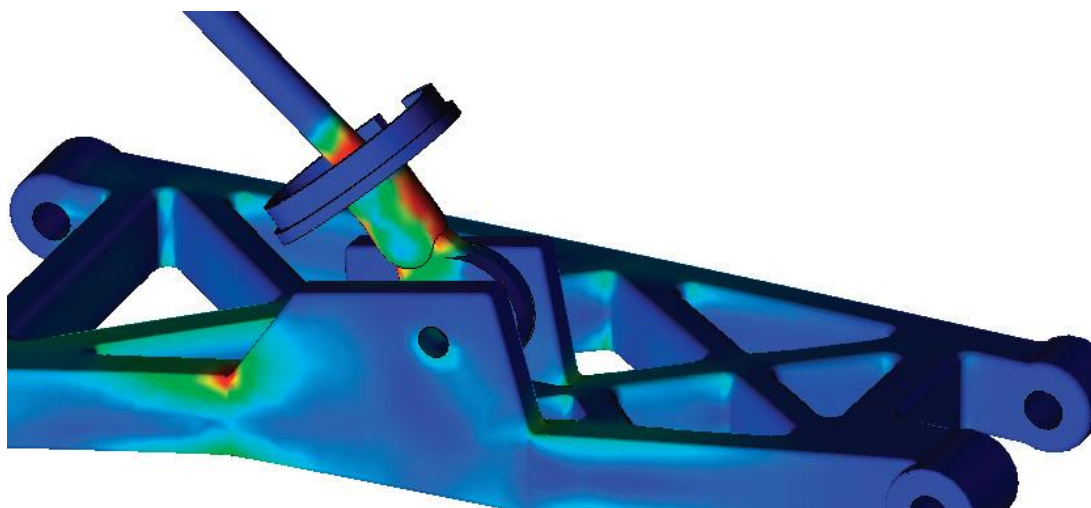


ΚΟΠΩΣΗ και SolidWorks SIMULATION Professional, Σχεδιάστε τις κατασκευές σας προβλέποντας την κόπωση.

Η εμπειρία και πολλές φορές τα τραγικά λάθη, οδηγούν στην γνώση και την πρόοδο: το 1954, ο όρος 'κόπωση' εμφανίστηκε με πηχαιούς τίτλους στις εφημερίδες της εποχής και έκτοτε παραμένει ανεξίτηλα χαραγμένος, τόσο στο χώρο της αεροπορικής βιομηχανίας όσο και στην κοινή γνώμη. Ο λόγος ήταν δύο αεροπορικά ατυχήματα, στα οποία εμπλεκόταν το αεροσκάφος de Havilland Comet. Το συγκεκριμένο αεροσκάφος χαρακτηριζόταν από δύο πρωτιές: ήταν το πρώτο αεροσκάφος που χρησιμοποιήθηκε ως επιβατικό και ήταν το πρώτο αεροσκάφος με συμπιεζόμενη καμπίνα επιβατών. Ωστόσο, η τεχνική που είχε χρησιμοποιηθεί (runch riveting) για την τοποθέτηση πριτσινιών περιμετρικά των, τετραγωνικού σχήματος, παραθύρων της καμπίνας επιβατών, προκάλούσε την εμφάνιση μικρορωγμών. Ο συνδυασμός της δημιουργίας μικρορωγμών από το στάδιο κατασκευής του αεροσκάφους, της επαναλαμβανόμενης συμπίεσης-αποσυμπίεσης της καμπίνας επιβατών κατά την υπηρεσιακή ζωή του αεροσκάφους και του γεγονότος ότι οι εν λόγω μικρορωγμές εμφανίζονταν κοντά σε περιοχές με υψηλό συντελεστή συγκέντρωσης τάσης (παράθυρα τετραγωνικού σχήματος), προκάλεσε την εν πτήση εκρηκτική αποσυμπίεση δύο επιβατικών αεροσκαφών de Havilland Comet με συνολική απώλεια 68 ανθρώπων. Η τραγωδία του de Havilland Comet αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τους μηχανικούς της αεροπορικής βιομηχανίας και αφετηρία για την ανάπτυξη τεχνικών σχεδίασης και κατασκευής ασφαλέστερων αεροσκαφών.

Η έννοια της κόπωσης εμφανίζεται σε όλες τις κατασκευές οι οποίες λειτουργούν υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Ένα εξαιρετικά χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο για την κατανόηση, πρόβλεψη και αποφυγή αστοχιών λόγω κόπωσης αποτελεί η Ανάλυση των Κατασκευών με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) και είναι ο ρόλος του SolidWorks SIMULATION Professional.



Τι είναι η κόπωση;

Οι σχεδιαστές κατασκευών θεωρούν την συνολική αντοχή της κατασκευής και των επί μέρους τμημάτων αυτής ως τον πλέον σημαντικό παράγοντα ασφαλείας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, οι Μηχανικοί σχεδιάζουν τις κατασκευές έτσι ώστε αυτές να είναι ικανές να παραλαμβάνουν με ασφάλεια τα πλέον υψηλά φορτία, τα οποία

είναι πιθανό να εμφανισθούν κατά τη διάρκεια ζωής των κατασκευών, ενώ, για λόγους ασφαλείας, προσαυξάνουν τα φορτία αυτά με έναν συντελεστή (συντελεστής ασφαλείας).

Κατά τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής, η πλέον πιθανή καταπόνηση είναι εξ αιτίας της κυκλικής επιβολής φορτίων και όχι λόγω επιβολής στατικών φορτίσεων. Συνεπώς, η κυκλική επιβολή φορτίων είναι και η πλέον πιθανή αιτία αστοχίας μίας κατασκευής.

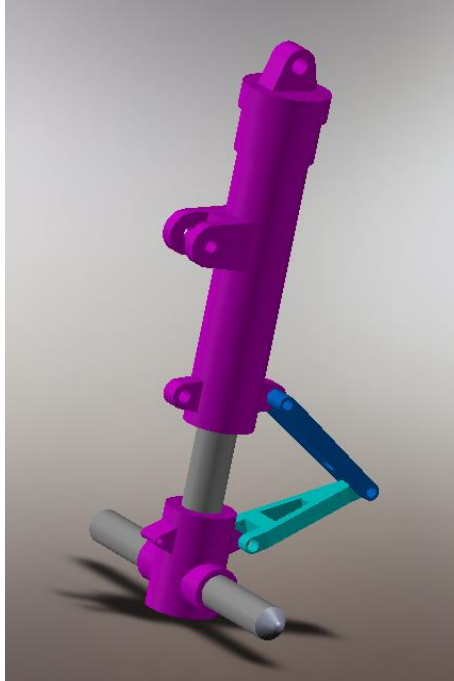
Ως κόπωση ορίζεται η αστοχία εξ αιτίας της επιβολής ενός επαναλαμβανόμενου, ή εν γένει μεταβαλλόμενου στο χρόνο, φορτίου, το οποίο ποτέ δεν είναι ικανό να προκαλέσει αστοχία εάν επιβληθεί μόνον μία φορά. Το βασικό σύμπτωμα της κόπωσης είναι η εμφάνιση ρωγμών, οι οποίες οφείλονται σε τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις. Τέτοιες παραμορφώσεις εντοπίζονται είτε σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσης είτε σε περιοχές στις οποίες υπάρχει κάποιο ελάττωμα υλικού, το οποίο δεν έχει εντοπισθεί εγκαίρως. Σε μία υπολογιστική προσομοίωση, είναι πολύ δύσκολη η μοντελοποίηση ατελειών στη δομή του υλικού. Στην πράξη, σε μία υπολογιστική προσομοίωση θεωρείται ότι το υλικό είναι ελεύθερο ατελειών και η προσοχή επικεντρώνεται στον εντοπισμό περιοχών υψηλής συγκέντρωσης τάσης. Η Ανάλυση των Κατασκευών με τη (ΜΠΣ) βοηθά στην πρόβλεψη της διάρκειας της χρονικής περιόδου, κατά την οποία η κατασκευή δεν θα αστοχήσει λόγω κόπωσης.

Οι μηχανισμοί, οι οποίοι εμπλέκονται στην εμφάνιση της κόπωσης, είναι τρεις:

1. Έναρξη ρωγμών
2. Διάδοση ρωγμών
3. Θραύση

Η Ανάλυση των Κατασκευών με τη (ΜΠΣ) είναι σε θέση να προβλέψει την έναρξη ρωγμών. Υπάρχει ένα σύνολο άλλων υπολογιστικών προσεγγίσεων, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής μη-γραμμικής ανάλυσης με την (ΜΠΣ), με τις οποίες είναι δυνατή η μελέτη των τάσεων και των τροπών που εμπλέκονται στη διάδοση μίας ρωγμής. Ωστόσο, οι Μηχανικοί ενδιαφέρονται πρωτίστως για την αποφυγή εμφάνισης τέτοιων ρωγμών, το οποίο αποτελεί και το κεντρικό θέμα του παρόντος κειμένου. Η διάδοση ρωγμών σχολιάζεται στο Παράρτημα Α.

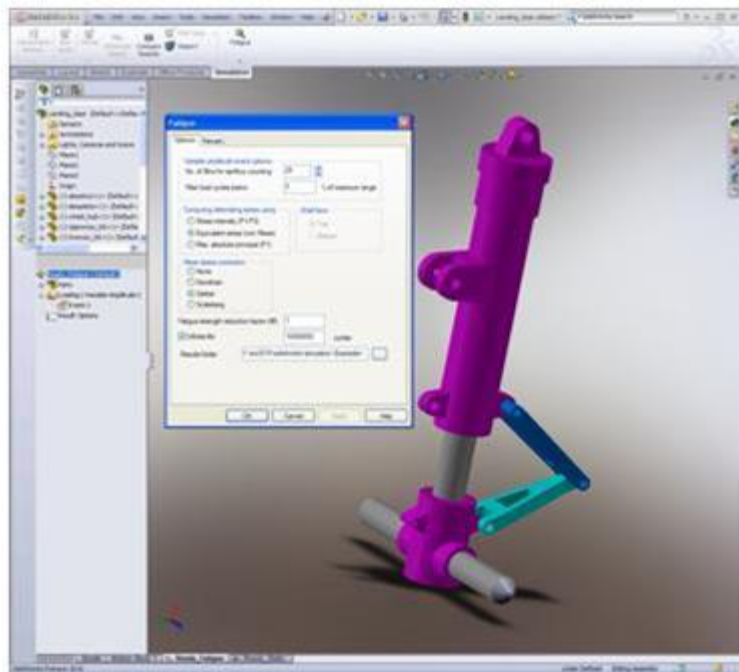
Ως κόπωση ορίζεται η αστοχία εξ αιτίας της επιβολής ενός επαναλαμβανόμενου, ή εν γένει μεταβαλλόμενου στο χρόνο, φορτίου, το οποίο ποτέ δεν είναι ικανό να προκαλέσει αστοχία εάν επιβληθεί μόνον μία φορά.



Σχήμα 5: Σύστημα προσγείωσης αεροσκάφους (μοντέλο SolidWorks),

Καθορισμός αντοχής υλικών σε κόπωση

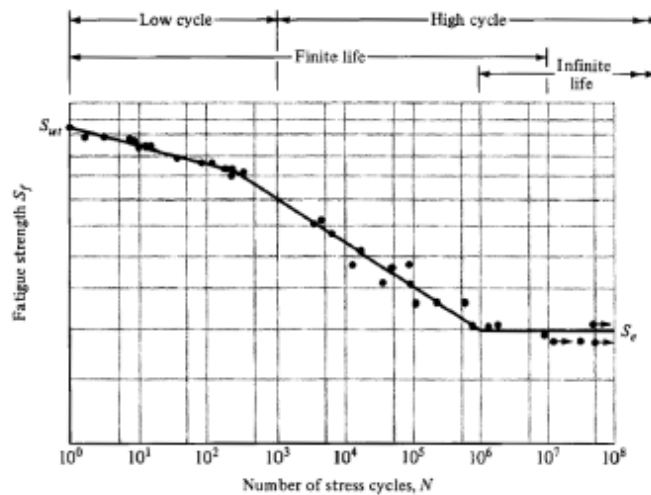
Δύο είναι οι κύριοι παράγοντες καθορισμού του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της εμφάνισης μίας ρωγμής σε ένα δομικό μέλος και της διάδοσής της σε βαθμό αστοχίας του μέλους: το υλικό του δομικού μέλους και το τασικό πεδίο. Οι μέθοδοι ελέγχου της αντοχής υλικών σε κόπωση χρονολογούνται από την εποχή του August Wöhler (1819-1914), ο οποίος ήταν ο πρώτος που διεξήγαγε συστηματική έρευνα επί της κόπωσης μετάλλων. Τυπικές εργαστηριακές (πειραματικές) δοκιμές κόπωσης περιλαμβάνουν την επιβολή κυκλικών φορτίσεων διαφόρων τύπων, όπως αξονικών, καμπτικών και στρεπτικών φορτίσεων. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, καταγράφονται δεδομένα με απώτερο σκοπό την διατύπωση συσχέτισης μεταξύ τύπου φόρτισης (S) και πλήθους κυκλικών φορτίσεων (N), μέχρι αστοχίας λόγω κόπωσης (βλ. Σχήμα 1). Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων αποτυπώνονται κατάλληλα σε διαγράμματα (S)-(N), τα οποία χρησιμοποιούν οι Μηχανικοί προκειμένου να εκτιμήσουν την αντοχή μίας κατασκευής έναντι κόπωσης.



Σχήμα 6: Το περιβάλλον SolidWorks 2010 SIMULATION Professional – Ρυθμίσεις για μελέτη κόπωσης

Μία τυπική καμπύλη (S)-(N) διακρίνεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά σε λιγότερους από 10,000 κύκλους φόρτισης (ολιγοκυκλική κόπωση). Το σχήμα αυτού του τμήματος της καμπύλης εξαρτάται από το υλικό. Μερικά υλικά, όπως οι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, εμφανίζουν ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο τμήμα, μετά από μία συγκεκριμένη τιμή τάσης (όριο κόπωσης). Αντιθέτως, υλικά, τα οποία δεν περιέχουν σίδηρο, δεν εμφανίζουν ένα τέτοιο σχήμα. Εν γένει, δομικά μέλη, τα οποία σχεδιάζονται έτσι ώστε οι εμφανιζόμενες σε αυτά τάσεις να είναι χαμηλότερες από το όριο κόπωσης, δεν θα πρέπει να αστοχούν. Ωστόσο, οι υπολογισμοί αντοχής βάσει του ορίου κόπωσης δεν συμπεριλαμβάνουν την εμφάνιση τοπικών συγκεντρώσεων τάσης, οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν την έναρξη ρωγμής, ακόμα και εάν οι τιμές τους φαίνεται ότι είναι κάτω από το όριο κόπωσης.

Η καταγραφή των μετρήσεων από τις πειραματικές δοκιμές αντοχής σε κόπωση παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη μέση τιμή και το ημι-εύρος της τάσης, εξ αιτίας της οποίας θα επέλθει αστοχία λόγω κόπωσης. Οι, δε, ρωγμές λόγω κόπωσης διαδίδονται μόνον υπό εφελκυσμό. Αυτό σημαίνει ότι εάν εξ αιτίας του, κυκλικά επιβαλλομένου, εξωτερικού φορτίου εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις σε μία περιοχή με ρωγμή, τότε δεν πρόκειται να προκληθεί περαιτέρω διάδοση της ρωγμής. Ωστόσο, εάν η μέση τάση του εν λόγω κυκλικού φορτίου υποδηλοί ότι η συγκεκριμένη περιοχή υπόκειται σε εφελκυσμό, τότε η ρωγμή θα διαδοθεί με τελική κατάληξη την αστοχία λόγω κόπωσης.

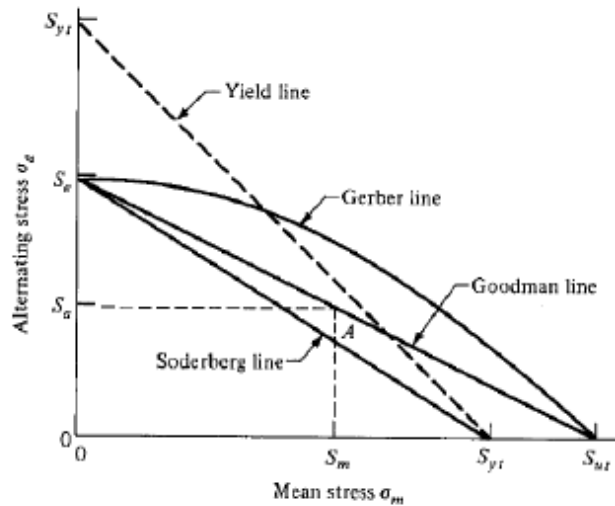


Σχήμα 1: Τυπική καμπύλη S-N (Stress vs Cycles)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ιστορία φόρτισης μίας κατασκευής δίδει μία μη-μηδενική μέση τιμή τάσης. Οι επικρατέστερες μέθοδοι για την αξιοποίηση αυτής της τιμής, προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή σε κόπωση, είναι οι ακόλουθες τρεις:

- Μέθοδος Goodman (γενικά κατάλληλη για ψαθυρά υλικά)
- Μέθοδος Gerber (γενικά κατάλληλη για όλκιμα υλικά)
- Μέθοδος Soderberg (γενικά, η πλέον συντηρητική)

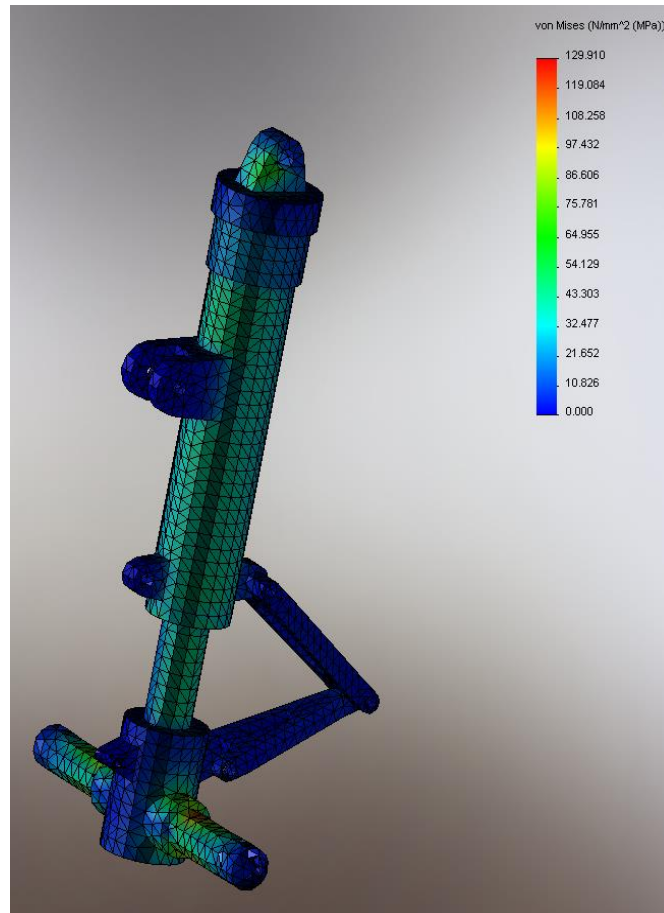
Και οι τρεις μέθοδοι είναι εφαρμόσιμες μόνον όταν οι διαθέσιμες καμπύλες (S)-(N) αφορούν σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Ειδικότερα, οι διορθώσεις, οι οποίες προβλέπονται και από τις τρεις μεθόδους, αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα σε περιπτώσεις κυκλικών φορτίσεων με υψηλή μέση τιμή, συγκριτικά με το εύρος τιμών των εμφανιζομένων τάσεων. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα Goodman, δηλαδή ένα διάγραμμα εύρους κυκλικής φόρτισης συναρτήσει μέσης τιμής της φόρτισης αυτής, στο οποίο φαίνεται η ευθεία της αντοχής του υλικού (yield line) καθώς και οι καμπύλες Goodman, Gerber και Soderberg.



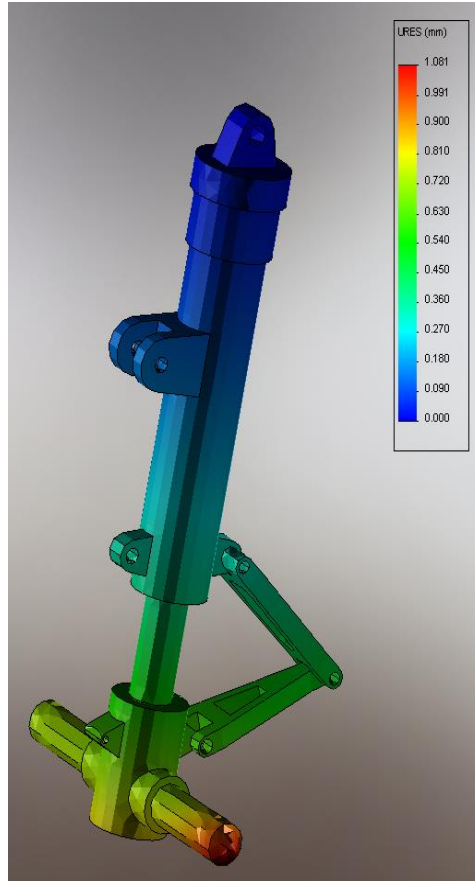
Σχήμα 2: Διάγραμμα Goodman

Οι μετρήσεις από πειραματικές δοκιμές αντοχής σε κόπωση υποδεικνύουν ότι τα όρια κόπωσης εντοπίζονται στο χώρο μεταξύ των καμπυλών Goodman και Gerber. Συνεπώς, για τον υπολογισμό μίας πραγματικής κατασκευής θεωρείται σκόπιμος ο έλεγχος και με τη μέθοδο Goodman και με τη μέθοδο Gerber, ενώ θα πρέπει να επιλέγεται ο πλέον συντηρητικός υπολογισμός εκ των δύο.

Η πειραματική δοκιμή για κάθε μία νέα σχεδίαση είναι πρακτικώς ασύμφορη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εκτίμηση της διάρκειας ζωής μίας κατασκευής απαιτεί την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των επί μέρους δομικών στοιχείων, για δεδομένα φορτία λειτουργίας και υλικά κατασκευής.



Σχήμα 7: Απεικόνιση τασικού πεδίου (τάσεις von Mises), (SolidWorks SIMULATION Professional)



Σχήμα 8: Απεικόνιση πεδίου μετατοπίσεων, (SolidWorks SIMULATION Professional)

Μέθοδοι υπολογισμού διάρκειας ζωής έναντι κόπωσης

Οι εταιρείες επιθυμούν και έχουν ανάγκη τη μείωση του βάρους των κατασκευών που σχεδιάζουν και παράγουν, με ταυτόχρονη αποφυγή αστοχίας λόγω κόπωσης, ακόμα και μερικής αστοχίας λόγω κόπωσης, διότι σε μία τέτοια περίπτωση ενδέχεται να απαιτηθεί μία εξαιρετικά δαπανηρή επισκευή. Αυτή η επιτακτική επιθυμία και ανάγκη είχε ως αποτέλεσμα την ενσωμάτωση του υπολογισμού αντοχής έναντι κόπωσης στα αρχικά στάδια μίας διαδικασίας σχεδίασης.

Η πειραματική δοκιμή για κάθε μία νέα σχεδίαση είναι πρακτικώς ασύμφορη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εκτίμηση της διάρκειας ζωής μίας κατασκευής απαιτεί την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των επί μέρους δομικών στοιχείων, για δεδομένα φορτία λειτουργίας και υλικά κατασκευής. Τα λογισμικά CAE (Computer Aided Engineering) χρησιμοποιούν τρεις κυρίως τρόπους υπολογισμού της διάρκειας ζωής έναντι κόπωσης. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

Stress Life (SN)

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην αξιοποίηση μόνον των τάσεων και χρησιμοποιεί την προσέγγιση κατά Wöhler. Αν και δεν είναι κατάλληλη για δομικά μέλη, τα οποία, τοπικά, έχουν εισέλθει στην περιοχή της πλαστικότητας, και παρέχει μικρή ακρίβεια σε υπολογισμούς ολιγοκυκλικής κόπωσης, ωστόσο είναι η πλέον εύκολη στην εφαρμογή της, συνοδεύεται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος πειραματικών δεδομένων και παρέχει καλά αποτελέσματα στην περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης.

Strain Life (EN)

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την κατά τόπους πλαστική παραμόρφωση και είναι καλή για υπολογισμούς ολιγοκυκλικής κόπωσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που παρέχει εμπεριέχουν κάποια αβεβαιότητα.

Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρεί ότι ήδη υπάρχει μία ρωγμή και προβλέπει τη διάδοσή της βάσει της κατανομής της συγκέντρωσης τάσης, η οποία εμφανίζεται στη διαρκώς αναπτυσσόμενη ρηγματωμένη περιοχή. Αυτή η μέθοδος είναι πρακτικής αξίας όταν εφαρμόζεται σε μεγάλες κατασκευές και σε συνδυασμό με λογισμικά περιοδικού ελέγχου συντήρησης.

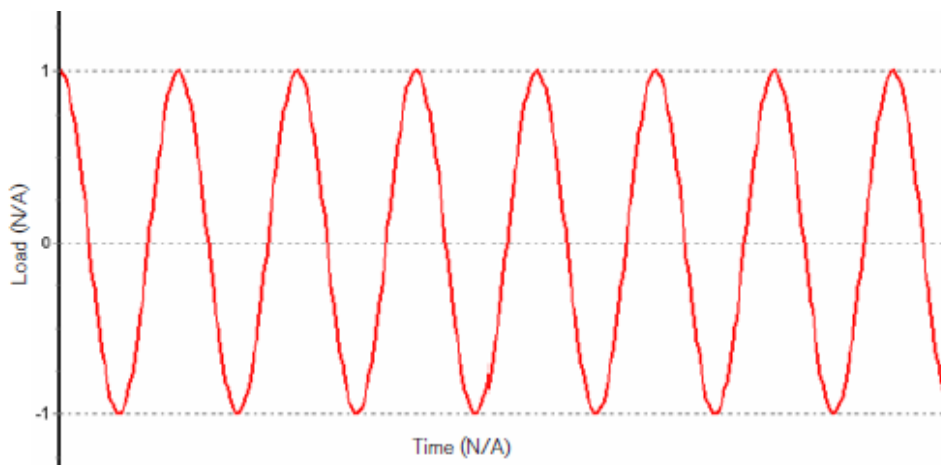
Από τις ανωτέρω τρεις προσεγγίσεις, η πλέον διαδεδομένη είναι η (SN) λόγω της ευκολίας εφαρμογής της και του πολύ μεγάλου πλήθους πειραματικών δεδομένων, από τα οποία συνοδεύεται.

Μέθοδος υπολογισμού διάρκειας ζωής έναντι κόπωσης με τη μέθοδο (SN)

Στον υπολογισμό της διάρκειας ζωής έναντι κόπωσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν φορτία σταθερού και μεταβαλλόμενου πλάτους. Στις επόμενες παραγράφους καταγράφεται μία σύντομη περιγραφή των διαφορών στα προκύπτοντα αποτελέσματα.

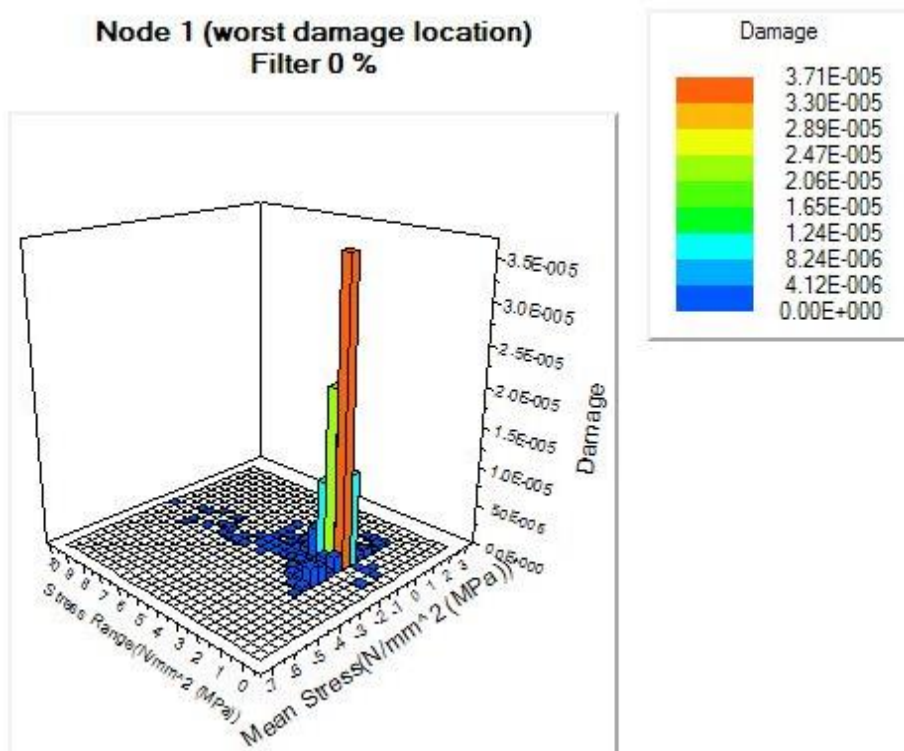
Φορτία σταθερού πλάτους

Αυτή η μέθοδος αφορά σε ένα δομικό μέλος υπό την επιβολή κυκλικού φορτίου σταθερής μέσης τιμής και σταθερού πλάτους (βλ. Σχήμα 3). Χρησιμοποιώντας διαγράμματα S-N, οι Μηχανικοί είναι σε θέση να υπολογίσουν το πλήθος των κυκλικών φορτίσεων μέχρι να εμφανισθεί αστοχία λόγω κόπωσης.

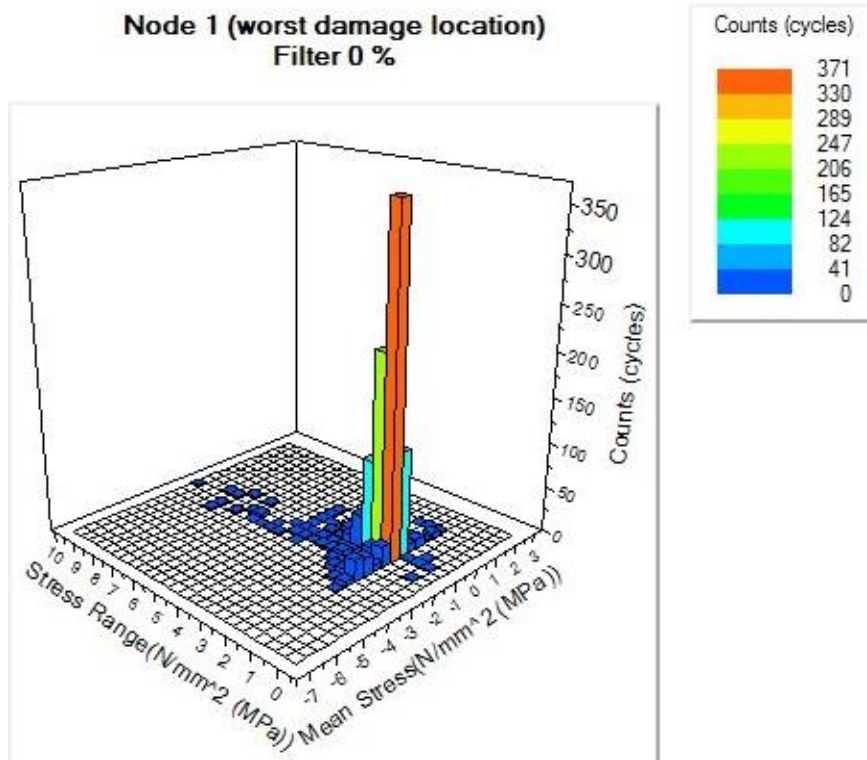


Σχήμα 3: Φορτίο σταθερού πλάτους

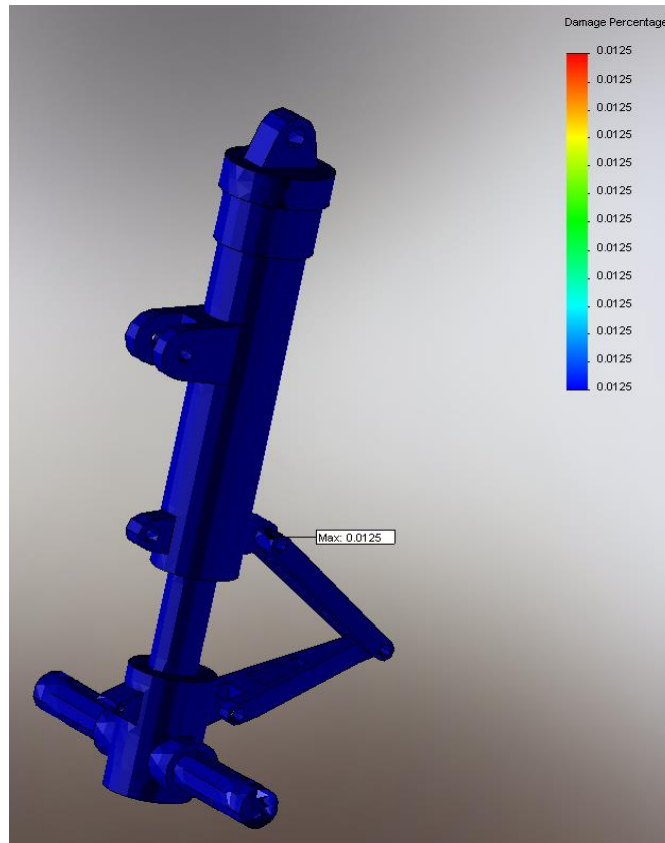
Ωστόσο, στην περίπτωση κατά την οποία το εξεταζόμενο δομικό μέλος υπόκειται σε περισσότερα από ένα φορτία, τότε χρησιμοποιείται ο κανόνας Miner προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση από κάθε ένα φορτίο ξεχωριστά και στη συνέχεια, μέσω κατάλληλου συνδυασμού των επί μέρους επιπτώσεων, να εκτιμηθεί η συνολική επίπτωση των φορτίων. Το τελικό αποτέλεσμα (Damage Factor: D) εκφράζεται ως ένα κλάσμα της διάρκειας ζωής του μέλους, π.χ. $D=1.0$ σημαίνει ότι το μέλος αστοχεί, ενώ $D=0.35$ σημαίνει ότι έχει καταναλωθεί το 35% της διάρκειας ζωής του μέλους. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρεί ότι η επίπτωση, η οποία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης, είναι ανεξάρτητη της χρονικής στιγμής εμφάνισής της, ενώ ο ρυθμός συσσώρευσης των επιπτώσεων είναι ανεξάρτητος των τάσεων.



Σχήμα 9: Απεικόνιση συντελεστού D (Rainflow damage matrix – Damage)



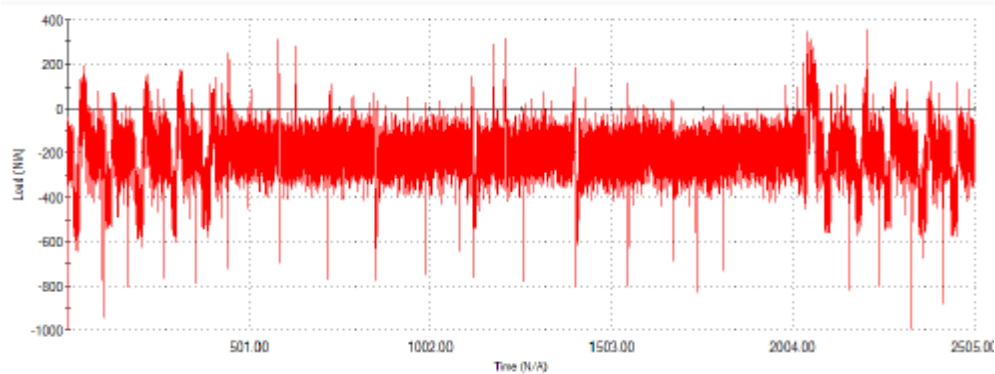
Σχήμα 10: Απεικόνιση κύκλου φορτίσεων (Rainflow damage matrix – Counts)



Σχήμα 12: Κατανομή συντελεστού D, (SolidWorks SIMULATION Professional)

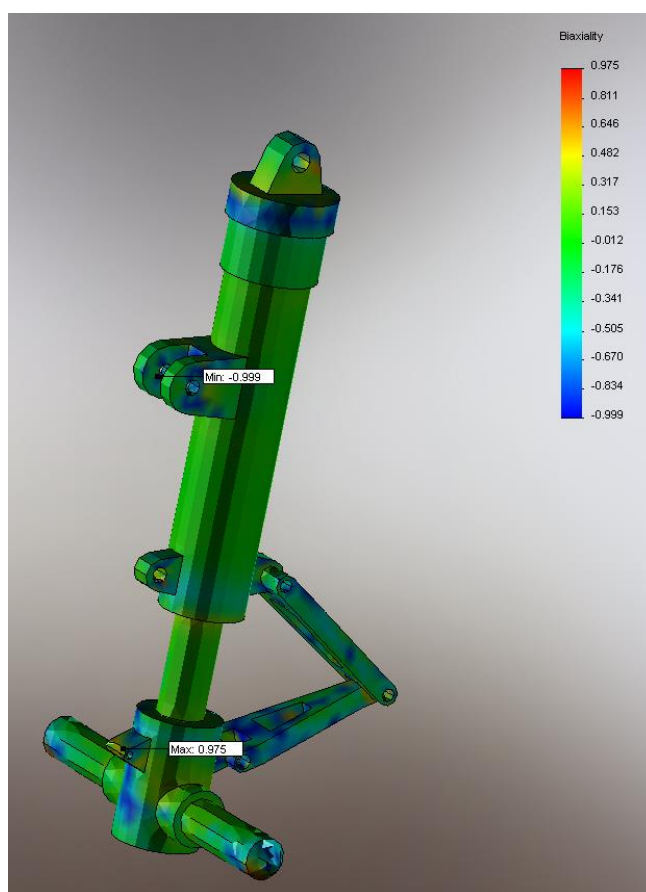
Φορτία μεταβλητού πλάτους

Στην πράξη, τα περισσότερα δομικά μέλη μίας κατασκευής υπόκεινται σε φορτία μεταβλητής μέσης τιμής και μεταβαλλόμενου πλάτους. Συνεπώς, σε μία γενικότερη και πιο ρεαλιστική προσέγγιση, θα πρέπει να θεωρηθούν μεταβαλλόμενα φορτία (βλ. Σχήμα 4). Τέτοια φορτία προκαλούν την εμφάνιση τάσεων, οι οποίες είναι μεν επαναλαμβανόμενες στο χρόνο αλλά χαρακτηρίζονται από μεταβαλλόμενο πλάτος, επιτρέποντας το διαχωρισμό τους σε ομάδες φορτίων (load blocks). Για την επίλυση τέτοιου τύπου προβλημάτων, έχει αναπτυχθεί η τεχνική 'rainflow counting'. Περισσότερες πληροφορίες για αυτήν την τεχνική αναφέρονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 4: Φορτίο μεταβαλλόμενου πλάτους

Η ανάλυση κατασκευών με τη (ΜΠΣ) παρέχει ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μελέτη της κόπωσης με τη μέθοδο (SN). Τα στοιχεία που απαιτούνται για μία τέτοια προσέγγιση είναι η δυνατότητα ανάλυσης της κατασκευής με στατικά φορτία και η δυνατότητα κατάλληλης υπέρθεσης των αποτελεσμάτων από διαφορετικές φορτίσεις. Και τα δύο αυτά στοιχεία αποτελούν εύκολο έργο για την ανάλυση κατασκευών με τη (ΜΠΣ). Σύμφωνα με μία τυπική προσέγγιση με τη (ΜΠΣ) για την εκτίμηση της αντοχής έναντι κόπωσης, υπολογίζεται το χειρότερο εκ των πιθανών σεναρίων φόρτισης, ενώ τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να απεικονισθούν με διάφορους τρόπους, όπως υπό τη μορφή γραφημάτων διάρκειας ζωής και συντελεστού ασφαλείας. Μία ακόμα χρήσιμη απεικόνιση είναι ένα 3-Δ ιστόγραμμα (Rainflow Matrix Chart), στο οποίο ο άξονας X απεικονίζει το εύρος της εναλλασσόμενης τάσης, ο άξονας Y απεικονίζει τη μέση τάση και ο άξονας Z καταγράφει το πλήθος των κύκλων φόρτισης μέχρι να εμφανισθεί αστοχία λόγω κόπωσης.

**Σχήμα 11:** Κατανομή δείκτη biaxiality (λόγος μικρότερης προς μεγαλύτερης εναλλασσόμενης κύριας τάσης), (SolidWorks SIMULATION Professional)

Παράδειγμα Εφαρμογής με το SolidWorks 2010 SIMULATION Professional

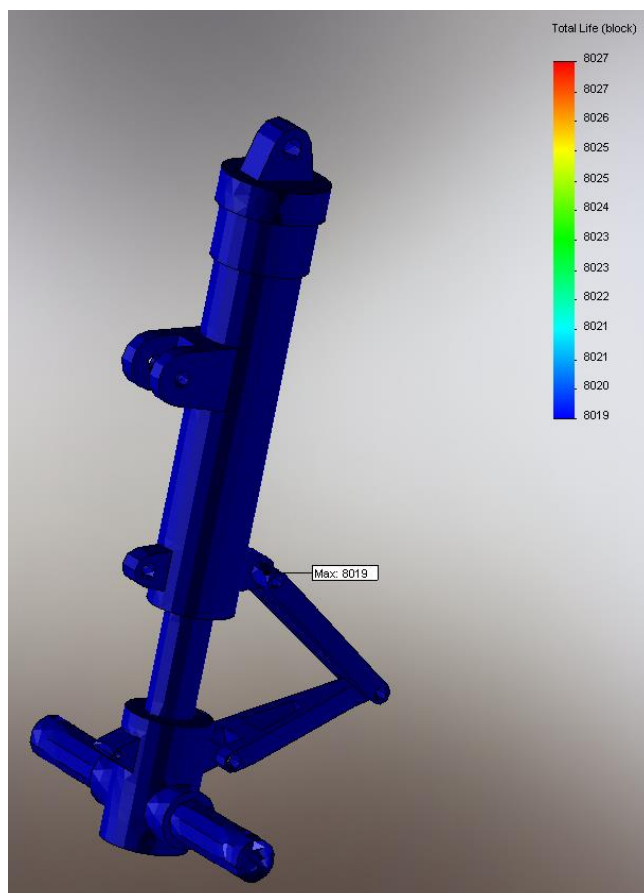
Το SolidWorks και το SolidWorks SIMULATION, τα πλέον δημοφιλή αναγνωρισμένα μέλη της οικογενείας εμπορικών λογισμικών CAD/CAE, αποτελούν μία άκρως ελκυστική πρόταση για την σχεδίαση και ανάλυση μίας κατασκευής. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας, το οποίο συνδυάζει υψηλές σχεδιαστικές δυνατότητες (CAD) με τις δυνατότητες της Υπολογιστικής Μηχανικής (Μέθοδος των

Πεπερασμένων Στοιχείων - CAE). Ως περιβάλλον CAD, παρέχει όλα τα σχεδιαστικά εργαλεία και την εξαιρετική ευκολία χρήσης του κορυφαίου σχεδιαστικού λογισμικού SolidWorks. Ως περιβάλλον CAE, παρέχει όλες τις δυνατότητες του εξειδικευμένου λογισμικού CosmosWorks, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλότερη υπολογιστική ταχύτητα, αποτέλεσμα της, ενσωματωμένης σε αυτό, τεχνολογίας αιχμής.

Ειδικότερα, στον έλεγχο μίας κατασκευής έναντι κόπωσης, το λογισμικό SolidWorks2010 SIMULATION Professional παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα μίας πλήρους μελέτης, με τη γνωστή φιλικότητα που χαρακτηρίζει όλα τα προϊόντα SolidWorks. Κυριολεκτικά, η ολοκλήρωση μίας μελέτης είναι μερικά κλικ μακριά, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5 -12, στα οποία απεικονίζεται η μελέτη έναντι κόπωσης ενός συστήματος προσγείωσης αεροσκάφους.

Συμπέρασμα

Στο παρόν κείμενο παρουσιάστηκαν, εν συντομία, οι τεχνικές μέσω των οποίων είναι δυνατή η σχεδίαση κατασκευών για την ασφαλή παραλαβή κυκλικών φορτίσεων. Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες της Υπολογιστικής Μηχανικής, οι Μηχανικοί είναι πλέον σε θέση να διαστασιολογούν τις κατασκευές με τέτοιο τρόπο ώστε και να παρέχεται ασφάλεια έναντι κόπωσης και να πραγματοποιείται σημαντική εξοικονόμηση υλικού. Στην πράξη, χρησιμοποιώντας την υψηλή τεχνολογία και τα εύχρηστα εργαλεία του SolidWorks2010 SIMULATION Professional, η σχεδίαση ασφαλών κατασκευών έναντι κόπωσης συμβάλλει στη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης και δίδει τη δυνατότητα στους Μηχανικούς, αντί να ασχολούνται με την επιδιόρθωση αστοχιών, να επενδύουν στη σχεδίαση και ανάπτυξη νέων προϊόντων.



Σχήμα 13: Κατανομή εύρους διάρκειας ζωής (SolidWorks SIMULATION Professional)

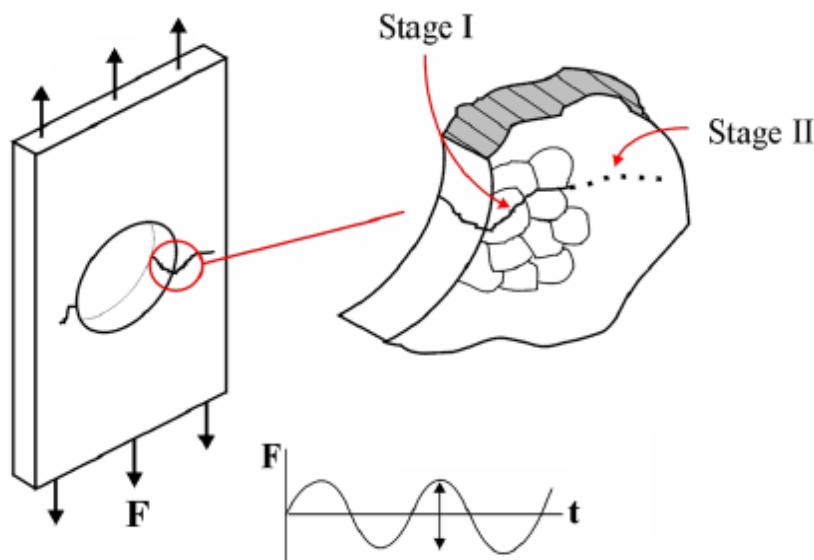
Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες της Υπολογιστικής Μηχανικής και υποβοηθούμενοι από το SolidWorks2010 SIMULATION Professional, οι Μηχανικοί σχεδιάζουν τις κατασκευές παρέχοντας ασφάλεια έναντι κόπωσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α: Διάδοση ρωγμών

Δύο είναι οι φυσικοί μηχανισμοί, οι οποίοι καθορίζουν τη διαδικασία διάδοσης μίας ρωγμής. Υπό την επιβολή ενός κυκλικού φορτίου, παρατηρείται σχετική μετατόπιση μεταξύ επιπέδων ολίσθησης στη μικροδομή του υλικού, προκαλώντας μικροεξάρσεις στην επιφάνεια του δομικού μέλους. Αυτές οι μικροεξάρσεις είναι εξαιρετικά μικρές για να καταστούν οπτικά αντιληπτές (τάξεως 1 μm -10 μm), ωστόσο είναι δυνατόν να θεωρηθούν ως ρωγμές σε εμβρυϊκή μορφή (Στάδιο I – βλ. Σχήμα Α.1).

Όταν οι ρωγμές του Σταδίου I φθάσουν στα όρια του κόκκου του υλικού, ο προαναφερθείς μηχανισμός μικροκίνησης μεταφέρεται και στον γειτονικό κόκκο. Οι ρωγμές του Σταδίου I διαδίδονται κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διάτμησης, δηλαδή υπό γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση του επιβαλλομένου φορτίου.

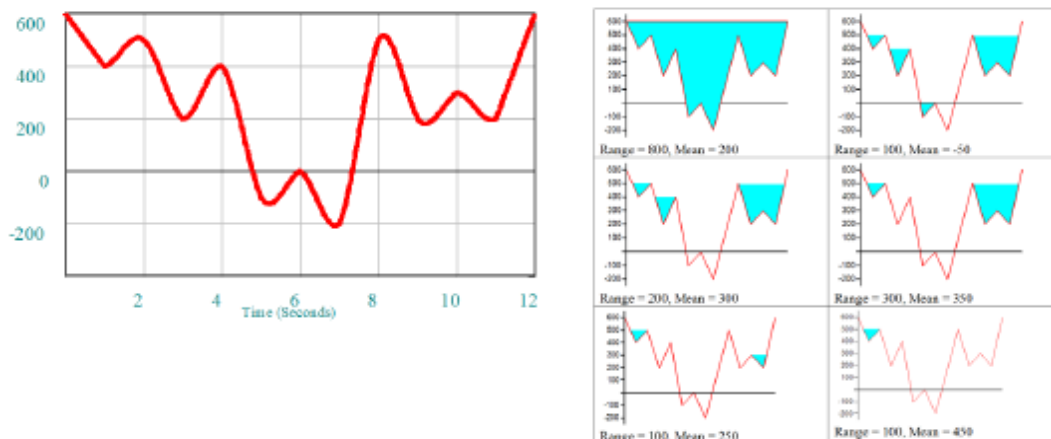


Σχήμα Α.1: Μηχανισμός ανάπτυξης ρωγμών

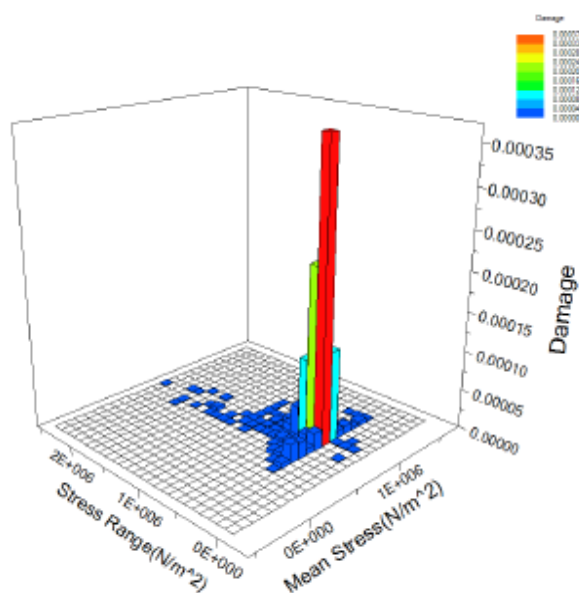
Όταν ο εν λόγω μηχανισμός μικροκίνησης διαδοθεί σε μήκος τριών κόκκων περίπου, τότε αλλάζει η συμπεριφορά της ρωγμής διότι τότε η ρωγμή έχει αναπτυχθεί αρκετά ώστε να σχηματίσει σημείο συγκέντρωσης τάσης (Στάδιο II - βλ. Σχήμα Α.1). Οι ρωγμές του Σταδίου II δημιουργούν μία εφελκυστική πλαστική ζώνη στο άκρο, πέρα από το οποίο η ρωγμή διαδίδεται κάθετα ως προς τη διεύθυνση του επιβαλλομένου φορτίου.

Παράρτημα Β: Rainflow counting

Η επιβαλλόμενη κυκλική φόρτιση αποτυπώνεται σε διάγραμμα φορτίου – χρόνου (βλ. Σχήμα Β.1α), στο οποίο εμφανίζονται βυθίσεις (κοιλιάδες) και εξάρσεις (κορυφές).



Σχήμα Β.1: (α) Γραφική απεικόνιση της ιστορίας φόρτισης και (β) επεξεργασία της γραφικής απεικόνισης. Η εκτίμηση του πεδίου των τιμών τάσης, καθώς και της αντίστοιχης μέσης τιμής, λόγω της επιβολής της κυκλικής φόρτισης είναι δυνατή μέσω της επεξεργασίας του εν λόγω διαγράμματος. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται η τεχνική ‘rainflow counting’. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, η γραφική παράσταση αντιμετωπίζεται ως ο πυθμένας μίας μεγάλης ‘δεξαμενής’ απορροής υδάτων, η οποία αρχικά είναι γεμάτη με νερό (βλ. Σχήμα Β.2β). Ανάλογα με το τμήμα της ‘δεξαμενής’, το οποίο διαθέτει νερό, υπολογίζεται το πεδίο τιμών και η μέση τιμή τάσης. Σταδιακά, η ‘δεξαμενή’ αδειάζει, θεωρώντας ότι κάθε φορά ανοίγει μια οπή απορροής υδάτων στο εκάστοτε πλέον χαμηλό σημείο (κοιλιάδα) του πυθμένα που διαθέτει νερό. Με τον τρόπο αυτό, μετά από τη διάνοιξη μίας οπής, το νερό που απομένει στη ‘δεξαμενή’ μειώνεται. Βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, κατασκευάζεται το 3-Δ διάγραμμα του Σχήματος Β.2 και εφαρμόζεται ο κανόνας Miner. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατόν ο προσδιορισμός της διάρκειας ζωής ενός δομικού μέλους.



Σχήμα Β.2: Διάγραμμα 3Δ (Rainflow damage matrix) για την εφαρμογή του κανόνα Miner