύπο:

$$\frac{t}{d} = (9.49 \cdot \log_e P_s)^{0.746} \quad \text{για } t/d=4.08 \cdot B_{10} \quad (\text{Σχέση 34})$$

$$\frac{t}{d} = (9.49 \cdot \log_e P_s)^{0.856} \quad \text{για } t/d=5 \cdot B_{10} \quad (\text{Σχέση 35})$$



Σχήμα 46: Διάγραμμα του Weibull για την επιχειρησιακή ζωή των εδράνων.

Η απαιτούμενη σχεδιαστική ζωή είναι τότε $d = \frac{t}{(t/d)}$

Φυσιολογικά η αξιοπιστία P_s και ο απαιτούμενος χρόνος t είναι γνωστά· για ευκολία στον καθορισμό της σχεδιαστικής ζωής έχουν τοποθετηθεί οι καμπύλες και ο πίνακας 16.

Πίνακας 16: Αναλογία του επιχειρησιακού χρόνου προς τη B₁₀ σχεδιαστική διάρκεια ζωής για διάφορες πιθανότητες επιβίωσης.

| Πιθανότητα επιβίωσης για χρόνο t P _s | Αναλογία επιχειρησιακού χρόνου προς τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής | |
|--|--|---------------------|
| | t/d για μέση ζωή=4.08d | t/d για μέση ζωή=5d |
| 0.995 | 0.1030 | 0.0740 |
| 0.99 | 0.1785 | 0.1395 |
| 0.98 | 0.2910 | 0.2440 |
| 0.97 | 0.396 | 0.3460 |
| 0.96 | 0.492 | 0.4445 |
| 0.95 | 0.584 | 0.5405 |
| 0.94 | 0.672 | 0.6341 |
| 0.93 | 0.756 | 0.7261 |
| 0.92 | 0.840 | 0.8191 |
| 0.91 | 0.921 | 0.9101 |
| 0.90 | 1.000 | 1.000 |
| 0.85 | 1.383 | 1.450 |
| 0.80 | 1.750 | 1.900 |
| 0.75 | 2.120 | 2.364 |
| 0.70 | 2.435 | 2.835 |
| 0.65 | 2.860 | 3.331 |
| 0.60 | 3.250 | 3.850 |
| 0.55 | 3.600 | 4.340 |
| 0.50 | 4.080 | 5.000 |
| 0.45 | 4.540 | 5.650 |
| 0.40 | 5.03 | 6.345 |
| 0.35 | 5.56 | 7.150 |
| 0.30 | 6.16 | 8.040 |
| 0.25 | 6.84 | 9.040 |
| 0.20 | 7.65 | 10.06 |
| 0.15 | 8.64 | 11.80 |
| 0.10 | 10.00 | 14.00 |
| 0.05 | 12.40 | 17.55 |
| 0.01 | 16.40 | 25.15 |

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί και μια άλλη κοινή απαίτηση, δηλαδή η σχέση της αξιοπιστίας και του ισοδύναμου ακτινικού φορτίου, σε μια απαιτούμενη

διάρκεια ζωής με την ταξινόμηση του καταλόγου των υπολογισμών του βασικού φορτίου. Η εξίσωση του Weibull ξαναγράφεται με τη μορφή:

$$\frac{R_e}{c} = \left(\frac{\theta}{L}\right)^{1/a} \cdot \left(\ln \frac{1}{P_s}\right)^{1/a \cdot b} \quad (\text{Σχέση 36})$$

όπου: R_e =ισοδύναμο ακτινικό φορτίο σε kg.

c =υπολογισμός βασικού φορτίου σε kg.

θ =εκθετική παράμετρος, όπως στην σχέση 33.

L =διάρκεια ζωής σε εκατομμύρια περιστροφές.

P_s =αξιοπιστία ή πιθανότητα επιβίωσης, όπως στην σχέση 33.

a, b =εκθετικές σταθερές.

Για μέση διάμετρο στον υπολογισμό μιας διάρκειας ζωής της τάξης του 5 και με $P_s=0,50$ και $0,10$ η θ εκτιμήθηκε σαν $6,84$ και η β σαν $1,17$. Για ένσφαιρα έδρανα, $a=3,00$ · για βαρελοειδή έδρανα $a=3,33$. Τότε η εξίσωση 36 γίνεται:

$$\frac{R_e}{c} = \frac{1.898}{L^{0.333}} \cdot \left(\ln \frac{1}{P_s}\right)^{0.285} \quad (\text{Σχέση 37})$$

Και

$$\frac{R_e}{c} = \frac{1.870}{L^{0.3}} \cdot \left(\ln \frac{1}{P_s}\right)^{0.257} \quad (\text{Σχέση 38})$$

για ένσφαιρα και βαρελοειδή έδρανα αντίστοιχα. Οι σχέσεις 37 και 38 έχουν γραφική παράσταση όπως στο σχήμα 47 και είναι εμφανής η ομοιότητα με το σχήμα 46. Στο τελευταίο η αξιοπιστία σχετίζεται με την αναλογία των διαρκειών ζωής, ενώ στο προηγούμενο η απαιτούμενη ζωή σχετίζεται με την αναλογία φορτίων για ένα συγκεκριμένο διάστημα αξιοπιστίας. Τα σχήματα 47α και 47β είναι ιδιαίτερα χρήσιμα γιατί συνδέουν όλες τις φυσιολογικά απαιτούμενες παραμέτρους και έχουν προστεθεί δεδομένα στις καμπύλες στην περιοχή όπου $P_s > 0,90$ όπου η κατανομή του Weibull γίνεται μη ακριβής. Αναφορικά στη κλασσική σχέση του σχήματος 48, αν θα πρέπει να αυξηθεί η αξιοπιστία, θα πρέπει να μειωθεί η πιθανή διάρκεια ζωής.

5.1 Επίδραση του φορτίου πριν τη λειτουργία στη διάρκεια ζωής του εδράνου

Οι λόγοι για τους οποίους έχουμε πιο πολλές εφαρμογές με έδρανα με φορτίο πριν τη λειτουργία, είναι ότι αυτή η κατάσταση αυξάνει την ακαμψία του εδράνου και μειώνει την απώλεια κίνησης και του παιξίματος. Η προφόρτιση, είτε

αξονική, είτε ακτινική επηρεάζει εξίσου τη διάρκεια ζωής γιατί η περιφερειακή φόρτιση είναι τόξο του εδράνου που είναι μια λειτουργία του συνολικού φορτίου.

Όσο μακρύτερο είναι το τόξο φόρτισης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυλιόμενων στοιχείων, πάνω στα οποία κατανέμεται το συνολικό φορτίο και συνεπώς μειώνεται το φορτίο σε κάθε στοιχείο. Το κατάλληλο φορτίο πριν τη λειτουργία για μέγιστη διάρκεια ζωής είναι αυτό το φορτίο το οποίο μαζί με το εφαρμοζόμενο θα εκτείνουν το τόξο ακριβώς στις 180°. Ένα επιπρόσθετο φορτίο πριν τη λειτουργία απλώς θα αυξήσει την τάση σε κάθε στοιχείο και θα μειώσει τη διάρκεια ζωής.

Το μήκος του περιφερειακού τόξου ή της «ζώνης φόρτισης» λαμβάνεται με τη μορφή της προβολής του στη βηματική διάμετρο, ε , με ταυτόχρονη λύση:

$$F = Z \cdot K \cdot J \cdot \left(\delta - \frac{c}{2} \right)^n \quad (\text{Σχέση 39})$$

Και
$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{c}{2 \cdot \delta} \right) \quad (\text{Σχέση 40})$$

2

όπου: F=το εφαρμοζόμενο φορτίο.

Z=ο αριθμός σφαιρών ή ροδελών.

K=η σταθερά προβολής που ορίζεται παρακάτω.

c=η διαμετρική χάρη.

J=ο παράγοντας ακτινικού φορτίου που δίνεται από το σχήμα 49.

η =εκθέτης=1,5 για έδρανα με σφαίρες και 1,1 για έδρανα με ροδέλες.

Η σταθερά προβολής για ένσφαιρα έδρανα είναι:

$$K = 1.53 \cdot 10^7 \cdot D^{0.5} \quad (\text{Σχέση 41})$$

και για έδρανα με ροδέλες είναι:

$$K = 5.28 \cdot 10^6 \cdot L_r^{0.89} \quad (\text{Σχέση 41 .α})$$

όπου: D=διάμετρος σφαιρών.

L_r =μήκος επίδρασης των ροδελών.

Οι σχέσεις 39 και 40 λύνονται ως προς ε :

- 1) Υποθέτουμε μια τιμή για το ε με σωστή πρακτική σχεδιασμού το ε είναι συνήθως μεταξύ 0,5 και 1,0.
- 2) Βρείτε το J στο σχήμα 49.

3) Λύνουμε την σχέση 39 ως προς δ .

4) Αντικαθιστούμε το δ στην σχέση 40 και λύνουμε ως προς ε .

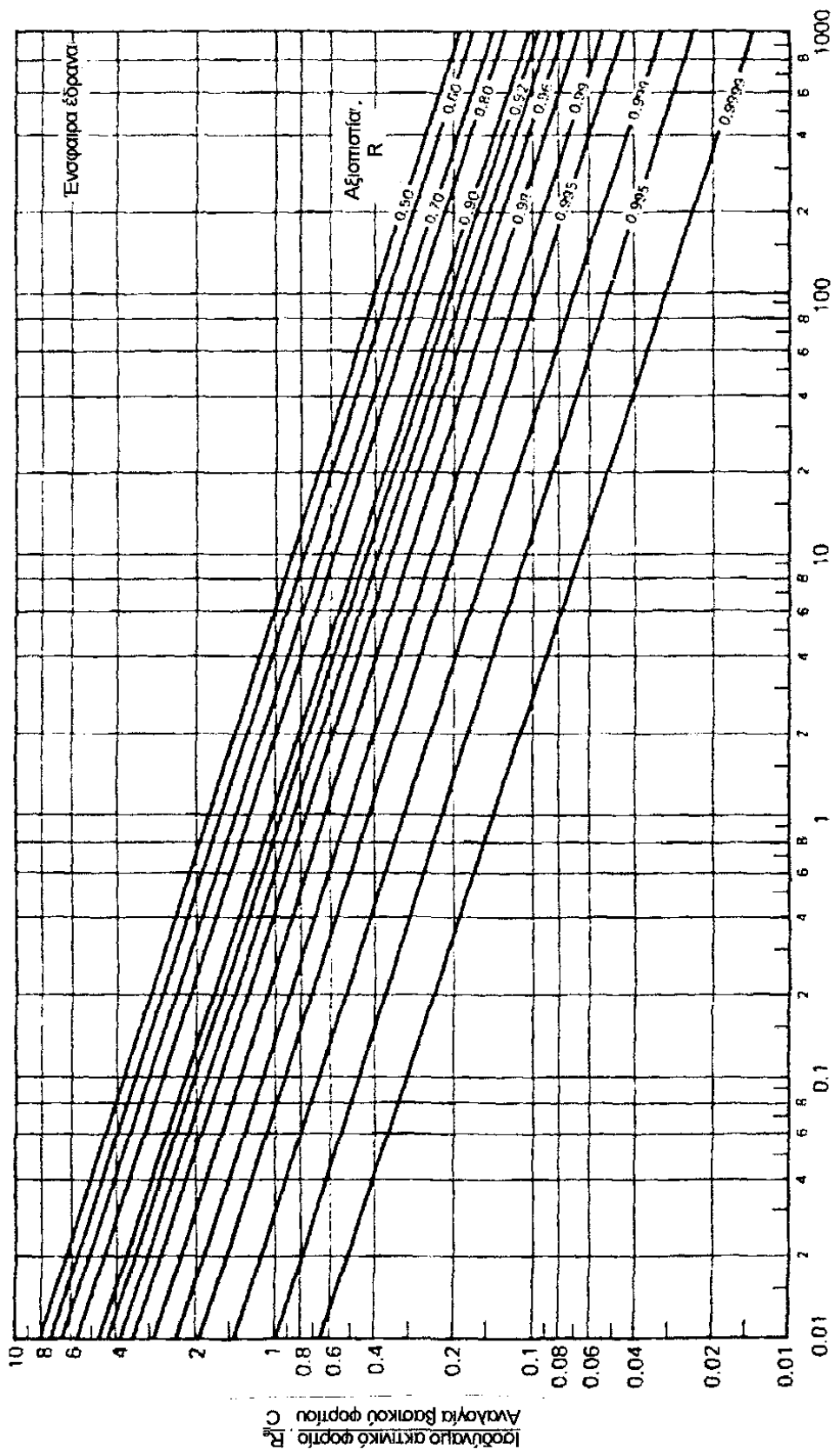
Συγκρίνουμε το ε με την υποτιθέμενη αρχική τιμή και επαναλαμβάνουμε μέχρις ότου η διαφορά είναι μικρότερη από 0,01.

Η σχέση μεταξύ του ε και του παράγοντα ρύθμισης ζωής λ δίνεται στο σχήμα 50· εφαρμόζεται στο L_{10} ή στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής σε κόπωση από τις σχέσεις 42 και 43:

για ένσφαιρα έδρανα:
$$L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{c}{F} \right)^3 \quad (\text{Σχέση 42})$$

για έδρανα με ροδέλες:
$$L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{c}{F} \right)^{10/3} \quad (\text{Σχέση 43})$$

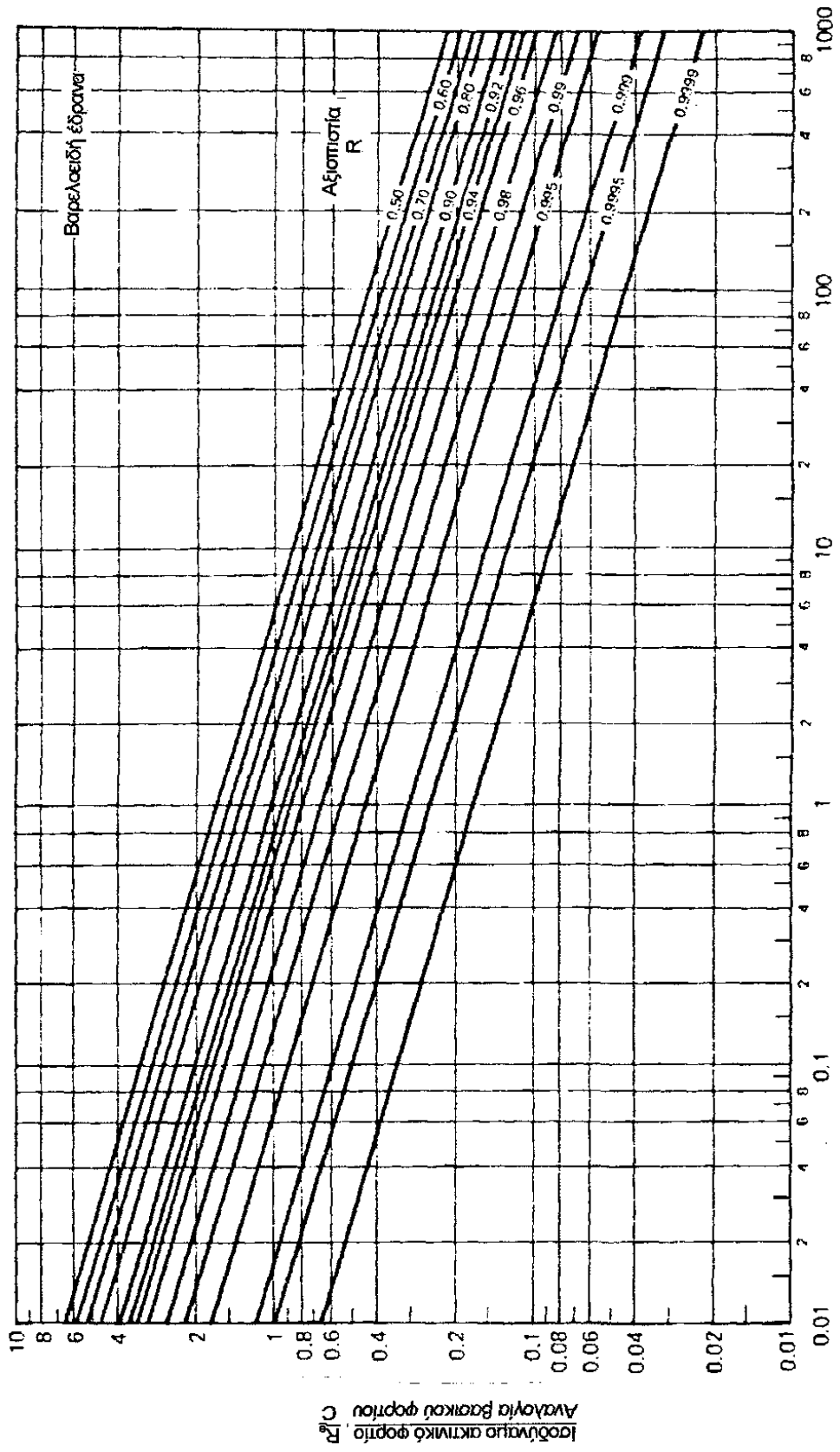
Βασικά το λ υπολογίζεται για την επίδραση στη διάρκεια ζωής σε κόπωση της διαμετρικής χάρης, είτε θετική, είτε αρνητική. Σε έδρανα χωρίς φορτίο πριν τη λειτουργία οι διαμετρικές χάρες είναι θετικές και οι αντιπροσωπευτικές τιμές του λ είναι από 0,7 ως 1,0· συνεπώς το λ εξαιτίας της τιμής του, συχνά καλείται παράγοντας μείωσης. Για έδρανα με φορτίο πριν τη λειτουργία παίρνουμε εύκολα τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, υποδεικνύοντας έτσι τα πλεονεκτήματα του κατάλληλου φορτίου πριν τη λειτουργία, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυξάνοντας το φορτίο πριν τη λειτουργία πάνω από $\varepsilon \sim 1,0$ το λ αρχίζει να μειώνεται γρήγορα υποδεικνύοντας την αρκετά μικρότερη ζωή όταν έχουμε υπερβολικά μεγάλο φορτίο πριν τη λειτουργία.



α) Ένσφαιρα έδρανα

Διάρκεια ζωής έδρανου, L , (εκατομύρια επαναλήψεις)

(α)

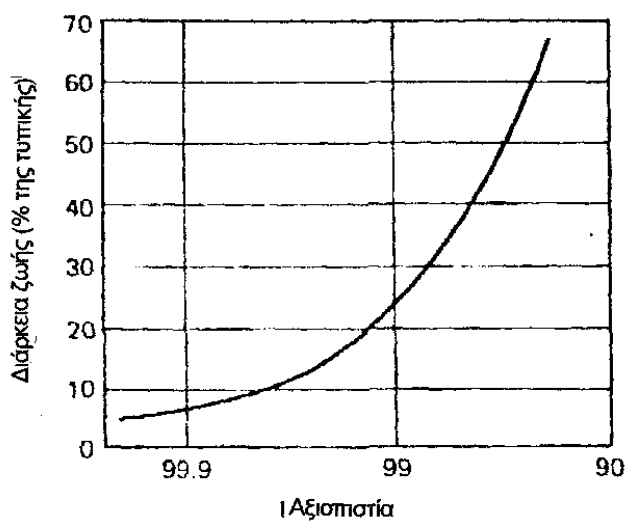


Διάφορα ζωής εδράνου, L , (εκατομύρια επαναλήψεις)

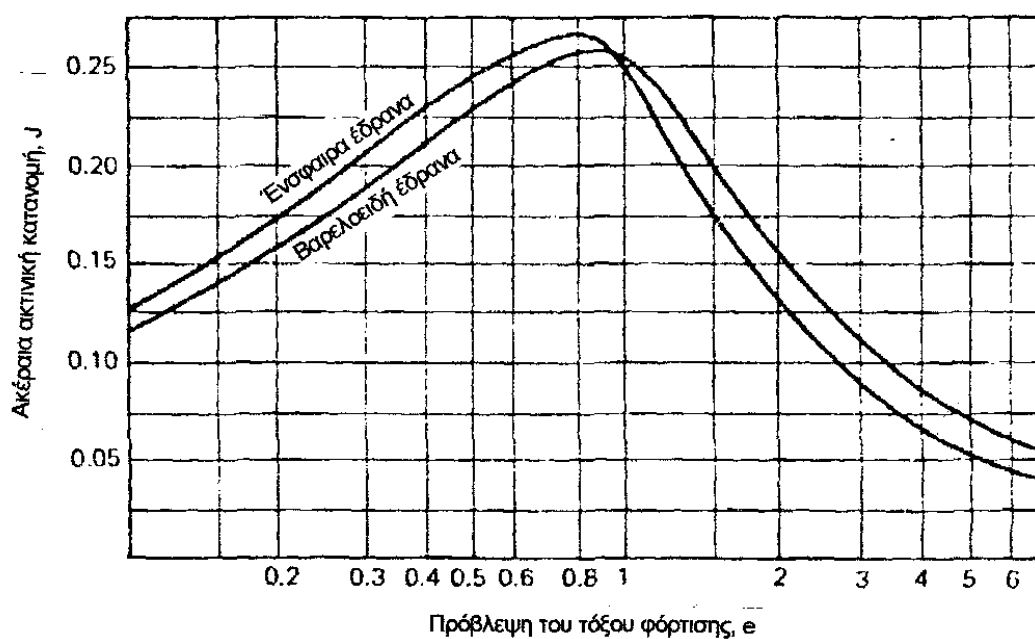
(β)

β) Βαρελοειδή έδρανα

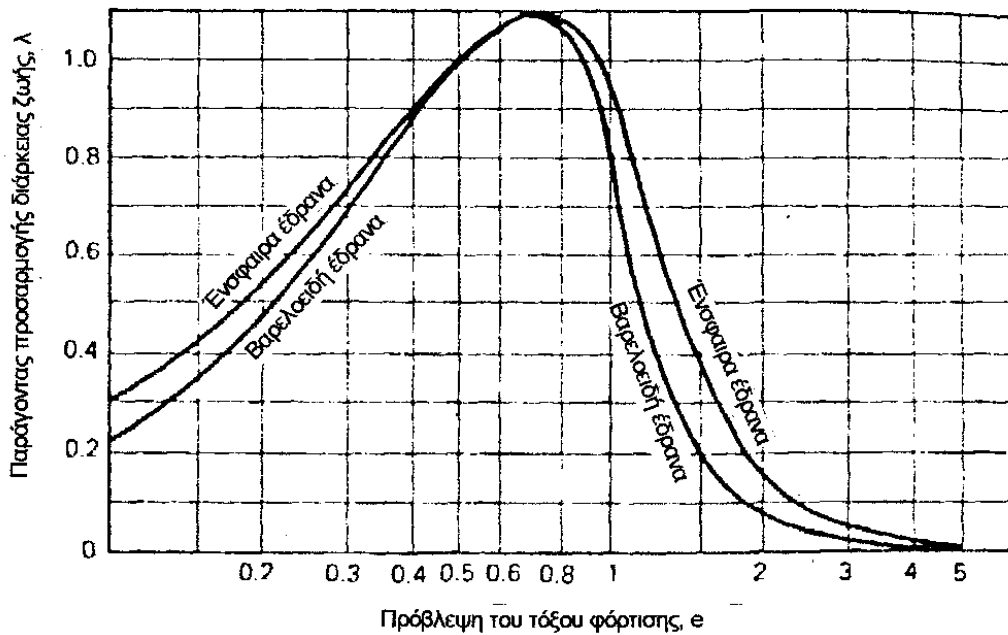
Σχήμα 47: Καμπύλες ζωής για αντιτριβικά έδρανα.



Σχήμα 48: Διάρκεια ζωής σε κόπωση του εδράνου συναρτήσκει της αξιοπιστίας.



Σχήμα 49: Ακτινικός παράγοντας φορτίου, J συναρτήσκει της ζώνης προβολής της φόρτισης, ϵ . Για καλύτερα αποτελέσματα είναι καλό να σχεδιάσουμε με $0,5 < \epsilon < 0,9$.



Σχήμα 50: Παράγοντας μείωσης της διάρκειας ζωής σε κόπωση, λ συναρτήσει του ε . Αφού οι πιο επιθυμητές τιμές του λ είναι μεγαλύτερες του 1, το ε θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,5 και 0,9.

Το ποσό του κατάλληλου φορτίου πριν τη λειτουργία το βρίσκουμε εξαναγκάζοντας δύο διπλά έδρανα, που βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα, να απορροφήσουν ένα επιβαλλόμενο ποσό αξονικής αντιστάθμισης μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών στεφανών τους. Η αντιστάθμιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με αξονική προβολή του προσώπου της μιας στεφάνης προσθέτοντας μια σφήνα ή αν πρόκειται για έδρανα που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, χρησιμοποιούμε έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό αποστάτη με ελαφρώς διαφορετικά μήκη. Σαν παράδειγμα υπολογισμού του ποσού του φορτίου ή της αξονικής απόκλισης, θεωρούμε το συνηθισμένο ζευγάρι των γωνιακών ένσφαιρων εδράνων επαφής που φαίνονται στο σχήμα 51. Συμπεριλαμβανομένου και του εφαρμοζόμενου ωστικού φορτίου T , η συνθήκη ισορροπίας απαιτεί ότι:

$$T = F_1 - F_2 \quad (\text{Σχέση 44.α})$$

όπου τα F_1 και F_2 είναι τα ωστικά φορτία στα έδρανα 1 και 2.

Χωρίς φορτίο πριν τη λειτουργία ισχύει $F_1 = F_2$. Οι σχέσεις 45 και 46 συσχετίζουν την αξονική αντιστάθμιση δ και το φορτίο πριν τη λειτουργία F :

$$F_j = Z \cdot D \cdot G \cdot \sin \alpha \cdot \left(\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} - 1 \right)^{1.5} \quad (\text{Σχέση 45})$$

$$\delta_j = B \cdot D \cdot \left[-\frac{\sin(a - a_0)}{\cos a} \right] \quad (\text{Σχέση 46})$$

όπου: a_0 =αρχική γωνία επαφής κάτω από μηδενικό φορτίο.

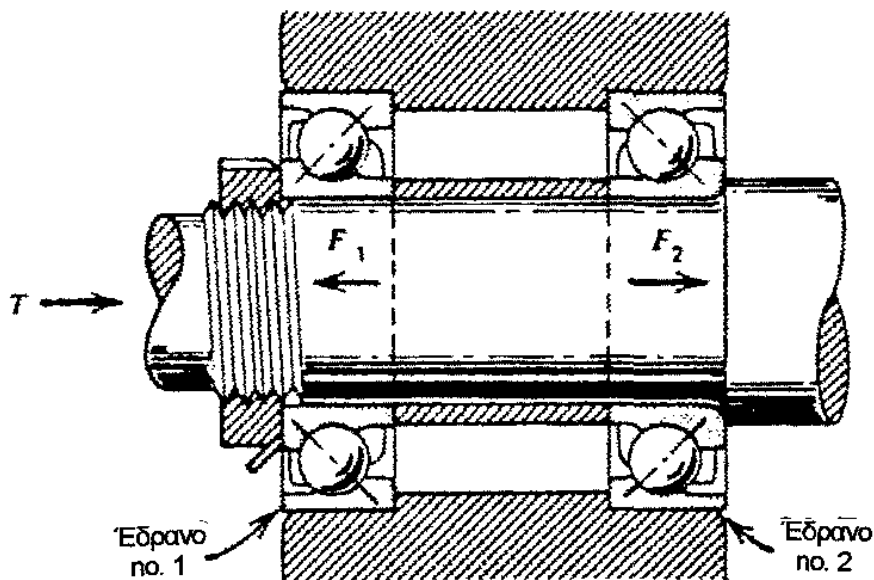
a =τελική γωνία επαφής κάτω από μηδενικό φορτίο.

G =σταθερά αξονικής απόκλισης συσχετιζόμενη με το B από την καμπύλη του σχήματος 52.

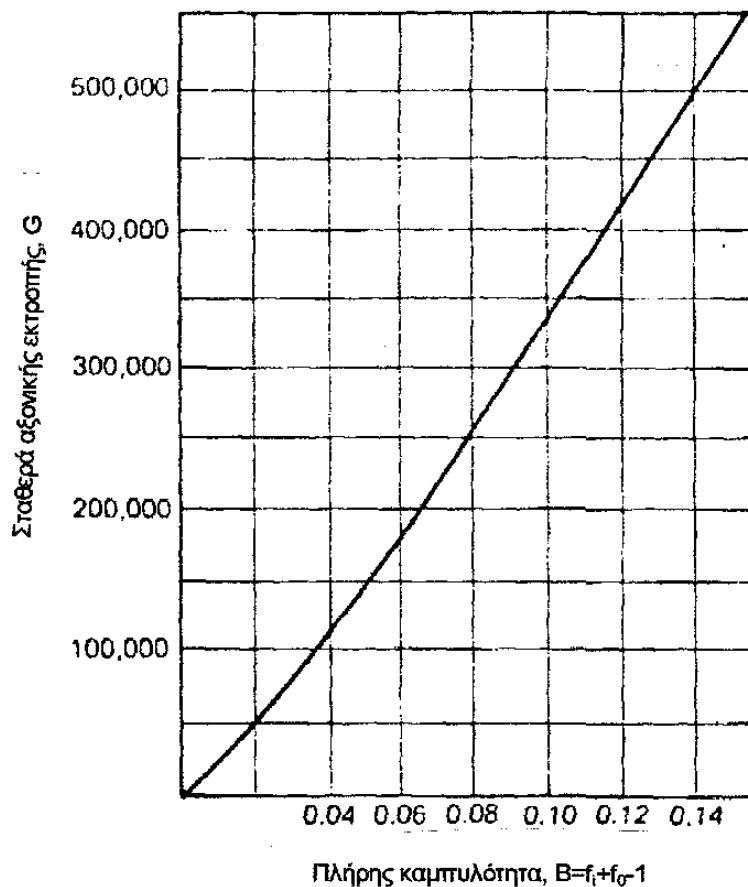
B =σταθερά που αποκομίζεται από τις εσωτερικές και εξωτερικές καμπυλότητες των στεφανών των εδράνων f_i και f_o .

$$B = f_i + f_o - 1 \quad (\text{Σχέση 47})$$

Ο δείκτης j σχετίζεται με το συγκεκριμένο αριθμό εδράνου 1 ή 2 σε ένα διπλό σετ.



Σχήμα 51: Σετ διπλών εδράνων με προφόρτιση στο οποίο εφαρμόζεται ένα εξωτερικό θλιπτικό φορτίο.



Σχήμα 52: Σταθερά αξονικής εκτροπής, G , συναρτήσει των καμπυλοτήτων των εσωτερικών και εξωτερικών αυλακίων των σφαιρών, f_i και f_o .

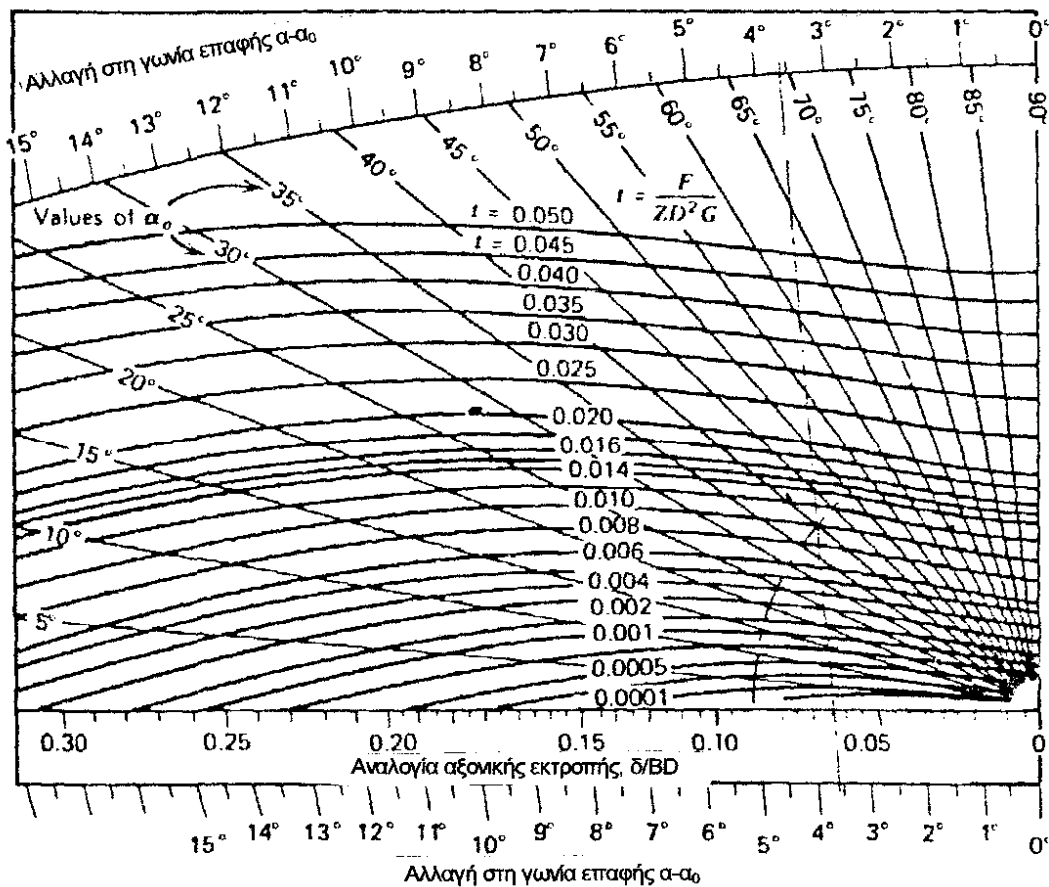
Οι τιμές των Z , D και α_0 στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να ληφθούν από τους κατασκευαστές των εδράνων. Το αξονικό φορτίο πριν τη λειτουργία, F , συνήθως είναι γνωστό ή υποτίθεται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Από το σχήμα 52 παίρνουμε μια τιμή για το G βασισμένη για την ήδη υπολογισμένη τιμή του B (από την σχέση 47). από τον πίνακα του σχήματος 53 παίρνουμε άλλους ενδιαφέροντες παράγοντες όπως:

- 1) Υπολογίζουμε μια σταθερά t από τους γνωστούς παράγοντες στο πρώτο μέλος της εξίσωσης 45 κάνοντας το t ίσο με:

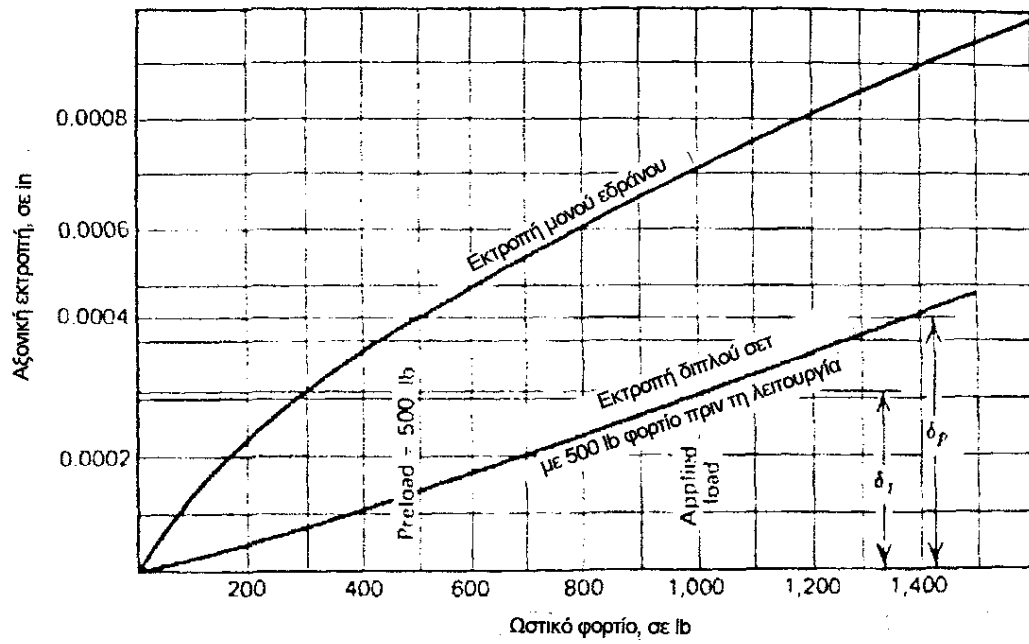
$$t = \frac{F}{Z \cdot D^2 \cdot G} \quad (\text{Σχέση 48})$$

- 2) Στο σχήμα 53 προσδιορίζουμε το σημείο τομής της γραμμής του t και της ακτινικής γραμμής της α_0 . Στις καμπύλες για παράδειγμα είναι $t=0,01$ και $\alpha_0=40^\circ$.

- 3) Διαμέσου του προσδιορισμένου σημείου στρέφουμε σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού.
- 4) Στο σημείο τομής αυτού του τόξου και της γραμμής των τετμημένων (όπου $\alpha_0=0$), προσδιορίζουμε την τιμή του $\delta/B \cdot D$.
- 5) Ευθυγραμμίζουμε ένα κανόνα (χάρακα) διαμέσου της τομής του t και της α_0 έτσι ώστε ο κανόνας να είναι παράλληλος με παρόμοια αριθμημένα σημεία πάνω και κάτω των κλιμάκων του $\alpha-\alpha_0$.



Σχήμα 53: Σχεδιαστικός χάρτης για τον υπολογισμό της αξονικής εκτροπής, δ , υπό φορτίο και η αποτελεσματική αλλαγή στη γωνία επαφής α .



Σχήμα 54: Αξονική εκτροπή συναρτήσει του θλιπτικού φορτίου για απλούς υπολογισμούς.

Πίνακας 17: Υπολογισμοί φορτίου-εκτροπής για τις εφαρμογές.

| <u>ΠΙΝΑΚΑΣ Α</u> | | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------------------|------------|
| F_i | $T=F_i/ZD^2G$ | δ_i/BD | $\alpha_i-\alpha_0$ | δ_i |
| 200 | 0.0005 | 0.012 | 0.5 | 0.00024 |
| 400 | 0.0010 | 0.019 | 0.8 | 0.00038 |
| 600 | 0.0015 | 0.025 | 1.05 | 0.00050 |
| 800 | 0.0019 | 0.029 | 1.2 | 0.00058 |
| 1000 | 0.0024 | 0.034 | 1.4 | 0.00068 |
| 1200 | 0.0029 | 0.039 | 1.6 | 0.00078 |
| 1400 | 0.0034 | 0.044 | 1.8 | 0.00088 |
| 1600 | 0.0039 | 0.049 | 2.0 | 0.00098 |

| <u>ΠΙΝΑΚΑΣ Β</u> | | | | | |
|------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|------|
| δ_i | $\delta_p+\delta_t$ | F_1 | $\delta_p-\delta_t$ | F_2 | T |
| 0.0001 | 0.00054 | 670 | 0.00034 | 340 | 330 |
| 0.0002 | 0.00064 | 870 | 0.00024 | 200 | 670 |
| 0.0003 | 0.00074 | 1070 | 0.00014 | 100 | 970 |
| 0.0004 | 0.00084 | 1290 | 0.00004 | 20 | 1270 |

| <u>ΠΙΝΑΚΑΣ C</u> | | | | | | |
|------------------|------------------------|-------|--------|------------------------|-------|------|
| δ_i | $\delta_{p1}+\delta_t$ | F_1 | $2F_1$ | $\delta_{p2}-\delta_t$ | F_2 | T |
| 0.0001 | 0.00038 | 400 | 800 | 0.00034 | 340 | 460 |
| 0.0002 | 0.00048 | 570 | 1140 | 0.00024 | 200 | 940 |
| 0.0003 | 0.00058 | 760 | 1520 | 0.00014 | 100 | 1420 |

| <u>ΠΙΝΑΚΑΣ D</u> | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------|------|
| Γωνία επαφής | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Παράγοντας Υ (επίδραση της προφόρτισης στη διάρκεια ζωής του εδράνου | | 1,00 | 0,87 | 0,76 | 0,66 | 0,57 |

5.2 Επιδράσεις της ταχύτητας, της λίπανσης και των υλικών

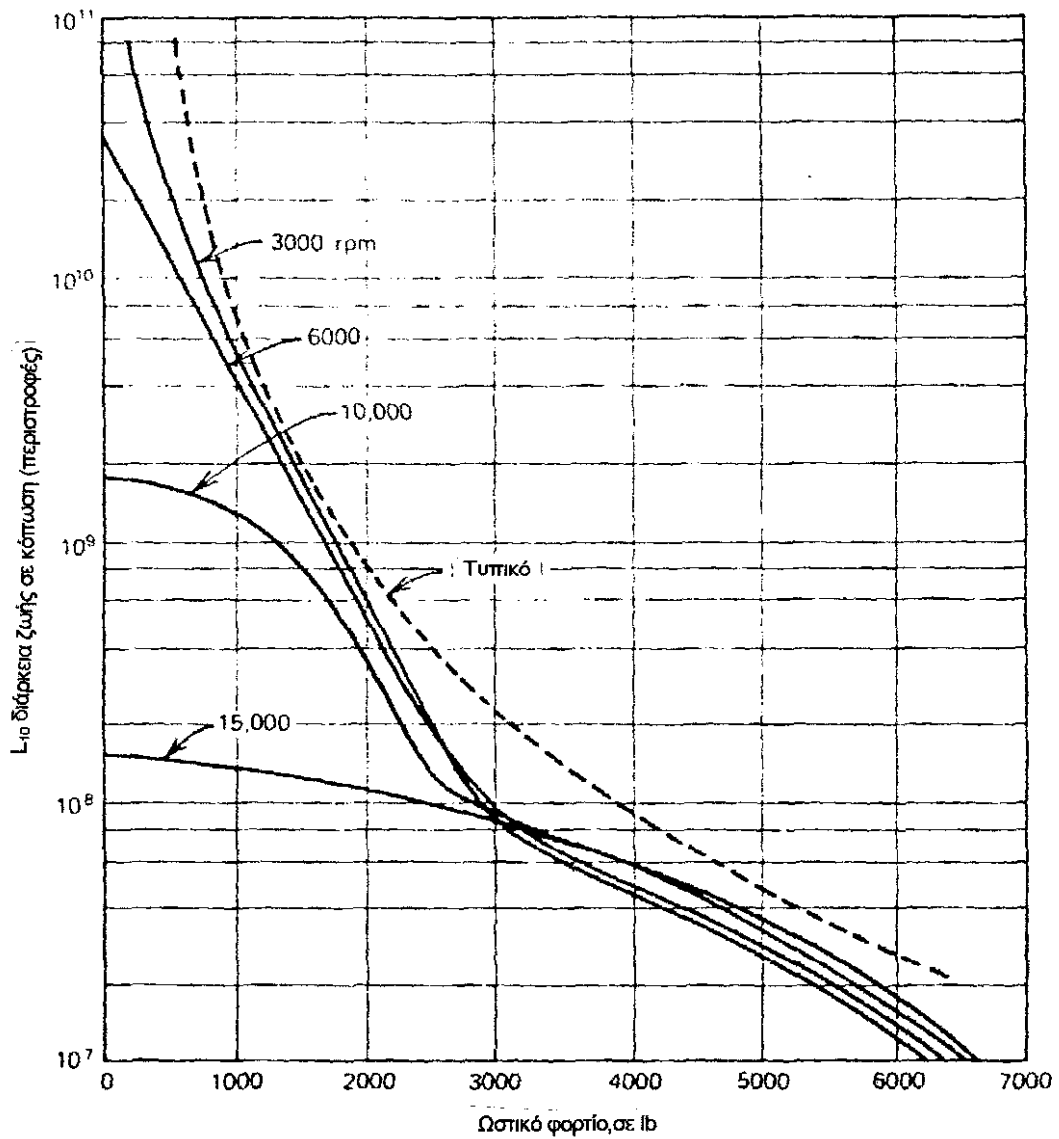
Οι επιδράσεις αυτών των παραμέτρων στη διάρκεια ζωής σε κόπωση των εδράνων με σφαίρες και με ροδέλες, συνδέεται με ένα πολύπλοκο θέμα. Υπάρχουν δύο γενικά επίπεδα αντιμετώπισης του προβλήματος: 1) ο συντηρητικός υπολογισμός με το χέρι των κύριων φορτίων, των εκτροπών και ούτω καθεξής, οδηγώντας σε μια εκτίμηση διάρκειας ζωής χωρίς μεγάλη ακρίβεια, που συχνά ακολουθείται από ένα άφθονο (μεγάλο) συντελεστή ασφαλείας, όπως για παράδειγμα τρία (3) για το φορτίο και δέκα (10) για τη διάρκεια ζωής· και 2) η πιο περιεκτική και σοφιστική προσέγγιση για να συμπεριέχει τις επιδράσεις της φυγόκεντρου δύναμης στη γωνία επαφής και τις γυροσκοπικές στιγμές των σφαιρών. Ο Harris υποδεικνύει ότι η εκτίμηση ενός εδράνου υψηλής ταχύτητας που καταπονείται από θλιπτική μη συνεπίπεδη φόρτιση απαιτεί τη λύση ενός συστήματος με περισσότερες από 85 μη γραμμικές εξισώσεις, που είναι μια δουλειά για υπολογιστή. Τα σχεδιαστικά προβλήματα εδράνων προσπαθούν τις περισσότερες φορές να κατασκευάσουν ένα έδρανο για μεγάλες ταχύτητες και φορτία, συναρμολογούμενα σε μια υποδοχή άγνωστης αντοχής. Αυτή η κατάσταση περιέχει ένα σημαντικό ενδεχόμενο για ολική αστοχία.

Η επίδραση της αυξανόμενης ταχύτητας στη διάρκεια ζωής είναι βασικά μια αύξηση στο φορτίο λειτουργίας και της χάρης εξαιτίας της φυγόκεντρης δύναμης, με μια αντίστοιχη μείωση της ζώνης φόρτισης. Επίσης αυξανόμενης της ταχύτητας, αλλάζουν οι γωνίες επαφής και πιο συγκεκριμένα αυξάνονται στο εσωτερικό αυλάκι και μειώνονται στο εξωτερικό. Τα έδρανα γωνιακής επαφής είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σ' αυτή την επίδραση και στην ακραία περίπτωση μη συμμετρικής φόρτισης μπορεί να έχουμε διαφορετικές γωνίες επαφής και φορτία στις σφαίρες σε κάθε θέση της σφαίρας στην ακτινική διαδρομή. Το σχήμα 55 απεικονίζει τη μεταβολή της L_{10} διάρκειας ζωής στην κόπωση για ένα δεδομένο έδρανο γωνιακής επαφής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής και του φορτίου.

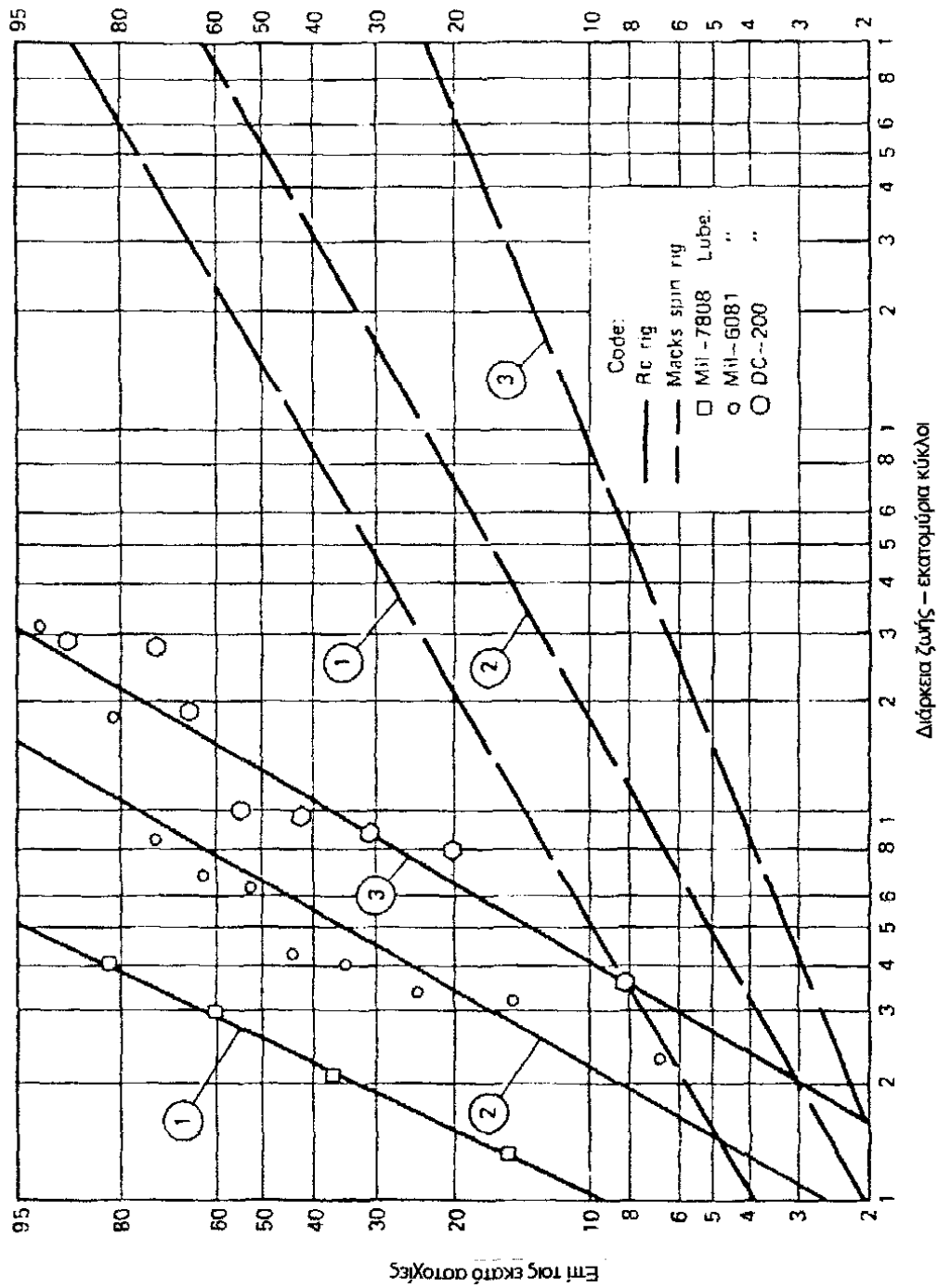
Η εκλογή του λιπαντικού του εδράνου και του χώρου γύρω του είναι συχνά μια μάλλον υποκειμενική πράξη, αλλά επηρεάζεται από τις βασικές έννοιες ότι η ταινία του λιπαντικού θα πρέπει να είναι συγκεκριμένης αντοχής ώστε να διαχωρίζει τα στοιχεία και συγκεκριμένου πάχους για να απορροφήσει τη σκληρότητα των επιφανειών. Εξασφαλίζοντας αυτές τις ουτοπικές καταστάσεις τα έδρανα θα έχουν πολύ εκτεταμένες διάρκειες ζωής. Εντούτοις σε πραγματικές περιπτώσεις είναι

δύσκολο να έχουμε λίπανση πλήρους ταινίας με διάρκειες ζωής στο 100% ή και περισσότερο από τους τυποποιημένους υπολογισμούς. Η γραφική παράσταση του Weibull, του σχήματος 56 δείχνει τη σχετική υπεροχή τριών κοινών λιπαντικών. Οι αριθμητικές διαφορές που παίρνουμε από τις δύο δοκιμές δίνουν έμφαση στη δυσκολία των δοκιμών των λιπαντικών και στο γεγονός ότι μπορούν να ληφθούν λίγο διαφορετικές ζωές από το ίδιο το έδρανο και το ίδιο λιπαντικό για διαφορετικές φορτίσεις. Η θερμοκρασία είναι πιθανώς η πιο σημαντική περιβαλλοντολογική παράμετρος για να επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του εδράνου αλλάζοντας τις ιδιότητες του λιπαντικού. Η μείωση των υπολογισμένων φορτίων στις B_{10} και B_{50} διάρκειες ζωής σε θερμοκρασία δωματίου και στους 723°C , είναι σημαντική, όπως φαίνεται στον πίνακα 18. Τα δεδομένα λήφθηκαν με σφαίρες εδράνων 45mm και οι υπολογισμοί εκφράζονται στο επί τοις εκατό της βασικής ικανότητας για φυσιολογικά λιπανόμενο 52100 χάλυβα. Το λιπαντικό σε θερμοκρασία δωματίου ήταν ένα λάδι με μεταλλική βάση και στους 723°C ένας συνθετικός διεστέρας.

Η χρησιμοποίηση στερεών λιπαντικών και ιδιαίτερα γραφίτη και διθειικού μολύβδου είχε λογική επιτυχία σε θερμοκρασίες δωματίου και υψηλότερες. Τα γενικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο διθειικός μόλυβδος (MoS_2) προμηθεύει μεγαλύτερη ζωή από το γραφίτη περίπου μιας τάξης μεγέθους. Πολύ σημαντικός είναι ο τύπος του λιπαντικού. Το μέγεθος των μορίων θα πρέπει να είναι μικρότερο της τάξης των μικρών και τα μόρια θα πρέπει να βρίσκονται σε ένα συντηρητικό λιπαντικό. Οι ξηρές σκόνες δεν βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής και τα υδατικά και αλκοολούχα αιωρήματα έχουν δείξει μείωση στη ζωή. Συγκεκριμένα αιωρήματα που επεκτείνουν τη ζωή είναι: το MoS_2 σε αφρισμένη σιλικόνη και η πάστα MoS_2 σε μεταλλικό λάδι και γραφίτη σε αναλογία 10% σε μεταλλικό λάδι. Φαίνεται να υπάρχει κάποια προτίμηση για το MoS_2 έναντι του γραφίτη ειδικότερα για χρήση εν κενώ.



Σχήμα 55: Η επίδραση της ταχύτητας και του θλιπτικού φορτίου σε έδρανο με γωνία επαφής.



Σχήμα 56: Διάγραμμα του Weibull με δεδομένα σε κόπωση σε ένα M1 χάλυβα.

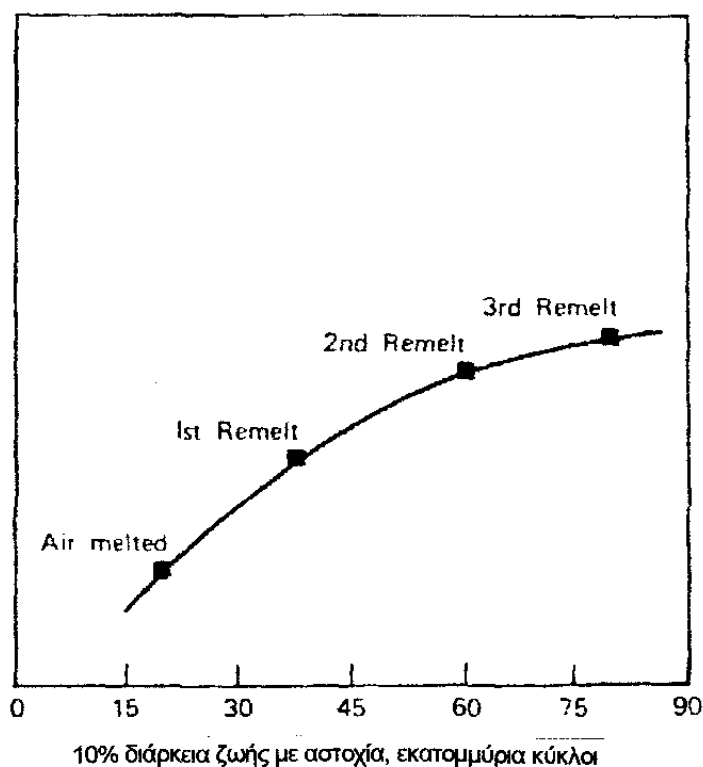
Πίνακας 18: Επίδραση της θερμοκρασίας στην αναλογία φορτίου του εδράνου.

| Υλικό εδράνου | Πρακτική λιωσίματος | Θερμοκρασία, σε °C | % αναλογία του βασικού φορτίου | |
|---------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|---------|
| | | | 10% ζωή | 50% ζωή |
| M-1 | Βασικό τόξο | Δωματίου | 83 | 91 |
| M-1 | Βασικό τόξο | 218 | 60 | 54 |
| M-10 | Βασικό τόξο | Δωματίου | 77 | 70 |
| M-10 | Βασικό τόξο | 218 | 64 | 64 |
| M-1 | Επαγωγικό κενό | Δωματίου | 132 | 122 |
| M-1 | Επαγωγικό κενό | 218 | 64 | 77 |
| M-50 | Με ηλεκτρόδιο σε κενό | Δωματίου | 144 | 126 |
| M-50 | Με ηλεκτρόδιο σε κενό | 218 | 93 | 100 |

Η ζωή σε κόπωση ενός εδράνου θεωρούμενο σαν συναρμογή συσχετίζεται με δεδομένα διάρκειας ζωής του υλικού και μόνο. Τα διαθέσιμα υλικά για αντιτριβικά έδρανα παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες. Οι προσπάθειες για βελτίωση της σύνθεσης και της ποιότητας των υλικών είχαν σαν αποτέλεσμα τα κράματα μεγάλης ποιότητας που παράγονται με λιώσιμο με καταναλώσιμο ηλεκτρόδιο εν κενώ και/ή με εξαέρωση εν κενώ. Η επίδραση αυτών των κραμάτων στο σχεδιασμό εδράνων ήταν τέτοια ώστε να επιτρέψει μια αύξηση στη βασική L_{10} διάρκεια ζωής από 500 σε 1500 ώρες ή από 1 σε 3×10^6 περιστροφές στον αρχικό υπολογισμό των φορτίων. Το αποτέλεσμα του λιωσίματος εν κενώ ήταν να μειώνεται η περιεκτικότητα σε ξένα σώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των πυρήνων για λακκούβες, κοψίματα, ξεφλουδίσματα και ρωγμές μειώνεται και η διάρκεια ζωής σε κόπωση αυξάνεται. Ο πίνακας 19 εκφράζει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους και του αριθμού των ξένων σωμάτων και της B_{10} διάρκειας ζωής. Το σχήμα 57 συσχετίζει αυτή τη ζωή με τον αριθμό των λιωσιμάτων.

Πίνακας 19: Σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε ξένα σώματα και της B₁₀ διάρκειας ζωής των βαρελοειδών εδράνων.

| Προμηθευτής | Επίπεδο μεγέθους ξένων σωμάτων | | | | | | | B ₁₀ ζωή, σε ώρες |
|-------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| A | 4.0 | 3.1 | 1.6 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 56 |
| B | 7.4 | 3.2 | 1.0 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 64 |
| C | 4.0 | 1.2 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 153 |
| D | 6.5 | 2.0 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0 | 0 | 265 |
| E | 3.0 | 1.0 | 0.4 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 247 |
| F | 1.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 512 |
| G | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | Στη δοκιμή |
| H | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 500+ |



Σχήμα 57: Η επίδραση των αριθμών των λιωσιμάτων στην αστοχία των εδράνων στο χάλυβα 52100.

5.3 Έδρανα με μανίκια

Τα έδρανα αυτού του τύπου που χρησιμοποιούν υγρή λίπανση και λειτουργούν κάτω από τα 833 Hz δεν φαίνεται να έχουν γίνει αντικείμενο εκτεταμένων μελετών σε κόπωση σύμφωνα με τους αντιτριβικούς τύπους. Αποδεχόμενοι την αναπόφευκτη φθορά εξαιτίας της τριβής ολισθήσεως, ένα κατάλληλα σχεδιασμένο και λιπαινόμενο έδρανο με μανίκια θα περιστρέφεται απεριόριστα κάτω από το υπολογισμένο φορτίο. Η μετατόπιση του άξονα που είναι αποτέλεσμα της φθοράς είναι συνήθως αποδεκτή και μικραίνει με την αφαίρεση των σφηνών.

Η αντοχή σε κόπωση του υλικού του μανικιού δεν φαίνεται να είναι και πολύ σημαντική. Μπορεί να λειτουργήσει ένας μηχανισμός κόπωσης αν μπουν θραύσματα μέσα στο έδρανο. Η είσοδος του μανικιού θα συμβεί μόλις πιεστεί από τον άξονα ένα σκληρότερο ξένο κομματάκι (μεταλλικά γρέζια, σκόνη, διοξείδιο του πυριτίου κ.α.). Αν και η σκόνη θεωρείται συνήθως η κύρια αιτία καταπόνησης του εδράνου, είναι αδύνατο να σχεδιάσουμε γι' αυτό το λόγο ένα μηχανισμό αστοχίας, εξαιτίας της έλλειψης γνώσης της τοπικής τάσης, της τιμής του k_t , του αριθμού των σωματιδίων, της συχνότητας εφαρμογής των τάσεων κ.α. Ιδιαίτερα το τελευταίο δεν έχει καμία σχέση με την ταχύτητα του άξονα. Ο όρος «καταπόνηση» χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για διάκριση από τον όρο «αστοχία», γιατί τα έδρανα με μανίκια έχουν συνήθως μια μεγάλη επιχειρησιακή περίοδο από την αρχή της λειτουργίας ως την κατάρρευση. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μπορεί να υπάρξει μια αύξηση στην θερμοκρασία και την τριβή εξαιτίας της απώλειας ευθυγράμμισης του άξονα.

Για την ελαχιστοποίηση της δυσλειτουργίας ή της αστοχίας των εδράνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες σχεδιαστικές πρακτικές:

- 1) Η γεωμετρία και το τελείωμα του άξονα θα πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν λίπανση με ταινία. Η ομοκεντρία και η ταινία θα πρέπει να είναι ελεγχόμενες.
- 2) Τα σημεία που θα τοποθετηθεί το έδρανο θα πρέπει να είναι αρκετά σκληρά για να φέρουν τα φορτία του μανικιού και του άξονα μέσα στην επιτρεπόμενη απόκλιση· το τελείωμα θα πρέπει να είναι πολύ καλό ώστε να μην επηρεάζει το πάχος του μανικιού, ειδικότερα σε λεπτά μανίκια και κελύφη.
- 3) Το πάχος του τοιχώματος του μανικιού πρέπει να είναι κατάλληλο για να φέρει το θλιπτικό φορτίο μέσα στην επιτρεπόμενη απόκλιση. Για να είναι

αποτελεσματικό το τοίχωμα του μανικιού και τα σημεία τοποθέτησης θα πρέπει να σχεδιάζονται μαζί.

- 4) Η αναλογία μήκους/διαμέτρου (L/D). Η εκτίμηση πολλών δεδομένων οδήγησε στην ποικιλία των τιμών του πίνακα 20 με τον κανόνα του αντίχειρα οδηγού.

Πίνακας 20

| L/D | Ταχύτητα, σε rpm | Φορτίο, σε kg/mm ² | Μέθοδος λίπανσης |
|---------|------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1.0-3.0 | 1000 | 14.7 | Γράσο |
| 0.7-1.3 | 2500 | 1.5 | Πιτσίλισμα ή πίεση |
| 0.2-1.0 | 2000-4000 | 1.5-3.7 | Πιτσίλισμα ή πίεση |
| 0.2-0.4 | 4000-10000 | Μικρό | Πίεση |
| 0.3-max | 10000 | Μικρό | Πίεση |

Κεφάλαιο 6

6.0 Οδοντωτοί τροχοί

Η αστοχία σε κόπωση των οδοντωτών τροχών μπορεί να συμβεί με οποιονδήποτε τύπο ή με τον συνδυασμό τριών βασικών τύπων.

- 1) Οδοντωτή κάμψη η οποία αν συνεχιστεί σε ένα συγκεκριμένο αριθμό κύκλων έχει σαν αποτέλεσμα το σπάσιμο (ρήξη) του δοντιού στη ρίζα.
- 2) Επιφανειακή καταπόνηση σαν αποτέλεσμα της υπέρβασης των τάσεων του θλιπτικού ορίου σε κόπωση σε μια τοπική περιοχή ή στο πρόσωπο του δοντιού. Αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί λόγω έλλειψης ευθυγράμμισης ή υπερβολικής παρέκκλισης του άξονα ή των σημείων τοποθέτησης. Αν προκαλείται από ένα αρχικό ελάττωμα, θα μπορούσε να βρίσκεται στην επιφάνεια ή κάτω από αυτή, αλλά μέσα στο εύρος του υψηλά καταπονούμενου υλικού.
- 3) Η υπερβολική παρέκκλιση των δοντιών και η υπερφόρτιση που προκαλείται από συνηχητικές δονήσεις, ιδιαίτερα στους τύπους με λεπτό πλέγμα και λεπτά χείλη.

Για μια κατά προσέγγιση εκτίμηση των δεδομένων σε αστοχίες γραναζιών σε εξοπλισμό μεταφοράς στο έδαφος (όπου δεν εμπεριέχονται σχέδια με περιορισμό στο μέγεθος), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η καμπτική κόπωση υπολογίζεται στο 25% των αστοχιών· επιφανειακές καταστροφές στο 40%· υπερφόρτιση στο 15%· από το υπόλοιπο 20% ποικίλων αιτιών, το μισό θα μπορούσε να αποδίδεται σε ογκώδη «ξένα» αντικείμενα που μπαίνουν στην εμπλοκή των δοντιών.

Οι τύποι αστοχίας λόγω δονήσεων συμβαίνουν σχεδόν αποκλειστικά σε πολύ υψηλές ταχύτητες, σκληρά καταπονούμενες οδοντώσεις, όπως αυτής της προώθησης της μηχανής μιας ρουκέτας. Οι τύποι και οι τυπικές σχέσεις συχνότητας δίνονται στο σχήμα 58· θα έπρεπε να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός ενός ειρμού και ενός γραναζιού (πλήμνη, σώμα, στεφάνη, δόντια) θα πρέπει να είναι τέτοιου βαθμού ώστε καμιά από αυτές τις ιδιοσυχνότητες να μην είναι ίδια με τη συχνότητα εμπλοκής των δοντιών. Ο κίνδυνος φυσικά μειώνεται σημαντικά για τις βαρύτερες κατασκευές.

Ο σχεδιασμός οδοντωτών τροχών υπήρξε το θέμα εκτεταμένης έρευνας από τους Lewis, Buckingham και Barth. Σχέδια βασισμένα στις εξισώσεις τους, συνήθως λειτούργησαν ικανοποιητικά αλλά οι πιο πολλοί μελετητές το 1940 εξέταζαν

περισσότερο την αντοχή. Ανέπτυξαν σχέδια ώστε να λειτουργούν απεριόριστα σε τάσεις που υπολογίστηκαν να είναι μικρότερες από ένα επίπεδο διατήρησης. Αυτές οι υπολογισθείσες τάσεις ποίκιλαν αναφορικά στις διάφορες υποθέσεις και ιδιαίτερα εκείνων που έχουν σχέση με τις συγκεντρώσεις τάσεων, τους παράγοντες του σχήματος και την κατανομή του φορτίου κατά μήκος του δοντιού. Πιο πρόσφατα οι μελέτες γίνονταν με βάση μια μονάδα φορτίου που είναι το ισότιμο φορτίο σε Nt/mm με πλάτος προσώπου ενός δοντιού. Οι παράμετρος δεν είναι τάση, αν και έχει διαστάσεις τάσεις· μπορεί να σχετίζεται με την τάση στη ρίζα από την εξίσωση τάσης του δοντιού του γραναζιού. Μια έκφραση για το μοναδιαίο φορτίο είναι:

σε γρανάζια με ευθύγραμμα δόντια:
$$U_1 = \frac{W_t \cdot P_d}{F} \quad (\text{Σχέση 49})$$

και σε ελικοειδή:
$$U_t = \frac{W_t \cdot P_d}{F \cdot \cos\psi} \quad (\text{Σχέση 50})$$

όπου: W_t =εφαπτομενική δύναμη προώθησης.

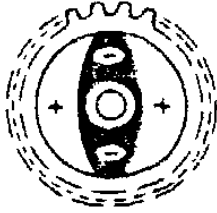



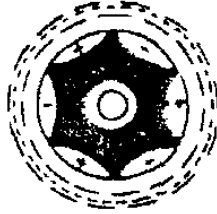
F =πλάτος προσώπου επαφής σε mm.

P_d =διαμετρικό μήκος.

ψ =γωνία ελίκωσης.

$P_d/\cos\psi=P_{nd}$ =φυσιολογικό διαμετρικό μήκος.

Τύποι δονήσεων γραναζιών

| Τύπος | Κανονική Συχνότητα, cps | Γραφικό | Τμή |
|--------------------------|-------------------------|---|---|
| 1 ^η διάμετρος | 1 |  |  |
| 2 ^η διάμετρος | 2 |  | |
| 1 ^ο τύμπανο | 2.67 |  | |
| 3 ^η διάμετρος | 3.66 |  | |
| 4 ^η διάμετρος | 6.2 | | |
| 5 ^η διάμετρος | 9.04 | | |
| 2 ^ο τύμπανο | 9.3 | | |
| 6 ^η διάμετρος | 12. | | |
| 7 ^η διάμετρος | 12.6 | | |

Σχήμα 58: Τύποι δονήσεων σε γρανάζια αντλιών ρουκετών.

Από τη γενική εξίσωση για ευθύγραμμα δόντια γραναζιών η αντοχή είναι:

$$S_t = \frac{W_t \cdot K_o \cdot P_d \cdot K_s \cdot K_m}{K_v \cdot F \cdot J} \quad (\text{Σχέση 51})$$

το μοναδιαίο φορτίο μετατρέπεται σε όρους της τάσης σαν:

$$U_t = S_t \cdot \frac{K_v}{K_o} \cdot \frac{J}{K_s \cdot K_m} \quad (\text{Σχέση 52})$$

όπου: S_i =τάση στη ρίζα, σε Nt/mm^2 .

K_o =συντελεστής υπερφόρτισης.

K_i =συντελεστής μεγέθους.

K_m =συντελεστής κατανομής φορτίου.

K_v =δυναμικός συντελεστής.

K_f =συντελεστής συγκέντρωσης τάσης στη ρίζα.

J =συντελεστής γεωμετρίας= l /συντελεστής τάσης.

K_f/Y =συντελεστής τάσης στη ρίζα.

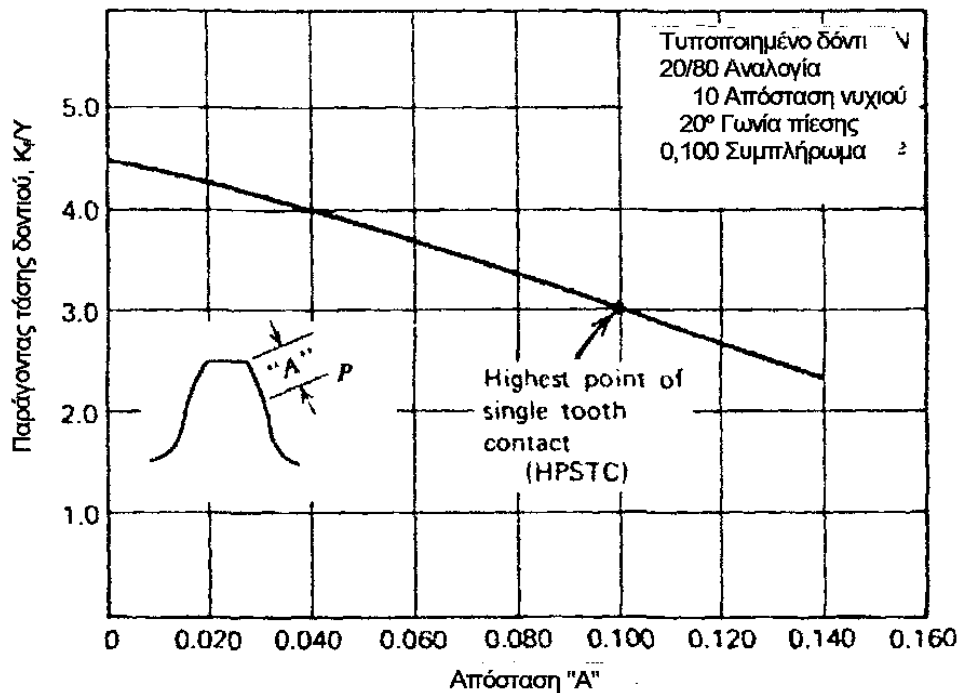
Y =συντελεστής που συσχετίζει τη γεωμετρία του δοντιού σαν ενός δοκαριού με ονομαστική τάση στη ρίζα· είναι ένας συντελεστής «σχήματος».

Το μοναδιαίο φορτίο είναι μια πολύ χρήσιμη και γενική παράμετρος με την οποία υποδεικνύουμε την ικανότητα και τη διάρκεια ζωής του γранаζιού, αλλά έχει τον περιορισμό να συσχετίζεται με μια καθορισμένη θέση του φορτίου. Η καλύτερη διαδικασία είναι να μεταφέρουμε όλα τα μοναδιαία φορτία σε μια «χειρότερη» θέση που είναι το ακραίο τμήμα στην επαφή του δοντιού. Αυτή η κατάσταση απαιτεί την εκτίμηση της ανάλογης επίδρασης της διαφοράς στη θέση φόρτισης σαν $S_i=U_i \cdot (K_f/Y)$ · η τάση στη ρίζα κυμαίνεται σαν K_f/Y . Αφού και το K_f και το Y μεταβάλλονται με τη θέση της επαφής, η σύγκριση του μοναδιαίου φορτίου θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με τιμές της αναλογίας K_f/Y .

Τα συνοψισμένα αποτελέσματα εκτεταμένων δοκιμών δίνονται στον πίνακα 21. Στο σχήμα 59 δίνεται μια γραφική παράσταση του παράγοντα τάσης συναρτήσει της θέσης του φορτίου. Για τον καθορισμό του ορίου κόπωσης οι θέσεις των φορτίων ήταν 2,54mm και 0,25mm, προμηθεύοντας μια αναλογία παράγοντα τάσης 3,0/4,25. Σε μια πραγματική λειτουργία γранаζιών το ψηλότερο σημείο της επαφής ενός και μόνο δοντιού επηρεάζεται από τον αριθμό των δοντιών και επομένως διαφέρει κατά λίγο και η τάση στη ρίζα.

Πίνακας 21: Τάσεις στη ρίζα του δοντιού του γραναζιού.

| | Υψηλότερο σημείο φόρτισης της επαφής ενός δοντιού | Φόρτιση κοντά στην άκρη | Διορθωμένη άκρη στο υψηλότερο σημείο στη φόρτιση επαφής του ενός δοντιού |
|----------------|---|-------------------------|--|
| Όριο κόπωσης | 22.7 | 16.1 | 22.9 |
| Φορτίο μονάδας | 34.4 | 22.0 | 31.2 |



Σχήμα 59: Παράγοντας της τάσης της ρίζας συναρτήσει της θέσης του φορτίου για συνήθη δοκιμή γραναζιού.

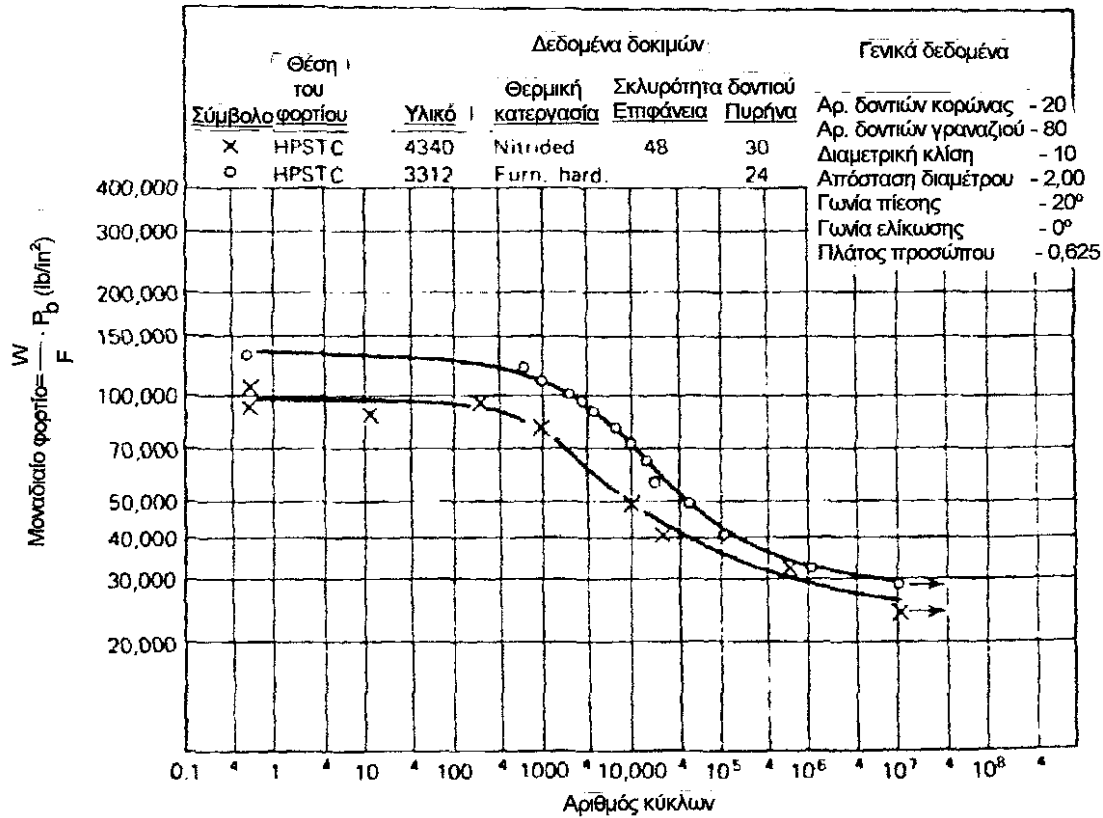
Μια γενική συνάθροιση τιμών μοναδιαίων φορτίων δίνονται στον πίνακα 22 για μεγάλη ακτίνα «ποιότητας», από εργοστασιακά γρανάζια μεσαίας ποιότητας ως εκείνα για αντλίες ρουκετών· η στήλη «διόρθωσης» αναφέρεται σε μεθόδους δοκιμών. Το σχήμα 60 προμηθεύει τυποποιημένες καμπύλες S-N. Επίσης είναι

διαθέσιμα ορισμένα ενδιαφέροντα δεδομένα για γρανάζια σε σκάφη. Η βέλτιστη κατάσταση αποκομίζεται από την εξίσωση της διάρκειας ζωής σε κόπωση ή την «αντοχή» σε πλάγια θλίψη και στην εύκαμπτη τάση της ρίζας. Για τέσσερις τυπικούς άξονες τα μοναδιαία φορτία (σχεδιαστικά) ήταν 14,3 , 14,7 , 13,5 και 11,7kg/mm², τιμές οι οποίες θα έπρεπε να συγκριθούν με αυτές του πίνακα 22 στον οποίο τα 6,6kg/mm² παραπέμπουν στα εργοστασιακά γρανάζια με καλή αξιοπιστία και όπου τα 13,2kg/mm² παραπέμπουν σε μια φυσιολογική τιμή για ρουκέτες. Συνεπώς όπως και στο σχεδιασμό όλων των πολύπλοκων στοιχείων, υπάρχει κάποια διαφορά στις γνώμες ως προς το τι συνιστά την «ποιότητα» και στις μεθόδους μέτρησης και μετάφρασης τους.

Πίνακας 22: Τυπικές μονάδες φορτίου για γρανάζια υψηλής απόδοσης.

| Εφαρμογή | Μονάδα φορτίου | | |
|----------------------------|-------------------------|--|---|
| | Για εφαρμοζόμενο σχέδιο | Διορθωμένο σε 20/80 στη δοκιμή του γραναζιού με μείωση 25% | Σχόλιο |
| Αεροσκάφος | 14.1 | 10.6 | Υψηλή χρηστικότητα. Απαιτείται μεγάλη τελειότητα στην κατασκευή |
| | 10.6 | 7.9 | Κανονική τιμή, τυπική για γενική χρήση |
| Διαδρομές αντλιών ρουκετών | 28.1 | 21.1 | Υψηλή χρηστικότητα. Πολύ κρίσιμη. Επαναλήψεις κάτω από 10^7 . |
| | 17.6 | 12.7 | Κανονική τιμή. Επαναλήψεις κάτω από 10^7 . |
| Βιομηχανική | 28.1 | 21.1 | Υψηλή χρηστικότητα. Πολύ φτωχή αξιοπιστία. (γενικά λάθος σχεδιασμός). |
| | 8.4 | 6.3 | Κανονική τιμή για περιπτώσεις καλής βιομηχανικής ποιότητας. |

Δεδομένα σε κόπωση δοντιού γραναζιού



Σχήμα 60: Συνήθεις S-N καμπύλες που δείχνουν το σχήμα σε μεγάλα φορτία.

Ο κύριος τρόπος παραγωγής γραναζιών είναι με την κατεργασία τους σε εργαλειομηχανές, δηλαδή με την αφαίρεση γρεζιού, αλλά πρόσφατα έχει εισαχθεί η μέθοδος παραγωγής τους με έλαστρα όπως γίνεται και στην κατασκευή σπειρών. Ενώ, αυτή η μέθοδος, βρίσκεται ακόμα στη φάση της μεταφοράς από το πείραμα στη παραγωγή, παρουσιάζεται μια συγκεκριμένη βελτίωση στη ζωή.

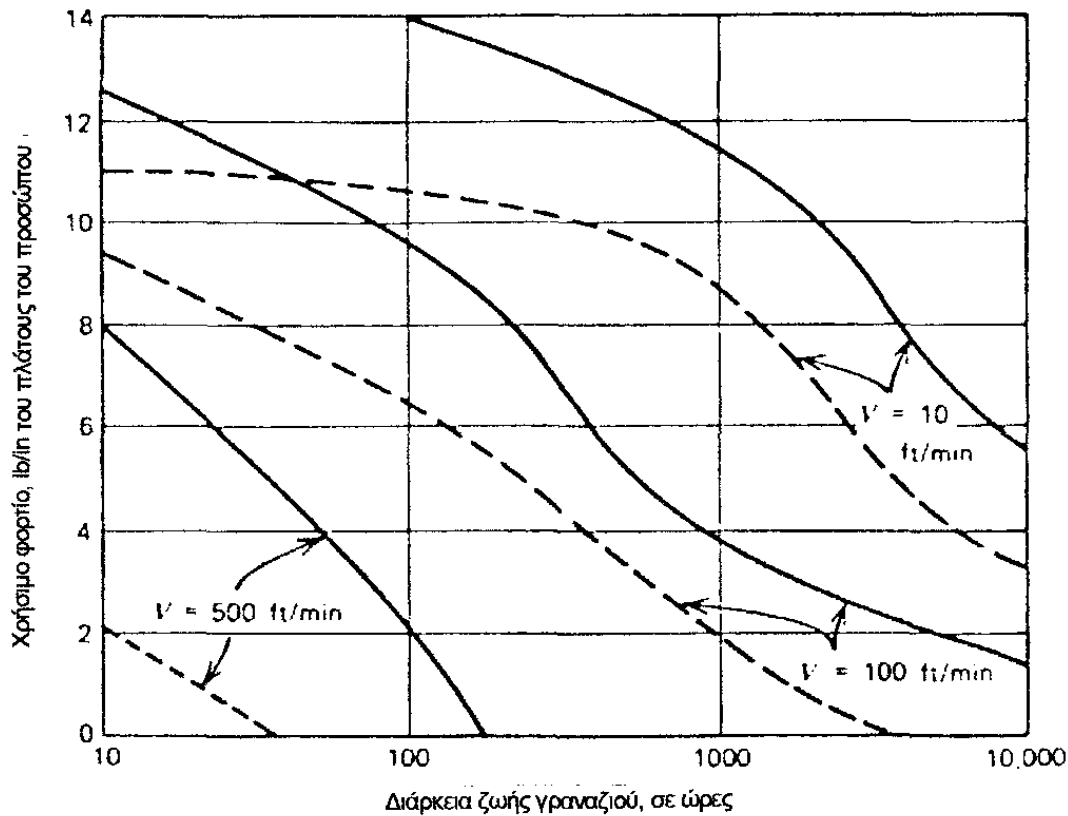
Η σφυρηλάτηση στην περιοχή της ρίζας μπορεί να αυξήσει το φορτίο του ορίου κόπωσης ενός δοντιού που καταπονείται σε κάμψη κατά 30%. Αλλά αφού η θραύση του δοντιού είναι μία αιτία αστοχίας του γραναζιού, το επιπρόσθετο έξοδο δεν μεταβάλλει την τελική χρήση του.

6.1 Οδοντωτοί τροχοί κίνησης

Το πρόβλημα της καταπολέμησης της φθοράς και της έλλειψης ακρίβειας στα γρανάζια ήταν πάντα ποικίλο. Η κύρια διαφορά στις σχεδιαστικές παραμέτρους

για μια ελαφρώς φορτισμένη, μεγάλης ταχύτητας οδόντωση, με εκείνες των γραναζιών που μεταφέρουν ισχύ είναι ο βαθμός φθοράς. Το ποσοστό της φθοράς είναι μια αμοιβαία σχέση των γραναζιών στη σύμπλεξη, που έχουν το μεγαλύτερο αριθμό επαφών και μικρότερη σημασία και εκείνα με το μικρότερο αριθμό επαφών και τη μεγαλύτερη σημασία. Οι περισσότερες από τις μελέτες που οδηγούν σε μεθόδους πρόβλεψης της ζωής, προσπάθησαν να εκτιμήσουν το ποσοστό της φθοράς διαφορετικών συνδυασμών υλικών σε εμπλεκόμενα γρανάζια σε σχέση με τις καμπύλες S-N ή των σταθερών διαγραμμάτων ζωής για τα υλικά που καταπονούνται σε θλίψη και να υπολογίσουν τις επιδράσεις της ταχύτητας και του φορτίου με πειραματικά διαγράμματα φορτίου για τη διάρκεια ζωής και τη ταχύτητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 61. Με αυτό το τρόπο είναι πιθανό να κάνουμε ένα γρήγορο έλεγχο των εμπλοκών σε μία συναρμογή γραναζιών για να απομονώσουμε τις ενδεχόμενες αστοχίες. Τα δεδομένα που χρειαζόμαστε είναι τα υλικά και των δύο γραναζιών στην εμπλοκή, η ταχύτητα σε m/sec της γραμμής κλίσης και το χρήσιμο φορτίο σε Nt/m του πλάτους του προσώπου. Μια συντηρητική εκτίμηση της διάρκειας ζωής του γραναζιού μπορεί να βρεθεί με:

- 1) Εντοπίζοντας την κατάλληλη καμπύλη που βασίζεται στα υλικά του γραναζιού και του άξονα και του τελειώματος της επιφάνειας.
- 2) Ακολουθώντας το χρήσιμο φορτίο (τεταγμένη) στη κατάλληλη ταχύτητα της γραμμής κλίσης και διαβάζοντας τον κατά προσέγγιση χρόνο της αστοχίας σε ώρες (τετμημένη).



Σχήμα 61: Καμπύλες φορτίου/ζωής/ταχύτητας για γρανάζια από αλουμίνιο και ανοξείδωτο χάλυβα.

Δίνεται έμφαση στο ότι αυτές οι καμπύλες είναι συντηρητικές, επιτρέπουν τον αποκλεισμό των ζευγαριών του γραναζιού με αποδεκτή ζωή (ασφαλή φορτία) και βασίζονται στη λιγότερο αποδεκτή γεωμετρικά οδόντωση, η οποία είναι με μικρούς άξονες και μεσαίου μεγέθους γρανάζια με γωνία πίεσης $14,5^\circ$. Τα γρανάζια που παρουσιάζονται πολύ φορτισμένα θα πρέπει να μελετώνται με επιπλέον λεπτομέρειες.

Κεφάλαιο 7

7.0 Ελατήρια

Ο σχεδιασμός ελατηρίων είναι παρόμοιος όσον αφορά την προσέγγιση με αυτόν των γραναζιών και εμφανίζεται στις εξισώσεις ένας αριθμός ειδικών ή διορθωτικών παραγόντων. Εφαρμόζονται οι συντηρητικές σχέσεις για τις τάσεις σε καμπυλωμένες δοκούς, προμηθεύοντας ότι λαμβάνονται υπόψη τρεις τουλάχιστον παράγοντες. Για σπειροειδή ελατήρια από στρογγυλό σύρμα έχει δειχθεί ότι η διατρητική τάση σε στρέψη είναι:

$$S_s = \frac{k \cdot T_r}{J} = \frac{8 \cdot K \cdot P \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{Σχέση 53})$$

όπου: T =ροπή στρέψης=αξονική δύναμη·ακτίνα= $P \cdot r$

P =αξονική δύναμη

r =ακτίνα

J =πολική ροπή αδράνειας

K =παράγοντας διόρθωσης του Wahl.

επίσης:

$$k = \frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} + \frac{0.615}{c} \quad (\text{Σχέση 54})$$

όπου: c =το ευρετήριο του ελατηρίου D/d .

D =εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος.

d =διάμετρος σύρματος.

Ο παράγοντας k του Wahl διορθώνει τη συγκέντρωση τάσης εξαιτίας της καμπυλότητας του σύρματος, k_c , και της διατμητικής τάσης, k_s . Ο παράγοντας k είναι το προϊόν των k_c και k_s . Η εξίσωση του k_s αποκομίζεται από την έκφραση για τη διατμητική τάση σε συνδυαζόμενη στρέψη και εφελκυσμό (ή θλίψη), αγνοώντας αρχικά τη συγκέντρωση από τη καμπυλότητα:

$$S_s = \frac{T_r}{J} \pm \frac{F}{A} = \frac{8 \cdot P \cdot D}{\pi \cdot d^3} \pm \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \quad (\text{Σχέση 55})$$

όπου το συν (+) εφαρμόζεται στις εσωτερικές ίνες και η S_s είναι τότε μέγιστη. Η εξίσωση 55 μπορεί να ξαναγραφεί με τη μορφή:

$$S_s = \frac{8 \cdot P \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(1 + \frac{1}{2 \cdot c} \right) \quad (\text{Σχέση 56})$$

Συνεπώς ορίζοντας τον παράγοντα συγκέντρωσης της διατμητικής τάσης

σαν:

$$k_s = 1 + \frac{1}{2 \cdot c} \quad (\text{Σχέση 57})$$

τότε ο παράγοντας συγκέντρωσης τάσης από τη καμπυλότητα είναι:

$$k_c = \frac{k}{k_s} \quad \text{ή} \quad k_c = \frac{c+0.22}{c+0.5} \quad (\text{Σχέση 58})$$

Ο τρίτος παράγοντας μεταβολής της τάσης αυξάνεται από οποιαδήποτε ασυμμετρία στη φόρτιση, ιδιαίτερα από τις συνθήκες τελειώματος και δευτερευόντως από οποιαδήποτε ζημιά στον τομέα του σύρματος ή στο τελείωμα από τα εργαλεία αποπεράτωσης. Η ευθύνη έγκειται στο γεγονός ότι ο σχεδιαστής θα πρέπει να δει ότι δεν απαιτεί τύπους και συνθήκες τις οποίες οι συνήθεις μέθοδοι δεν μπορούν να μεταχειριστούν. Αντιθέτως τα κατασκευαστικά γκρουπ και τα γκρουπ των εργαλείων θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του σχεδίου χωρίς ακούσιες συγκεντρώσεις τάσης.

Σε όλες τις συμβατικές εξισώσεις για το σχεδιασμό ελατηρίων, η έμμεση υπόθεση που γίνεται, δηλαδή ότι καμία από τις συχνότητες αντίστασης των ελατηρίων δεν συμπίπτει με τη συχνότητα της εφαρμογής του δυναμικού φορτίου. Σαν επιπρόσθετη εργασία ο σχεδιαστής θα πρέπει να καθορίσει τον πρώτο τύπο αντίστασης και τους πρώτους αρμονικούς για να ελέγξει τη συχνότητα διέγερσης. Η σύμπτωση λοιπόν ποσοστιαίων μονάδων πάνω ή κάτω απαιτεί τροποποίηση του σχεδίου.

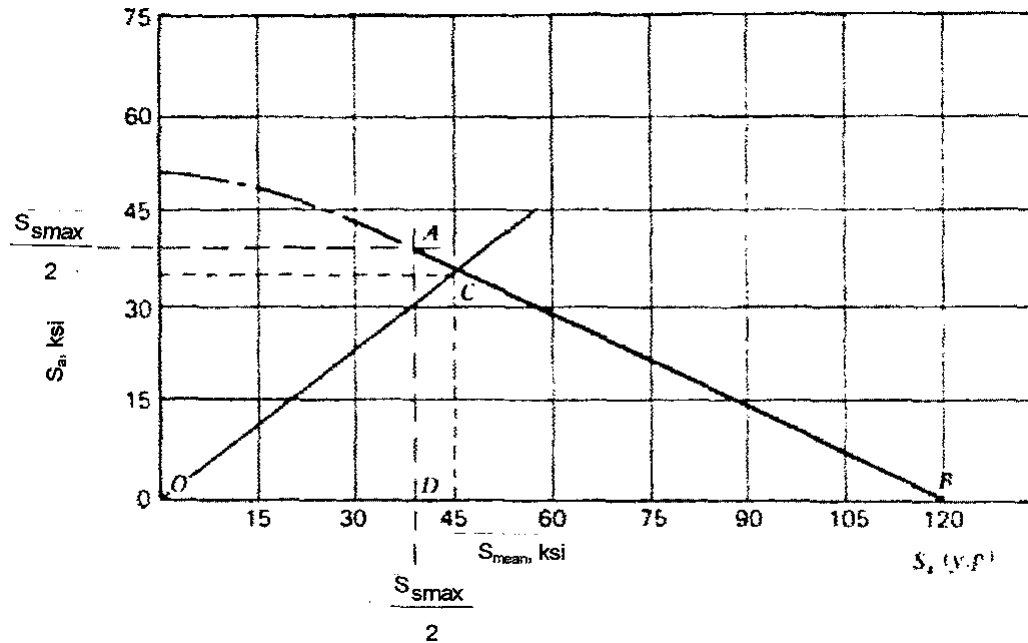
Στη μεγάλη πλειοψηφία των εφαρμογών, τα ελατήρια δεν καταπονούνται ταυτόχρονα και σε θλίψη και σε εφελκυσμό και επομένως δεν αποτελούν αντικείμενο αντιστρεφόμενων τάσεων. Επιπλέον συνήθως ασκείται προφόρτιση, προμηθεύοντας μια μη μηδενική τιμή της κύριας τάσης. Από την παρατήρηση των γενικών σταθερών των διαγραμμάτων ζωής, εύκολα διαπιστώνεται ότι για μια δεδομένη κύρια τάση, όσο μικρότερη είναι η αναλογία της τάσης R (S_{\min}/S_{\max}), τόσο μεγαλύτερη είναι η ζωή. Κάθε φορά που είναι διαθέσιμα τέτοια διαγράμματα για τη διαμόρφωση του ελατηρίου, αντί για το υλικό ο σχεδιαστής θα μπορούσε να βρει κατευθείαν μια τιμή για τη διάρκεια ζωής. Όταν υπάρχει απουσία τέτοιων εξατομικευμένων γραφικών παραστάσεων, ένα διάγραμμα του Goodman είναι ικανό να κατασκευάσει το ελατήριο, βασιζόμενοι στην κατάσταση της χειρότερης περίπτωσης ως προς την επίδραση της εναλλασσόμενης τάσης. Υποθέτουμε ότι η S_{\min} είναι μηδέν και μεγιστοποιούμε την ακτίνα της εναλλασσόμενης τάσης στην τιμή $S_{\max}/2=S_r/2$. Τότε στο σχήμα 62 το σημείο A είναι τοποθετημένο στο $S_{\max}/2$ και στους δύο άξονες και έτσι το εφαρμόσιμο τμήμα του διαγράμματος περιορίζεται στο τρίγωνο ABD. Η

μεταβλητή τάση γράφεται τότε από την σχέση 52 σαν:

$$S_a = \frac{8 \cdot k \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \right) \quad (\text{Σχέση 59})$$

και η κύρια τάση:

$$S_m = \frac{8 \cdot k_s \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(\frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \right) \quad (\text{Σχέση 60})$$



Σχήμα 62: Διάγραμμα του Goodman για ένα ελικοειδές ελατήριο.

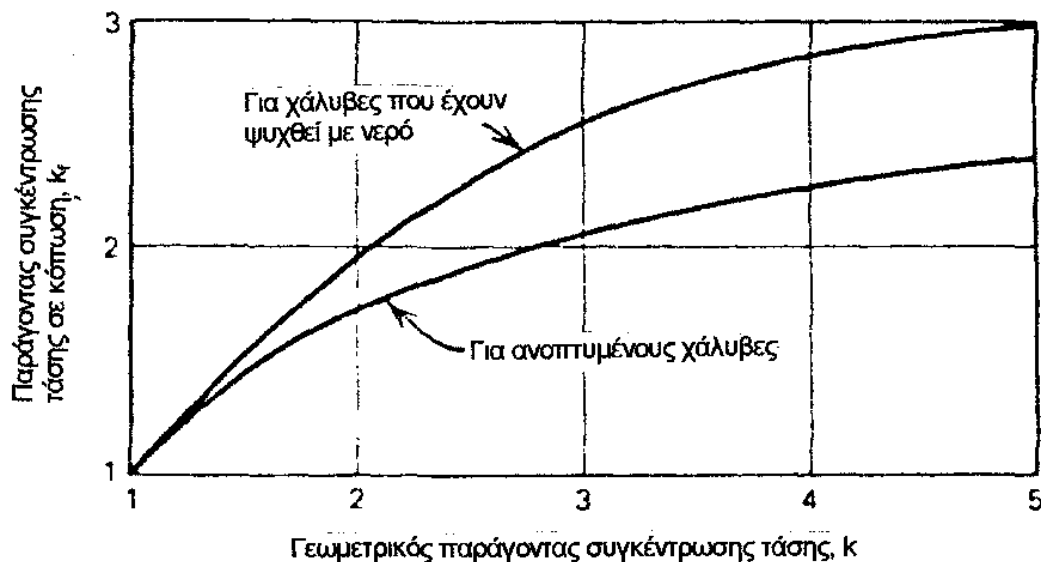
Ο πίνακας 22 δίνει επιτρεπόμενες τιμές της S_f για διάφορα υλικά (λαμβανόμενες πειραματικά), καταστάσεις και διαμορφώσεις ελικοειδών ελατηρίων. Το σχήμα 63 δίνει τον παράγοντα καμπυλότητας σαν παράγοντα του γεωμετρικού ή θεωρητικού παράγοντα συγκέντρωσης τάσης k_t και την ευαισθησία της εγκοπής για τους χάλυβες. Η εξίσωση 59 μπορεί τότε να ξαναγραφεί:

$$S_a = \frac{8 \cdot k_f \cdot k_s \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \left(\frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \right) \quad (\text{Σχέση 59.α})$$

όπου: k_f =μειωμένη τιμή του παράγοντα διόρθωσης k_c από το σχήμα 59. $k_s=1+1/2c$ (όπως στην σχέση 57).

Πίνακας 22: Εύρος τάσης αντοχής R για ελικοειδή ελατήρια.

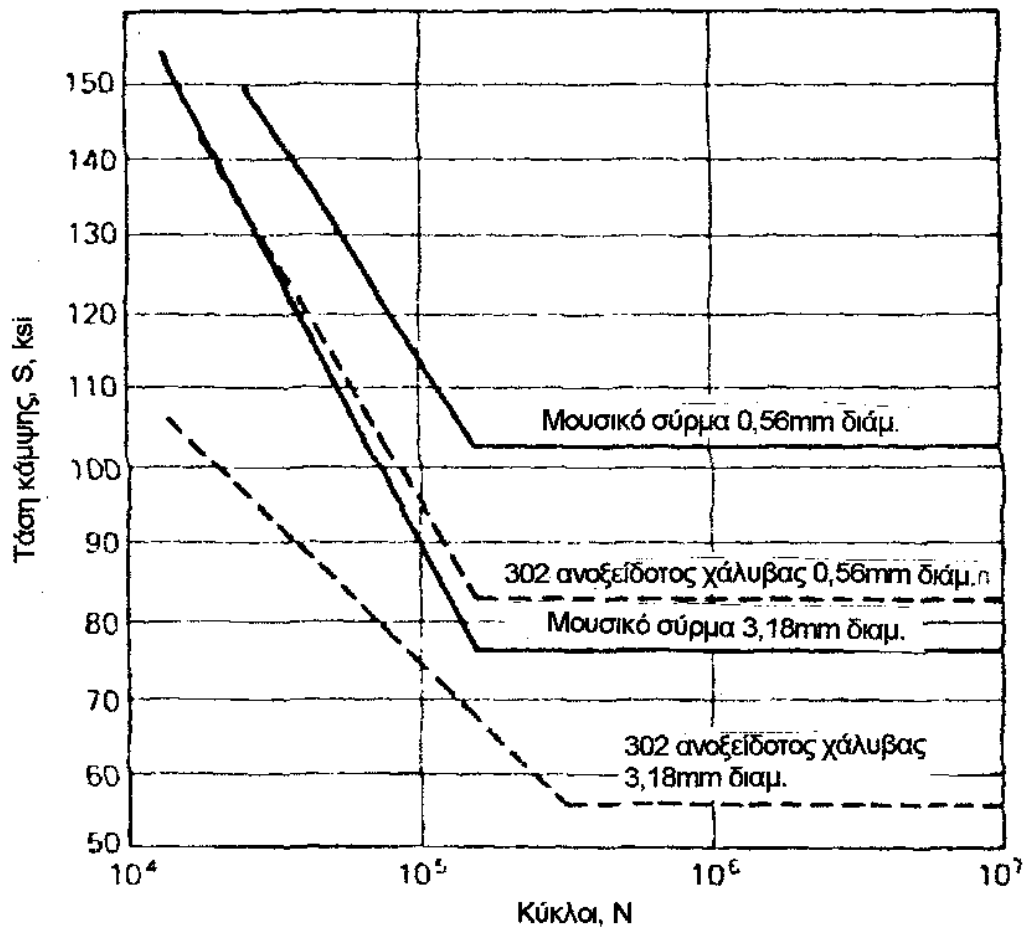
| Υλικό | Κατά προσέγγιση διάμετρος σύρματος, σε mm | Δείκτης C=D/d | Εύρος οριακής τάσης R, σε kg/mm ² | Σημειώσεις |
|---------------------------------|--|------------------|---|------------|
| Σύρμα κατεργασμένο εν' ψυχρώ | 3.3-4.1 | 10-11 | 28.8 | Εφελκυσμός |
| Σύρμα κατεργασμένο εν' ψυχρώ | 4.1 | 6 | 42.2 | Θλίψη |
| Σύρμα κατεργασμένο εν' ψυχρώ | 3.4 | 14 | 32.4 | Θλίψη |
| Μουσικό σύρμα | 6.4 | 8 | 39.4 | Θλίψη |
| Μουσικό σύρμα | 1.6 | 7 | 53.4 | Θλίψη |
| Μουσικό σύρμα | 3.8 | 6-7 | 49.2 | Θλίψη |
| Μουσικό σύρμα | 3.8 | 6-7 | 80.9 | Θλίψη |
| Σύρμα ελατηρίων βαλβίδων | 4.1 | 6.5 | 52.7 | Θλίψη |
| Σύρμα ελατηρίων βαλβίδων | 4.1 | 6.5 | 80.9 | Θλίψη |
| Σύρμα ελατηρίων βαλβίδων | 3.4 | 14 | 47.8 | Θλίψη |
| Χάλυβας διαμορφωμένος εν' ψυχρώ | 3.8 | 7.4 | 42.2 | Θλίψη |
| Χάλυβας διαμορφωμένος εν' ψυχρώ | 3.4 | 14 | 37.3 | Θλίψη |
| Χάλυβας διαμορφωμένος εν' ψυχρώ | 6.4 | 8 | 39.4 | Θλίψη |
| SAE 6150 χάλυβας | 3.8 | 7.4 | 49.2 | Θλίψη |
| SAE 6150 χάλυβας | 3.8 | 7.4 | 80.9 | Θλίψη |
| 18-8 ανοξειδωτος χάλυβας | 3.8 | 6-7 | 31.6 | Θλίψη |
| 18-8 ανοξειδωτος χάλυβας | 3.8 | 6-7 | 63.3 | Θλίψη |
| Φωσφορούχος μπρούντζος | 3.8 | 6-7 | 10.6 | Θλίψη |
| Φωσφορούχος μπρούντζος | 3.8 | 6-7 | 21.1 | Θλίψη |
| Ανθρακοχάλυβας | 19.0 | 5 | 50.6 | Θλίψη |
| Χάλυβας με χρώμιο-βανάδιο | 14.2 | 4.8 | 54.2 | Θλίψη |
| Βηρυλλιούχος χάλυβας | 14.2 | 4.8 | 23.2 | Θλίψη |



Σχήμα 63: k_f συναρτήσεσι του k_t για χάλυβες.

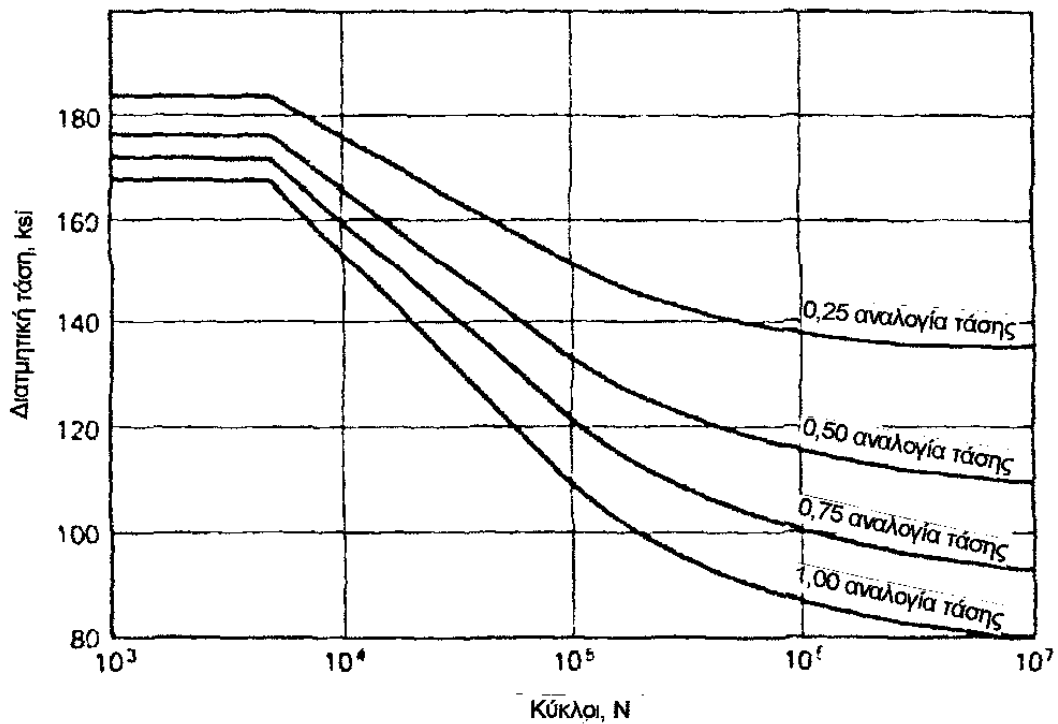
Στο σχήμα 64 μπορούμε να δούμε ότι για τα μουσικά ελατήρια από σύρμα με προδιαγραφές ASTM A228, η σχεδιαστική τάση στους 10^6 κύκλους είναι περίπου $56,3\text{kg/mm}^2$ το οποίο σημαίνει ότι ο σχεδιαστής θα είχε κάποια ελευθερία για να εφαρμόσει αυτή την τάση. Εντούτοις για ελατήρια με μια μικρή τιμή καταλόγου περίπου 3, η συγκέντρωση τάσης στην εσωτερική ακτίνα είναι επαρκώς μεγάλη. Η μικρή διάμετρος του σύρματος (κάτω από 2,54mm) δίνει έμφαση στον κίνδυνο που υπάρχει για επιπλέον συγκέντρωση τάσης από τις επιδράσεις της επιφάνειας, έτσι ώστε η υποδεικνυόμενη σχεδιαστική πρακτική να θεωρείτε αποδεκτή.

Ο τύπος της εφαρμογής (συνθήκες εργασίας) είναι εξαιρετικά σημαντικός αναφορικά στο σχεδιασμό ελατηρίων. Οι αυτόματες βαλβίδες και τα ελατήρια μετάδοσης (μεταβίβασης) κίνησης είναι δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα. Τα ελατήρια βαλβίδων θα έφταναν τους 10^6 κύκλους με 10^3 ώρες λειτουργίας, που είναι ένας χρόνος που υπερβαίνεται εύκολα από όλες τις μηχανές. Ο αριθμός των επαναλήψεων για τα ελατήρια μεταβίβασης στον ίδιο χρόνο είναι μικρότερος κατά 2 ή 3 τάξεις μεγέθους. Συνεπώς ο σχεδιαστής ελατηρίων θα έχει δύο εντελώς διαφορετικά προβλήματα να αντιμετωπίσει. Τα δεδομένα υποδεικνύουν τις μεγαλύτερες επιτρεπόμενες τάσεις για ελατήρια μετάδοσης κίνησης, καθώς και τους λιγότερους κύκλους μέχρι την αστοχία.



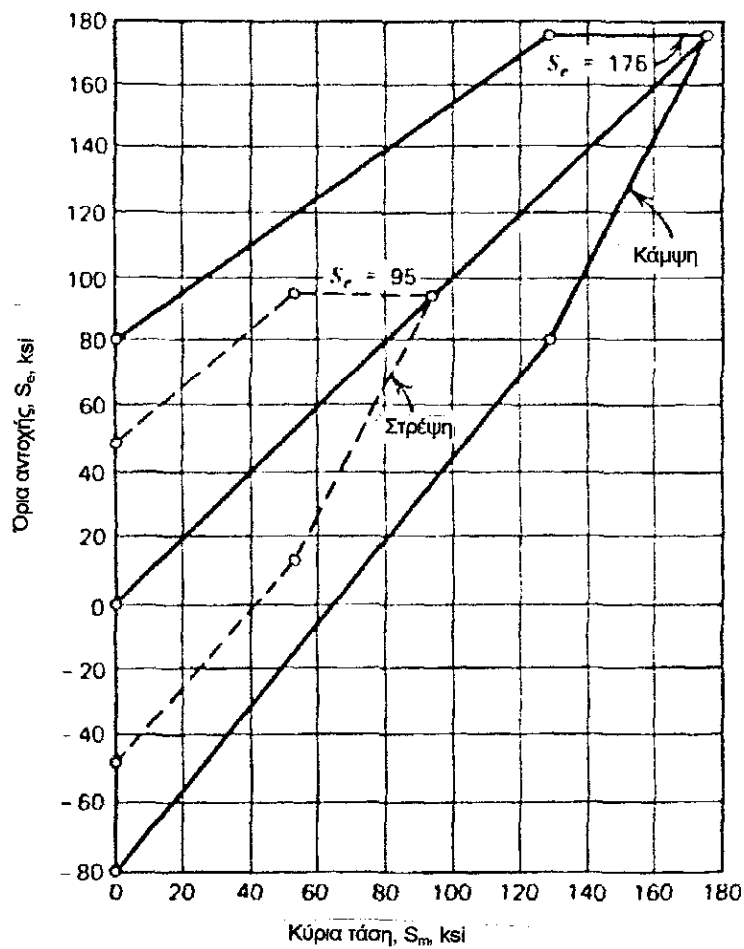
Σχήμα 64: Καμπύλες κόπωσης για μουσικά σύρματα.

Τα ελατήρια με μεγάλη διάρκεια ζωής απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της εφαρμοζόμενης τάσης για δυναμική φόρτιση. Οι S-N καμπύλες όπως αυτές των σχημάτων 64 και 65 για συγκεκριμένα κράματα και κατασκευές ελατηρίων είναι ένα πιθανό σημείο αρχής, αλλά δεν είναι διαθέσιμες για τον εξαιρετικά μεγάλο αριθμό των συνδυασμών που είναι επιθυμητοί.



Σχήμα 65: Καμπύλες κόπωσης για μουσικά σύρματα για διάφορες αναλογίες τάσης.

Είναι διαθέσιμα μερικά διαγράμματα του Goodman, σχήματα 66 και 67, που είναι τυπικά για ελλειπτικά ελατήρια και δείχνουν την επιτρεπόμενη ακτίνα της εναλλασσόμενης τάσης στους 10^7 κύκλους. Οι οριζόντιες γραμμές υποδεικνύουν την περιοριστική τάση πέρα από τις οποίες έχουμε θραύση.

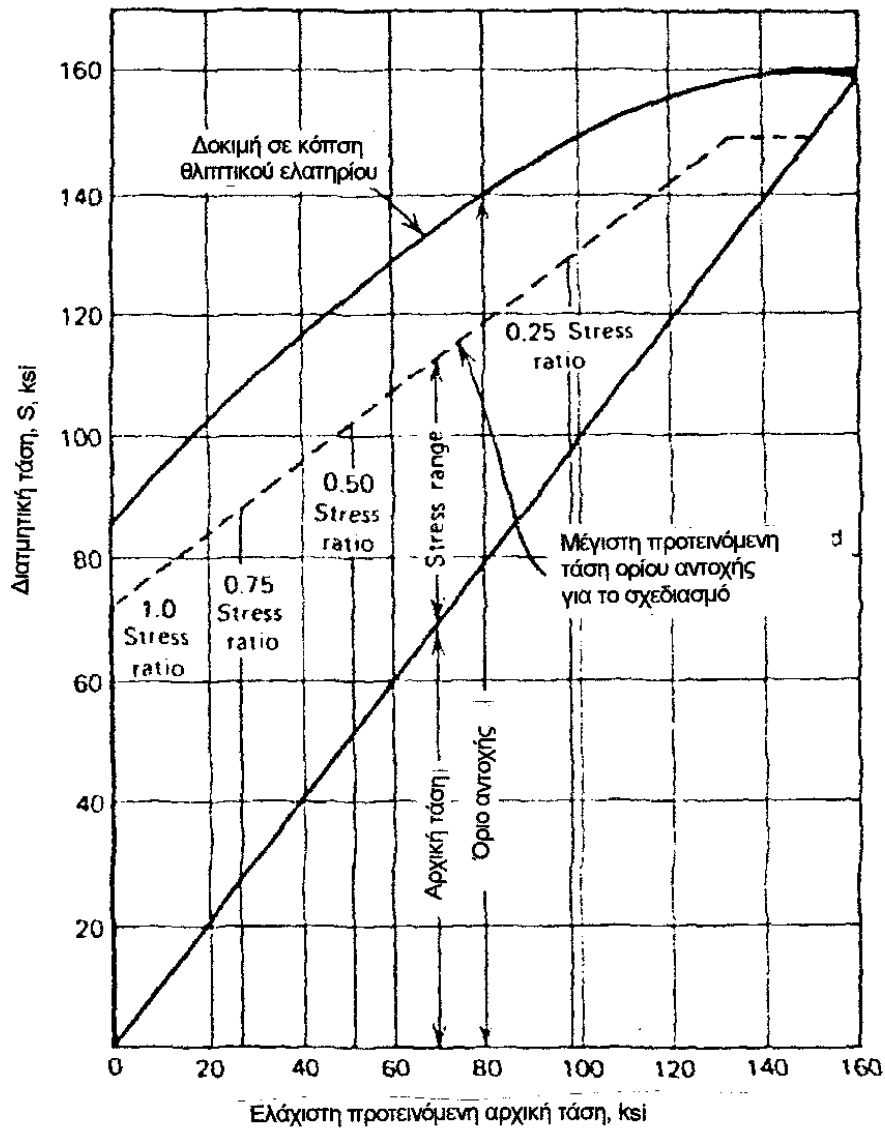


Σχήμα 66: Διάγραμμα του Goodman για SAE 9250 χάλυβα ελατηρίου. $C=0,50\%$, $Si=2,0\%$, $Mn=0,75\%$.

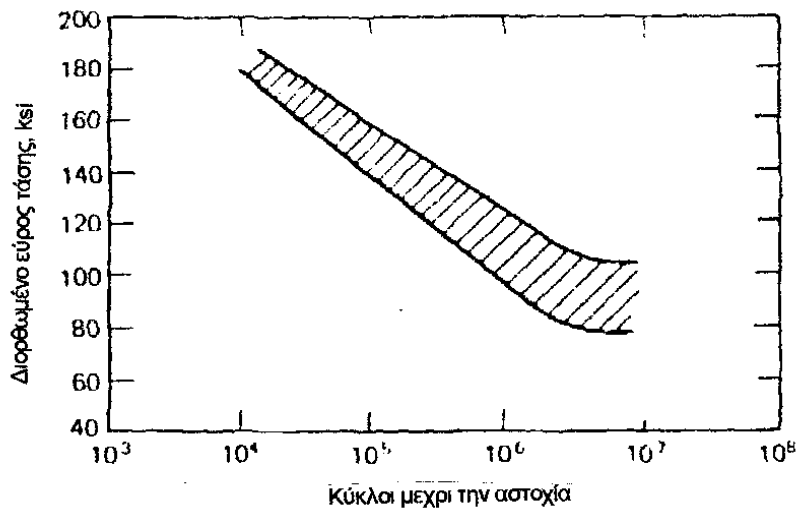
Τα ελικοειδή ελατήρια χρησιμοποιούνται φυσικά ευρέως και οι λεπτομέρειες της συμπεριφοράς τους σε κόπωση έχουν μελετηθεί σε ακραίες περιπτώσεις. Για μουσικό σύρμα έχει δημιουργηθεί μια κλίμακα διασποράς όπως στο σχήμα 68. Θα πρέπει να αναμένεται σημαντική διασπορά στη διάρκεια ζωής των ελατηρίων εξαιτίας των πολυάριθμων και μόνο μερικώς καθορισμένων παραμέτρων που εφαρμόζονται στα σχέδια. Γενικά το πλάτος της κλίμακας αποδίδεται στην ονομαστική διαφορά και της εφελκυστικής και της στρεπτικής αντοχής των συρμάτων, με αλλαγές στη διάμετρο, δηλαδή ότι τα όρια κόπωσης μειώνονται αυξανόμενης της διαμέτρου. Αλλά καμία από τις άλλες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου και του ευρετηρίου, δεν φάνηκε ιδιαίτερα σχετική. Από τις προσπάθειες συσχέτισμού αυτών των παραμέτρων μαζί με τα αποτελέσματα των δοκιμών λειτουργίας ολοκληρωμένων ελατηρίων, μόνο πολύ λίγες ήταν επιτυχείς στον ορισμό του σύρματος από τον οποίο τα

ολοκληρωμένα ελατήρια θα μπορούσαν ή όχι να φέρουν τις απαιτήσεις για συγκεκριμένη διάρκεια ζωής.

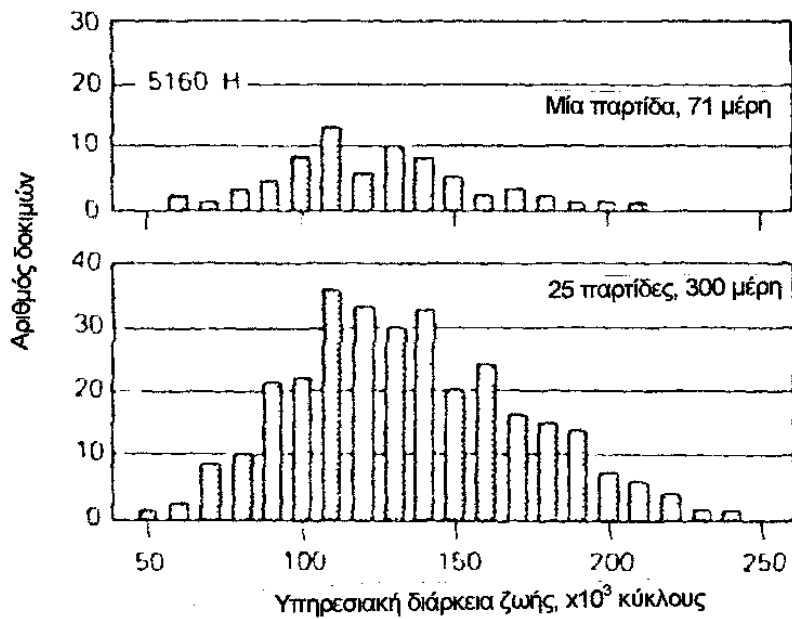
Σαν αποτέλεσμα των απευθείας δοκιμών λειτουργίας σε μη ελικοειδή ελατήρια, τα σχήματα 69 και 70 δείχνουν τη συμπεριφορά των δοκών στρέψης και των ελατηρίων με φύλλα.



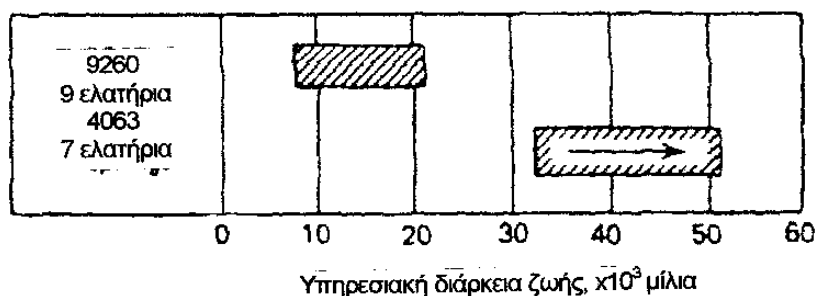
Σχήμα 67: Γενικό διάγραμμα του Goodman για μουσικό σύρμα.



Σχήμα 68: Τυπική κλίμακα διασποράς δοκιμών σε κόπωση μουσικού σύρματος ελικοειδών ελατηρίων, εύρος τάσης από μηδέν ως το μέγιστο.

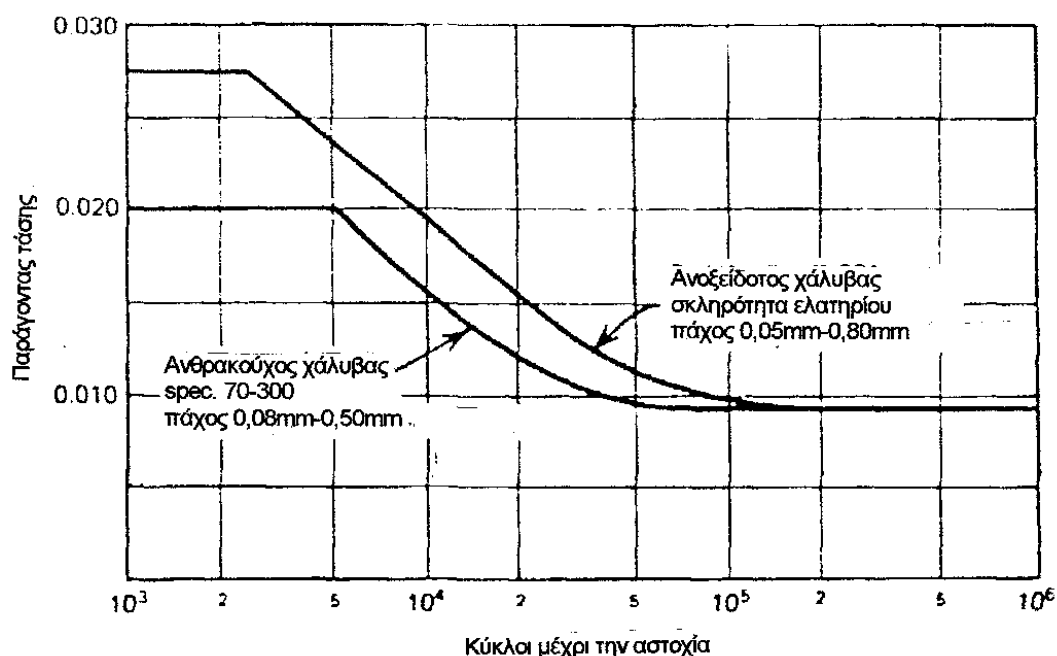


Σχήμα 69: Αποτελέσματα δοκιμών σε κόπωση του ελατηρίου της δοκού στρέψης μπροστινής ανάρτησης από 5160H χάλυβα.



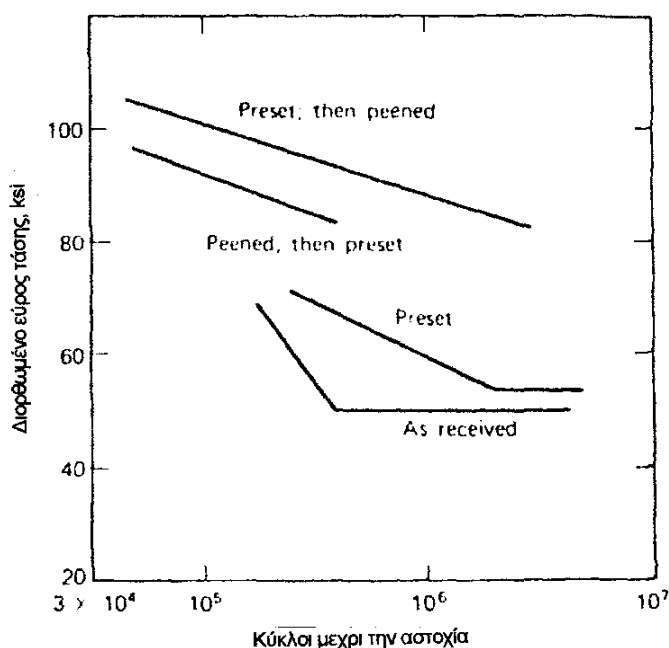
Σχήμα 70: Αποτελέσματα δοκιμών ελατηρίων μπροστινής ανάρτησης φορτηγού 1-1/2 τόνου. Το βέλος στην κάτω μπάρα υποδεικνύει ότι ορισμένα ελατήρια λειτουργούν ακόμη στο τέλος της δοκιμής.

Οι σχεδιαστικές καμπύλες του σχήματος 71 σχεδιάστηκαν κατά προσέγγιση 200 σημείων για κάθε υλικό, για τον ειδικό τύπο ελατηρίου που είναι γνωστός ως Neg'ator ή ο τύπος της σταθερής δύναμης. Μια καμπύλη άνω ορίου θα εμφανίζονταν περίπου 1,5 φορά μεγαλύτερη από την τεταγμένη για κάθε διάρκεια ζωής. Στο κεκλιμένο τμήμα η μετατόπιση της τετμημένης ή η διαφορά στη διάρκεια ζωής θα ήταν περίπου μιας τάξης μεγέθους. Οι περιορισμοί της σχεδιαστικής προσέγγισης και των ιδιοτήτων των υλικών διαφέρουν ακόμα αρκετά για να αποκλείσουν μια ακριβή πρόβλεψη της απόδοσης με βεβαιότητα.



Σχήμα 71: Παράγοντες τάσης ελατηρίου του Neg'ator.

Η διάρκεια ζωής των ελατηρίων είναι πολύ ευαίσθητη σε επιφανειακές ατέλειες για κάθε τεμάχιο που καταπονείται από κυκλική τάση. Η δυσκολία στην περιγραφή και μέτρηση των ατελειών οδηγεί σε έλλειψη αριθμητικών δεδομένων για τις επιδράσεις τους εξαιτίας των συνθηκών: 1) η αδυναμία παραγωγής απόλυτα ομαλού σύρματος ή κορδέλας και κατασκευής ελατηρίων χωρίς σημάδια ή βαθουλώματα και 2) η γνωστή ευεργετική επίδραση της διάρκειας ζωής σε κόπωση να προκαλεί τάσεις θλίψης στην επιφάνεια. Η διαδικασία συνήθως εφαρμόζεται σε κατεργασία εν θερμώ βαριών συρμάτων μονάδων όπου δρα ώστε να βοηθά τον υπολειπόμενο εφελκυσμό από την τυποποίηση και να παράγει επιφανειακή θλίψη. Το σχήμα 72 ξεχωρίζει τα πλεονεκτήματα της προτοποθέτησης.



Σχήμα 72: Καμπύλες σε κόπωση για ελικοειδή ελατήρια.

Οι χάλυβες για τα ελατήρια καλύπτουν μια μεγάλη ακτίνα συνθέσεων: ανθρακούχοι χάλυβες με μέση προς μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο AISI 1050-1095 για μορφοποιημένα εν ψυχρώ ελατήρια και τα κράματα με μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα για διαμορφώσεις εν θερμώ. Το δημοφιλές μουσικό σύρμα ASTM A228 είναι το καλύτερης ποιότητας σύρμα από ανθρακούχο χάλυβα για μικρά ελατήρια. Η επιφανειακή του ποιότητα είναι μεγάλη, συγκρινόμενη με αυτή των ελατηρίων βαλβίδων. Το σύρμα ASTM A227 είναι το πιο φθινό και με τη μικρότερη ποιότητα επιφάνειας και συνήθως χρησιμοποιείται για μικρές τάσεις.

Για μέτρια αντίσταση στη διάβρωση και στη θερμοκρασία το εν ψυχρώ διαμορφωμένο A313 (τύπος ανοξειδωτου χάλυβα) είναι μια πολύ δημοφιλής επιλογή και έχει άριστη επιφανειακή ποιότητα. Είναι διαθέσιμο σε διάφορες σκληρότητες, λίγο ακριβότερο από τον ανθρακούχο χάλυβα για σχέδια που απαιτούν διαμέτρους περίπου 0,3mm αλλά λιγότερο δαπανηρό από το μουσικό σύρμα κάτω από τα 0,3mm εξαιτίας τις έλλειψης ανάγκης για ελασματοποίηση. Ο ανοξειδωτος χάλυβας 316 είναι ένα καλό σύρμα για ελατήρια έχοντας καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση από τον 302 ιδιαίτερα στο αλμυρό νερό αλλά δεν είναι ιδιαίτερα διαθέσιμος.

Μόλις καθοριστεί το απαιτούμενο επίπεδο αντοχής και οι συνθήκες του περιβάλλοντος επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση χάλυβα, η επόμενη πιο σημαντική κατάσταση είναι αυτή της ποιότητας επιφάνειας. Σε κρίσιμες εφαρμογές, οι λεπτομέρειες των επιφανειακών συνθηκών και η μελέτη μπορούν κάλλιστα να καθοριστούν μέσω του κατασκευαστή και του χρήστη. Το μήκος και η θέση των αρμών και των αρθρώσεων και το βάθος της έλλειψης άνθρακα είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Οι συνήθεις μέθοδοι μελέτης των συμφωνηθέντων παραμέτρων είναι η οπτική παρατήρηση, τα μαγνητικά μόρια, το μαύρο φως (Black light) και η μικρογραφία.

Για μια γενική αντίσταση στη διάβρωση και μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, επιλέγονται για υλικά ελατηρίων κράματα με βάση το χαλκό. Για μεγάλες τάσεις και εφαρμογές με μεγάλες διάρκειες ζωής προτιμάται βηρύλλιο με χαλκό (1,7-2,0% Be) γιατί μπορεί να σκληρυνθεί γρήγορα ως Rc40 και συνεπώς γίνεται συγκρίσιμο με πολλούς χάλυβες σε μηχανολογικές συσκευές. Επίσης διατηρεί την ελαστική του αντοχή ως τους 873°C αν και το ποσοστό απώλειας της είναι μεγάλο σε λίγο μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η αντοχή του σε κόπωση σε θερμοκρασία δωματίου στους 10^8 κύκλους από 22,5kg/mm² ανήλθε στα 29,5kg/mm² στη σκληρυμένη κατάσταση. Η αντοχή εφελκυσμού μεταβάλλεται ομοίως από 49,2kg/mm² στα 140,7kg/mm². Και οι ορειχάλκινοι και οι νικελιούχοι άργυροι έχουν όριο κόπωσης περίπου 14,1kg/mm², ενώ ο φωσφορούχος μπρούντζος και ο OFHC χαλκός έχουν λίγο μικρότερες τιμές. Εντούτοις η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το όριο κόπωσης γι' αυτά τα κράματα. Οπότε πρέπει να γίνεται πάντα ένας συμβιβασμός σε ηλεκτρικές εφαρμογές, ενώ η αντίσταση στη διάβρωση από την άλλη πλευρά θα ήλεγχε την εκλογή του κράματος.

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές

Παράδειγμα 1^ο

Θεωρούμε μια κοχλίωση για μια κυκλική χαλύβδινη πλάκα σε μια δεξαμενή πεπιεσμένου αέρα με δύναμη 4.000kg. Βρείτε την F_{max} για κοχλίες που καταπονούνται σε εφελκυσμό με αντικειμενικό σκοπό την αποτροπή της απώλειας πίεσης.

- 1) Αρχικά υποθέτουμε έναν αριθμό κοχλιών και το μέγεθος τους. Εδώ χρειάζονται 10 κοχλίες με διάμετρο 12.7mm.
- 2) Υποθέτουμε ότι η κατανομή του φορτίου είναι ομοιόμορφη στην περιφέρεια της δεξαμενής και έτσι το φορτίο για κάθε κοχλία θα είναι $W=400\text{kg}$.
- 3) Επιλέγουμε ένα δοκιμαστικό μέγεθος κοχλία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν NAS-4 SAE Grade 2 για τον οποίο το μέγιστο φορτίο σύσφιγξης είναι 615kg ή έναν Class T-1 με έσχατο φορτίο 693.5kg.
- 4) Από τον πίνακα 1 λαμβάνουμε μία τιμή για το r όπως 0.45.
- 5) Επιλέγουμε μια τιμή για την αναλογία W/P_i . Εδώ δοκιμάζουμε το 0.3.
- 6) Υπολογίζουμε το φορτίο πριν τη λειτουργία:
 $P_i=(1/0.3)\cdot W=3\cdot 400\text{kg}=1200\text{kg}$.
- 7) Από τις καμπύλες του σχήματος 6 για $r=0.45$ και $W/P_i=0.3$ παίρνουμε $F_{max}/P_i=1.09$.
- 8) Υπολογίζουμε το συνολικό φορτίο στον κοχλία:
 $F_{max}=1.09\cdot 1200\text{kg}=1310\text{kg}$.

Από τον παραπάνω υπολογισμό φαίνεται ότι η F_{max} υπερβαίνει την ικανότητα του αρχικού μεγέθους και αντοχής των κοχλιών που επιλέξαμε. Απαιτούνται κοχλίες βαθμού 8 ή 5 αρίστου σπειρώματος τουλάχιστον ή μια κλάση T-4. Όλες οι παραπάνω επιλογές δίνουν σωστή λύση, αλλά η τελική μας επιλογή μπορεί να διαφοροποιηθεί εξαιτίας περιορισμών όπως το κόστος και η διαθεσιμότητα.

Επιλέγουμε έναν κοχλία NAS-5 βαθμού 1

- 1) Όπως προηγουμένως.
- 2) Όπως προηγουμένως.

- 3) Φορτίο σύσφιγξης=1080kg. Έσχατο φορτίο=1476kg.
- 4) $r=0.62$.
- 5) $W/P_i=0.3$.
- 6) Φορτίο πριν τη λειτουργία όπως προηγουμένως.
- 7) $F_{max}/P_i=1.12$ (γραμμή 2, σχήμα 6).
- 8) $F_{max}=1.12 \cdot 1200\text{kg}=1350\text{kg}$, η οποία και πάλι υπερβαίνει την ικανότητα του κοχλίου.

Δοκιμάζουμε έναν κοχλία NAS-6 βαθμού 2.

- 1) Όπως προηγουμένως.
- 2) Όπως προηγουμένως.
- 3) Φορτίο σύσφιγξης=1600kg. Έσχατο φορτίο=2265kg.
- 4) $r=0.78$.
- 5) $W/P_i=0.3$.
- 6) Φορτίο πριν τη λειτουργία όπως προηγουμένως.
- 7) $F_{max}/P_i=1.13$ (γραμμή 2, σχήμα 6).
- 8) $F_{max}=1.13 \cdot 1200\text{kg}= 1362.5\text{kg}$.

Συγκρίνοντας τα φορτία βλέπουμε ότι υπάρχει ένα θετικό περιθώριο.

Παράδειγμα 2°

Ένας κοχλίας κλάσης T-8, AN-6 συνδέει δύο πλάκες πάχους 12,7mm η κάθε μία από υλικό 2024-T851. Καθορίστε τις αναγκαίες διαστάσεις της ατσάλινιας ροδέλας για να αναπτύξουμε την ύστατη τάση θλίψης στις πλάκες με συντελεστή ασφαλείας 1.5 στο φορτίο. Δίνεται το έσχατο φορτίο εφελκυσμού $P_{υστ}=6750\text{kg}$.

Με αυτό το συντελεστή ασφαλείας το επιτρεπόμενο φορτίο θα είναι:

$$P_{επ} = \frac{P_{υστ}}{k} = \frac{6750\text{kg}}{1.5} \Rightarrow P_{επ} = 4500\text{kg}$$

Η έσχατη τάση θλίψης γι' αυτό το υλικό είναι $F_c=42.2\text{kg/mm}^2$. Η ελάχιστη επιφάνεια θλίψης που θα αποτρέψει την κάμψη της πλάκας είναι:

$$A_p = \frac{P_{επ}}{F_c} = \frac{4500\text{kg}}{42.2\text{kg/mm}^2} \Rightarrow A_p 106.6\text{mm}^2$$

Αρχικά εξετάζουμε αν είναι αναγκαία η τοποθέτηση ροδέλας. Η επιφάνεια του δακτυλίου που φέρει τα φορτία κάτω από την κεφαλή του κοχλίου είναι:

$$A_{\delta} = \frac{\pi}{4} \cdot (0.523^2 - 0.374^2) = 0.102 \text{in}^2 \Rightarrow A_{\delta} = 65.8 \text{mm}^2$$

(Οι διαστάσεις του κοχλίου από τον πίνακα 2).

Η περιοχή αυτή είναι μικρότερη από την A_p , οπότε η χρησιμοποίηση ροδέλας γίνεται αναγκαστική. Επιλέγουμε ένα δοκιμαστικό μέγεθος ροδέλας με $l_w=1.6 \text{mm}$. Τότε $r_w-r_a=l_w \cdot \tan 30^\circ=0.82 \text{mm}$.

Τώρα η A_p γίνεται: $A_p = \frac{\pi}{4} \cdot (0.595^2 - 0.374^2) = 0.17 \text{in}^2 \Rightarrow A_p = 109.65 \text{mm}^2$.

Αυτή η τομή είναι επαρκώς μεγαλύτερη από την απαιτούμενη. Το κοντινότερο τυποποιημένο μέγεθος επίπεδης ροδέλας είναι τύπου B, στενή, με εσωτερική διάμετρο 10.3mm, εξωτερική 180.6mm και ονομαστικό πάχος 24.4mm.

Από το σχήμα 9 και με αυτές τις διαστάσεις παίρνουμε τελικά: $d_c=24.8 \text{mm}$ και $d_i=10.3 \text{mm}$. Τώρα η A_p γίνεται 400mm^2 . Αυτή η σχετικά μεγάλη τιμή της A_p σημαίνει ότι η μέγιστη θλιπτική τάση στην πλάκα θα είναι περίπου το % της αντοχής της πλάκας σε κάμψη, οπότε πετυχαίνουμε ένα συντελεστή συγκέντρωσης τάσης της τάξης του 4 που είναι υπεραρκετός.

Παράδειγμα 3°

Χρησιμοποιώντας κοχλίες AN-5 και τις διαστάσεις του τομέα συμπίεσης μιας τυπικής τουρμπίνας αεροσκάφους, παίρνουμε μια στατική πίεση $f_{bs}=8.1 \text{kg/mm}^2$, συγκρινόμενη με μια αντοχή σε κάμψη 70.3kg/mm^2 . Αν οι λεπτομερειακοί υπολογισμοί περιέχουν έναν συντελεστή ασφαλείας, θα εφαρμόζονταν στην ανάλυση φορτίων στον όρο P της σχέσης 14 μια τιμή 1,15 που χρησιμοποιείται πάντα όπου η κάμψη είναι ο τελικός τύπος της αστοχίας.

Πριν εξετάσουμε την εναλλασσόμενη συνιστώσα υπολογίζουμε το φορτίο πριν τη λειτουργία και το ολικό φορτίο του κοχλίου. Η σχέση 26, που είναι που είναι μια τροποποίηση του τύπου που δόθηκε από τους Dolan και McClow είναι μια έκφραση για το W/P_i στο διαχωρισμό, γι' αυτή την κατάσταση φόρτισης, δηλαδή του εφελκυσμού και της κάμψης.

$$\frac{W}{P_i} = \frac{\frac{1}{E_f \cdot A_f} + \frac{(g-a) \cdot (0-a)}{E_f \cdot (I_b + I_f)}}{\frac{1}{E_f \cdot A_f + E_b \cdot A_b} - \frac{(a-t_c/2) \cdot (0-2 \cdot a)}{E_f \cdot (I_b + I_f)}}$$

Η αντικατάσταση των τυπικών διαστάσεων για χαλύβδινους κοχλίες σε χαλύβδινες φλάντζες δίνει $W/P_i \approx 0.3$. Το φορτίο λειτουργίας W ανταποκρι-νόμενο στη στατική τάση της σχέσης 26 είναι 300kg. Η παραπάνω προσέγγιση υποδεικνύει ότι το φορτίο πριν τη λειτουργία πρέπει να είναι 1/0.3 φορές αυτή η τιμή. Το συνολικό φορτίο του κοχλία F_{max} βρίσκεται από τις σχέσεις:

- 1) Δίνουμε μια τιμή στο r για έναν κοχλία AN-5 σε χαλύβδινες πλάκες από τον πίνακα 2. Εδώ είναι $r=0,84$.
- 2) Από τις καμπύλες στο σχήμα 6 με $W/P_i=0.3$ και $r=0.84$ βρίσκουμε: $F_{max}/P_i=1.12$.
- 3) $P_i=1/0.3 \cdot W=3 \cdot 300\text{kg} \Rightarrow P_i=900\text{kg}$.
- 4) Τότε: $F_{max}=P_i \cdot 1.12 \Rightarrow F_{max}=1008\text{kg}$.

Το φορτίο λειτουργίας στους κοχλίες σ' αυτό το παράδειγμα θεωρήθηκε σαν ένα στατικό φορτίο που αυξάνεται εξαιτίας της εσωτερικής πίεσης. Η κύρια πηγή της εναλλασσόμενης τάσης του φορτίου προέρχεται από την υπολειπόμενη ανισοροπία στο ρότορα στη συχνότητα των 200Hz. Τα φορτία είναι τόσο πολύπλοκα ώστε να μην είναι πρακτικός ο υπολογισμός τους. Εγγυημένα δεδομένα πάνω στη διάτμηση υποδεικνύουν ότι το μέγεθος της μέγιστης τιμής αυτής της κυκλικής δύναμης είναι περίπου 60kg ή $S_a=1,6\text{kg/mm}^2$. Αυτή η τάση προστίθεται στην τιμή του P_{bs} παραπάνω για μια ολική τάση λειτουργίας $9,7\text{kg/mm}^2$ ή $W=375\text{kg}$.

Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 και 4 της παραπάνω διαδικασίας για να βρούμε το συνολικό φορτίο στον κοχλία.

- 3) $P_i=3 \cdot W=3 \cdot 375\text{kg} \Rightarrow P_i=1125\text{kg}$ που αντιπροσωπεύει μια κύρια τάση της τάξης των 29.2kg/mm^2 .
- 4) $F_{max}=1.12 \cdot P_i=1.12 \cdot 1125\text{kg} \Rightarrow F_{max}=1260\text{kg}$ που αντιπροσωπεύει την μέγιστη τιμή της τάσης των $35,2\text{kg/mm}^2$.

Παράδειγμα 4°

Θεωρήστε ένα ζευγάρι τυποποιημένων σωληνωτών φλαντζών ίσου πάχους 20.32mm χωρίς τσιμούχα. Η προτεινόμενη κοχλίωση περιλαμβάνει τέσσερις NAS-16 ατσάλειους κοχλίες με διάμετρο πυρήνα $D_s=20.32\text{mm}$, διαμέτρου $A_b=323.8\text{mm}^2$,

βασική μεγαλύτερη διάμετρο των σπειρών $D=25.4\text{mm}$, ελάχιστη διάμετρο $D_k=21.5\text{mm}$ και εμβαδό των ριζών των σπειρών $A_k=362.5\text{mm}^2$.

Με αυτά τα δεδομένα η σταθερά του ελατηρίου θα είναι:

$$k_b = \frac{E_b A_b}{L} = \frac{21108\text{kg/mm}^2 \cdot 323.8\text{mm}^2}{2 \cdot 20.32\text{mm}} \Rightarrow k_b = 0.168 \cdot 10^6 \text{kg/mm}$$

Η σταθερά ελατηρίου για τη φλάντζα θα είναι: $k_p = \frac{E_p \cdot A_p}{L}$

όπου: $A_p = \frac{\pi}{4} \cdot (d_p^2 - d_n^2)$

Εδώ $d_n=5.6\text{mm}$ και $d_p = 2 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot t \cdot \tan 30^\circ \right) + d_n \Rightarrow d_p = 49.4\text{mm}$.

Θεωρώντας το πάχος της φλάντζας 20.32mm η περιοχή θλίψης είναι:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot (49.4^2 - 35.6^2) \Rightarrow A_p = 920.8\text{mm}^2$$

Το σταθερό φορτίο P είναι 500kg και το εναλλασσόμενο φορτίο W_1 είναι 4000kg . Από τη σχέση $W = \frac{P + W_1}{4}$ και την εξίσωση $P_c = \frac{W}{r+1}$ βρίσκουμε το φορτίο πριν τη λειτουργία για την αποφυγή της αστοχίας.

$$P_c = \frac{P + W}{4 \cdot (r+1)} = \frac{500 + 4000}{4 \cdot (0.17 + 1)} \Rightarrow P_c = 960\text{kg}$$

Η επιπρόσθετη δύναμη W_a δίνεται από τη σχέση 11:

$$W_a = \frac{W_1}{4 \cdot \frac{r}{r+1}} = \frac{4000}{4 \cdot \frac{0.17}{0.17+1}} \Rightarrow W_a = 6882\text{kg}$$

και ομοίως η επιπρόσθετη συνιστώσα της δύναμης είναι:

$$P_a = \frac{P}{4 \cdot \frac{r}{r+1}} = \frac{1000}{4 \cdot \frac{0.17}{0.17+1}} \Rightarrow P_a = 1720\text{kg}$$

Οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στη μικρότερη διατομή ή στις ρίζες όπου η περιοχή που καταπονείται σε εφελκυσμό A_k είναι:

$$S_{\min} = \frac{P_c + P_a - W_a}{A_k} = \frac{960 + 860 - 6882}{420.5} \Rightarrow S_{\min} = -12.04\text{kg/mm}^2$$

$$S_{\max} = \frac{P_c + P_a + W_a}{A_k} = \frac{960 + 860 + 6882}{420.5} \Rightarrow S_{\max} = 20.69\text{kg/mm}^2$$

Η αναλογία πίεσης R είναι $S_{\min}/S_{\max}=-0.582$.

Η κύρια τάση είναι $(S_{\max}+S_{\min})/2 = 4.32\text{kg/mm}^2$ και η εναλλασσόμενη τάση είναι $(S_{\max}-S_{\min})/2 = 16.36\text{kg/mm}^2$ και οι δύο εφελκυστικές.

Η τάση διατμήσεως που αναπτύσσεται από τη ροπή πριν τη λειτουργία είναι $S_s = 16 \cdot \frac{M}{\pi \cdot P_k^2}$ όπου $M=b \cdot P_c \cdot D$ και το β είναι ο συντελεστής τριβής που εδώ έχει ληφθεί 0.15.

Οπότε $M=0.15 \cdot 960 \cdot 25,4=3657,6\text{kg}\cdot\text{mm}$

και $S_s = 16 \cdot \frac{3657.6}{3.14 \cdot 21.5} \Rightarrow S_s = 866.9\text{kg/mm}^2$.

Η τάση διατμήσεως του φορτίου σύσφιγξης με την S_{\max} μας δίνουν τον μέγιστο εφελκυσμό.

$$S_{t\max} = \frac{1}{2} \cdot (S_{\max} + \sqrt{S_{\max}^2 + 4 \cdot S_s^2}) = \frac{1}{2} \cdot (20.69 + \sqrt{26.69^2 + 4 \cdot 866.9^2}) \Rightarrow$$
$$S_{t\max} = 443.9\text{kg/mm}^2.$$

Παράδειγμα 5°

Μια υποδοχή χρειάζεται να φέρει ένα επαναλαμβανόμενο φορτίο 5000kg για 10^6 κύκλους. Τι διαστάσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν αν το υλικό είναι 1)χάλυβας με αντοχή εφελκυσμού 112.6kg/mm^2 ή 2)κράμα αλουμινίου με μεγάλη αντοχή εφελκυσμού, υποθέτοντας ότι οι συντελεστές ασφαλείας και για το φορτίο και για τη διάρκεια ζωής έχουν ήδη εφαρμοστεί.

Το σχήμα 25 δείχνει ότι η βέλτιστη αντοχή θα έπρεπε να ληφθεί όταν η αναλογία της διαμέτρου της οπής προς το πλάτος της υποδοχής είναι περίπου $d/D=0.43$. Η αναλογία μειώνεται λιγάκι αν λάβουμε υπόψη το μέγεθος της επίδρασης που συνεπάγεται η εξίσωση:

$$k_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{an}} = k_s + [b \cdot (1+d) \cdot k_t - k_s] \cdot \frac{n^4}{b-n^4}$$

δίνοντας μια βέλτιστη αναλογία $d/D=0.4$. Η συσχετιζόμενη θεωρητική τιμή του k_t είναι 2.9 για $H/D=1$ ή και περισσότερο. Για επαναλαμβανόμενη φόρτιση οι ονομαστικές κύριες και εναλλασσόμενες τάσεις είναι της ίδιας τιμής:

$$\sigma_{mn} = \sigma_{an} = \frac{P}{1 \cdot (D-d)} = \frac{2500}{0.6 \cdot D \cdot 1}$$

Παράδειγμα 6° (Ακτινικό έδρανο - εύρεση διάρκειας ζωής χωρίς προφόρτιση)

Ένα ένσφαιρο έδρανο βαθιάς αυλάκωσης με μια σειρά έχει υπολογιστεί ότι φέρει ένα βασικό δυναμικό φορτίο 4500kg. Αυτό το έδρανο υποστηρίζει ένα βασικό δυναμικό φορτίο 1000kg με ταχύτητα άξονα 1000rpm. Το έδρανο αποτελείται από 8 σφαίρες με διάμετρο 17.5mm και έχει κύρια διαμετρική χάρη $c=0.0254\text{mm}$. Χωρίς φορτίο πριν τη λειτουργία ποια είναι η ακτινική προβολή και η εκτιμώμενη L_{10} διάρκεια ζωής σε κόπωση;

Από την εξίσωση 41: $k = 1.53 \cdot 10^7 \sqrt{D} \Rightarrow k = 6.4 \cdot 10^7$

$$\begin{aligned} \text{Από την εξίσωση 39: } F &= Z \cdot K \cdot J \cdot \left(\delta - \frac{c}{2} \right)^n = 1000 \cdot 8 \cdot 6.4 \cdot 10^7 \cdot \left(\delta - \frac{0.0254}{2} \right)^{1.5} \cdot J \Rightarrow \\ &\Rightarrow 3.9 \cdot 10^{-6} = (\delta - 0.0127)^{1.5} \cdot J \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Από εξίσωση 40: } \varepsilon &= \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{c}{2 \cdot \delta} \right) = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.0254}{2 \cdot \delta} \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \varepsilon = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.0127}{\delta} \right) \end{aligned}$$

Υποθέτουμε μια τιμή για το $\varepsilon=0.4$. Με αυτή την τιμή στο σχήμα 49 βρίσκουμε το $J=0.21$.

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζουμε το δ :

$$\begin{aligned} 1.86 \cdot 10^{-5} &= (\delta - 0.0127)^{1.5} \Rightarrow \\ &\Rightarrow 7.01 \cdot 10^{-4} = \delta - 0.0127 \Rightarrow \delta = 0.013\text{mm}. \end{aligned}$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε το ε από την εξίσωση:

$$\varepsilon = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.0127}{0.013} \right) \Rightarrow \varepsilon = 0.0115$$

Από το σχήμα 50 μπορούμε να βρούμε μια τιμή για το λ και να υπολογίσουμε την L_{10} διάρκεια ζωής.

$$L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{C}{F} \right)^3$$

Παράδειγμα 7°: (Αξονικό έδρανο - Διάρκεια ζωής με προφόρτιση)

Θεωρούμε ότι το έδρανο του παραπάνω παραδείγματος να μοντάρεται με μια πίεση στον άξονα και στο τρίμα έτσι ώστε η χάρη να είναι τώρα 0,0127mm σφικτή, έτσι ώστε να υπάρχει ένα επιπλέον φορτίο πριν τη λειτουργία. Να βρεθεί η ακτινική προβολή και η L_{10} διάρκεια ζωής σε κόπωση.

$$\text{Από εξίσωση 39: } F = Z \cdot K \cdot J \cdot \left(\delta - \frac{c}{2} \right)^n$$

$$\text{Από εξίσωση 40: } \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{c}{2 \cdot \delta} \right)$$

Λύνοντας το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων βρίσκουμε $\varepsilon=0.577$ και $\delta=0.0406\text{mm}$.

Με $\varepsilon=0.577$ και από το σχήμα 50 βρίσκουμε $\lambda=1.055$ και άρα:

$$L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{C}{F} \right)^3$$

Οπότε όταν το έδρανο μοντάρεται με σύσφιγξη παρουσιάζει αξονική προβολή 0.0406mm που είναι μικρότερη από την προηγούμενη και έχει μια αύξηση κατά 15% στη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Παράδειγμα 8° (Αξονικό φορτίο πριν τη λειτουργία σε διπλό ζευγάρι)

Επιθυμούμε να πάρουμε ένα αξονικό φορτίο πριν τη λειτουργία 250kg από ένα σετ διπλών ένσφαιρων εδράνων επαφής. Τα έδρανα έχουν καμπυλότητα 52% στο εσωτερικό και εξωτερικό αυλάκι, αρχική γωνία επαφής 40° και αποτελούνται από 15 σφαίρες διαμέτρου 12.7mm. Ποιο μέρος από αυτό το φορτίο θα πρέπει να κρατηθεί από το πρόσωπο του εσωτερικού δακτυλιδιού του κάθε εδράνου;

$$\text{Από εξίσωση 47: } B = f_i + f_o - 1 = 0.52 + 0.52 - 1 \Rightarrow B = 0.04$$

Από το σχήμα 52 και για $B=0.04$ βρίσκουμε $G=110000$.

$$\text{Τότε από την εξίσωση 48: } t = \frac{F}{Z \cdot D^2 \cdot G} = \frac{250}{15 \cdot 12.7^2 \cdot 110000} \Rightarrow t = 0.9 \cdot 10^{-6}$$

Από το σχήμα 52 βρίσκουμε το $\delta/B \cdot \Delta=0.022$.

$$\text{Οπότε: } \delta_p = 0.022 \cdot B \cdot D = 0.022 \cdot 0.04 \cdot 12.7 \Rightarrow \delta_p = 0.011\text{mm}.$$

Ο δείκτης ρ προστέθηκε για να σημειωθεί ότι η εκτροπή είναι αποτέλεσμα αξονικής προφόρτισης και μόνο. Επίσης από το σχήμα 52 έχουμε $\alpha - \alpha_0 = 0,9^\circ$. Οπότε: $\alpha_0 = \alpha + 0,9^\circ = 40^\circ + 0,9^\circ = 40,9^\circ$.

Παράδειγμα 9 (Αξονική προφόρτιση + εξωτερικό ωστικό φορτίο σε διπλό ζευγάρι)

Υποθέτουμε ότι τα έδρανα του προηγούμενου παραδείγματος καταπονούνται και από ένα εξωτερικό ωστικό φορτίο και είναι αναγκαίο να βρούμε την αξονική εκτροπή. Θα έπρεπε να θυμηθούμε ότι εξαιτίας της διαφορετικής διεύθυνσης του φορτίου πριν τη λειτουργία στα ξεχωριστά έδρανα, μόνο το ένα έδρανο δέχεται το ωστικό φορτίο. Ονομάζοντας την αξονική εκτροπή των εδράνων εξαιτίας του ωστικού φορτίου και μόνο, δ_t , τότε στο έδρανο 1, από το σχήμα 52, η αξονική εκτροπή θα είναι $\delta_t + \delta_p$ όπου το δ_p είναι η αξονική εκτροπή λόγω προφόρτισης. Αντίστοιχα η αξονική εκτροπή στο έδρανο 2 είναι $\delta_p - \delta_t$. Η τελευταία κατάσταση υπάρχει όσο το έδρανο 2 απαλλάσσεται από το συνολικό φορτίο.

Συνεπώς αναφορικά στην εξίσωση 46:
$$\delta_j = B \cdot D \cdot \frac{\sin(a - a_0)}{\cos a}$$

Έχουμε:
$$\delta_p + \delta_t = B \cdot D \cdot \frac{\sin(a_1 - a_0)}{\cos a_1} \quad (\text{Σχέση 61})$$

και
$$\delta_p - \delta_t = B \cdot D \cdot \frac{\sin(a_2 - a_0)}{\cos a_2} \quad (\text{Σχέση 62})$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις δύο παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε:

$$2 \cdot \delta_p = B \cdot D \cdot \left[\frac{\sin(a_1 + a_0)}{\cos a_1} + \frac{\sin(a_2 + a_0)}{\cos a_2} \right] \quad (\text{Σχέση 63})$$

Επίσης σύμφωνα με τις εξισώσεις 45 και 47:

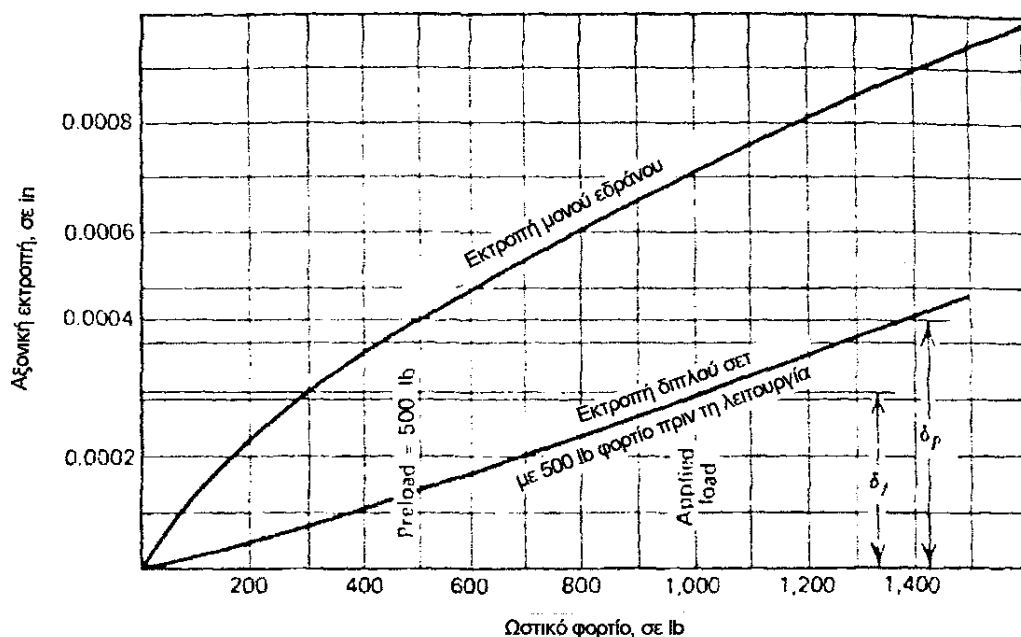
$$F_j = Z \cdot D^2 \cdot G \cdot \sin a \cdot \left(\frac{\cos a_0}{\cos a} - 1 \right)^{1.5} \quad (\text{Σχέση 45})$$

$$B = f_1 + f_0 - 1 \quad (\text{Σχέση 47})$$

$$T = Z \cdot D^2 \cdot G \cdot \left[\sin a_1 \cdot \left(\frac{\cos a_0}{\cos a_1} - 1 \right)^{1.5} - \sin a_2 \cdot \left(\frac{\cos a_0}{\cos a_2} - 1 \right)^{1.5} \right] \quad (\text{Σχέση 64})$$

Οι εξισώσεις 62 και 63 πρέπει να λυθούν ταυτόχρονα ως προς τις άγνωστες γωνίες επαφής α_1 και α_2 . Αυτό γίνεται με έναν υπολογιστή ή με γραφικές μεθόδους.

Καθορίστε την αξονική εκτροπή που προκαλείται από ένα εξωτερικό ωστικό φορτίο 250kg εφαρμοζόμενο στο προφορτισμένο διπλό σετ εδράνων του προηγούμενου παραδείγματος. Δημιουργήστε για κάθε έδρανο την καμπύλη εκτροπής του φορτίου που προκαλείται από την προφόρτιση και μόνο. Αυτό γίνεται επιλέγοντας ένα σχέδιο φορτίου από τον πίνακα 17A από 100 ως 800kg. Τότε χρησιμοποιώντας το σχήμα 49 και τη μέθοδο του παραδείγματος 3 παίρνουμε μια σειρά εκτροπών δ_j . Τοποθετούμε σε μια γραφική παράσταση τις τιμές δ_j και F_j (σχήμα 50). Σημειώστε ότι με ένα φορτίο πριν τη λειτουργία 250kg, το δ_p σε κάθε έδρανο είναι 0.012mm. Μετά τη βοήθεια του σχήματος 54 υπολογίζουμε την επίδραση των επιπρόσθετων αξονικών εκτροπών που προκαλούνται από το εξωτερικό ωστικό φορτίο. Συνεπώς στον πίνακα 17B μια επιπρόσθετη εκτροπή 0.00254mm έχει σαν αποτέλεσμα μια συνολική εκτροπή 0.001374mm στο έδρανο 1 και 0.008636mm στο έδρανο 2. Από το σχήμα 54 τα αντίστοιχα φορτία των εδράνων είναι 335kg και 170kg. Αυτά τα φορτία είναι αντίρροπα και επομένως το αλγεβρικό άθροισμα τους είναι $T=335-170=165$ kg.



Σχήμα 54: Αξονική εκτροπή συναρτήσεϊ του ωστικού φορτίου για απλούς υπολογισμούς.

Τελικά κατασκευάζουμε τη γραφική παράσταση του T συναρτήσεϊ του δ_j στο σχήμα 54. Από την τελευταία καμπύλη με εφαρμοζόμενο φορτίο 500kg η εκτροπή

των δύο εδράνων στη διεύθυνση της φόρτισης είναι 0.00762mm. Το ωστικό φορτίο στο έδρανο 1 είναι 535kg και στο έδρανο 2 είναι 35kg. Αν χρησιμοποιούνταν μόνο ένα έδρανο χωρίς προφόρτιση η αξονική εκτροπή θα ήταν 0.00254mm.

Παράδειγμα 10°

Ένα ελικοειδές ελατήριο θλίψης πρέπει να κατασκευαστεί από μουσικό σύρμα και θα πρέπει να έχει απεριόριστη διάρκεια ζωής. Καθορίστε την επιτρεπόμενη P_{max} και P_{min} για να έχουμε $P_{max}/P_{min}=4$ και συντελεστή ασφαλείας 1.8.

$$\begin{aligned} \text{Δίνονται: } \quad d &= 1.6 \text{ mm} \\ D &= 4.8 \text{ mm} \\ C &= D/d = 3 \\ S_{syp} &= 0.085 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Από εξίσωση 54: } \quad k = \frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} + \frac{0.615}{c} \Rightarrow k = 1.58$$

$$\text{Από εξίσωση 57: } \quad k_s = 1 + \frac{1}{2 \cdot c} + \frac{1}{6} \Rightarrow k_s = 1.17$$

$$\text{Από εξίσωση 58: } \quad k_c = \frac{k}{k_s} = \frac{1.58}{1.17} \Rightarrow k_c = 1.35$$

Με αυτή την τιμή του k_c και στο σχήμα 63 βρίσκουμε το διορθωτικό παράγοντα συγκέντρωσης $k_f=1.31$. Με αντικατάσταση $P_{max}/P_{min}=4$ και των παραπάνω δεδομένων στην εξίσωση 59α και 60 έχουμε:

$$S_a = k_f \cdot k_s \cdot \frac{8 \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (\text{Σχέση 59.α})$$

$$S_a = k_s \cdot \frac{8 \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (\text{Σχέση 60})$$

$$\begin{aligned} \text{Μετά τις πράξεις βρίσκουμε: } \quad S_a &= 5.39 \cdot P_{max} \\ S_m &= 6.86 \cdot P_{max} \end{aligned}$$

Από τον πίνακα 22 το εύρος της τάσης αντοχής είναι 53.4 kg/mm^2 από την οποία βρίσκουμε $S_{max}/2=26.7 \text{ kg/mm}^2$. Αυτή η τιμή φαίνεται σαν σημείο A στο διάγραμμα του Goodman, σχήμα 62. Η αντοχή από ροπή $S_{syp}=0.085 \text{ kg/mm}^2$ είναι το σημείο B και η γραμμή BA προεκτεινόμενη θα τμήσει τον άξονα των S_a στο σημείο

που αντιστοιχεί στην τιμή 42.2kg/mm^2 . Η αναλογία της εναλλασσόμενης προς τη κύρια τάση είναι:

$$R = \frac{S_a}{S_m} = \frac{1.71}{2.18} \Rightarrow R = 0.784$$

Η γραμμή OC κατασκευάζεται με μια κλίση $R=0.784$. Η τομή της με την AB μας δίνει τις οριακές τιμές των S_a και S_m στα 24.6kg/mm^2 και στα 31.6kg/mm^2 αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας το συντελεστή ασφαλείας και λύνοντας ως προς P_{\max} την εξίσωση 60 παίρνουμε:

$$P_{\max} = \frac{S_a}{1.71 \cdot F \cdot S} = \frac{24.6}{1.71 \cdot 1.8} = 8\text{kg}$$

και $P_{\min} = \frac{P_{\max}}{4} = 2\text{kg}$

Η μέγιστη τάση ελέγχεται από την αντοχή κάμψης:

$$S_{\text{smax}} = \frac{8 \cdot k_s \cdot D \cdot P_{\max}}{\pi \cdot d^3} = \frac{8 \cdot 1.167 \cdot 4.8 \cdot 8}{3.14 \cdot 1.6^3}$$
$$\Rightarrow S_{\text{smax}} = 27.9\text{kg/mm}^2$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ατζέντα υπολογισμού στοιχείων μηχανών: συγκολλήσεις, ηλώσεις, κοχλίες, ελατήρια, άξονες-άτρακτοι, ιμάντες-αλυσίδες, συμπλέκτες-φρένα, οδοντωτοί τροχοί, έδρανα, πίνακες, διαγράμματα υπολογισμών, κλπ. / Ε. Σγουρού, Μ. Πάντου, Γρ. Φούντα.
2. Engineering considerations of stress, strain, and strength / Robert C. Juvinall.
3. Handbook of practical gear design / Darle W. Dudley.
4. Στοιχεία μηχανών / Νικ. Ι. Θεοφανόπουλου.
5. Στοιχεία μηχανών / Λαζάρου Ε. Λαζαρίδη.
6. Στοιχεία μηχανών Ι / Ιωαν. Στεργίου.
7. Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών / Θ. Ν. Κωστόπουλος.
8. Στοιχεία μηχανών ΙΙ / Βασ. Παπαμητούκα.
9. Στοιχεία μηχανών / Ρ. Γραικούση.
10. Mechanism design : analysis and synthesis / Arthur G. Erdman, George N. Sandor.
11. Machine Design for mobile and industrial applications / By Gary ,Krutz, John K.Schueller and Paul W.Glaar
12. Στοιχεία μηχανών / G. Niemann ; μετ. Παν. Δρεπανιώτης.
13. Στοιχεία μηχανών / G. Niemann ; μετ. Γιάννης Ανδρεόπουλος.
14. The Mechanical design process / David G. Ullman.
15. Design of machinery : an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines / Robert L. Norton.
16. Design of machine elements / M. F. Spotts.