

Π ΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	3
1. Εισαγωγή	9
2. Επιλογή των σημαντικότερων μηχανισμών καταστροφής	19
2.1 Θραύσεις κατά την λειτουργία	19
2.1.1 Βίαιες θραύσεις	19
2.1.1.1 Ορισμός	19
2.1.1.2 Η μακροσκοπική εικόνα της βίαιης θραύσης	19
2.1.1.3 Εικόνα θραύσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης	22
2.1.1.4 Βίαιες θραύσεις σε θέσεις εγκοπών	24
2.1.1.5 Παραδείγματα	28
2.1.2 Θραύσεις κόπωσης	30
2.1.2.1 Ορισμός, αιτία και ονομασία	30
2.1.2.2 Μακροσκοπικές μορφές θραύσης κόπωσης	35
2.1.2.3 Θραύση κόπωσης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης	37
2.1.2.4 Εγκοπές	38
2.1.2.5 Παραδείγματα	39
2.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στη θραύση	45
2.1.3.1 Σύντομη στατική καταπόνηση	45
2.1.3.2 Κρουστική καταπόνηση	47
2.1.3.3 Μεγάλης διάρκειας στατική καταπόνηση	59
2.1.3.4 Θερμοκρασιακή μεταβολή	51
2.1.3.5 Μεταβολές υλικού και γεωμετρίας του τεμαχίου	52
2.2 Επιφανειακές βλάβες και θραύσεις λόγω διάβρωσης	53
2.2.1 Ορισμός της διάβρωσης	53
2.2.1.1 Χημική διάβρωση	53
2.2.1.2 Ηλεκτροχημική διάβρωση	53
2.2.2 Ηλεκτροχημική διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση	58
2.2.2.1 Ομοιόμορφη ή στρωματική διάβρωση	58
2.2.2.2 Διάβρωση επαφής	59
2.2.2.3 Εκλεκτική διάβρωση	62
2.2.2.4 Τρηματική διάβρωση	64
2.2.2.5 Διάβρωση διακένων	67
2.2.3 Ηλεκτροχημική διάβρωση μαζί με μηχανική καταπόνηση	69
2.2.3.1 Ρηγματική διάβρωση υπό τάση	69
2.2.3.2 Ρηγματική διάβρωση υπό ταλάντωση	75
2.2.3.3 Μηχανική διάβρωση	80
2.2.3.4 Σπηλαιώση	82
2.2.3.5 Τριβική διάβρωση	85
2.2.4 Ψαθυροποίηση και ρηγμάτωση από υδρογόνο	89
2.3 Επιφανειακές φθορές και θραύσεις από τριβή	94
2.3.1 Ορισμός	94
2.3.1.1 Τριβή	94
2.3.1.2 Φθορά	95
2.3.1.3 Λίπανση	97
2.3.2 Μηχανισμοί φθοράς	97
2.3.2.1 Βασικοί μηχανισμοί φθοράς και η δρασή τους	97
2.3.2.2 Στρωματική φθορά	99
2.3.2.3 Φθορά πρόσφυσης	99
2.3.2.4 Αποκολλητική φθορά	101
2.3.2.5 Φθορά από κόπωση (κόπωση επιφάνειας)	104
2.3.2.7 Σύνοψη επικαλύψεων έναντι διάβρωσης και φθοράς	106

2.4	Επιδράσεις συνθηκών παρασκευής υλικού και επεξεργασίας στην καταστροφή του τεμαχίου	110
2.4.1	Παρασκευή του κράματος	110
2.4.1.1	Επίδραση της μεθόδου παρασκευής στις ιδιότητες των μετάλλων και κραμάτων	110
2.4.1.2	Βαθμός καθαρότητας	111
2.4.2	Χύτευση και πήξη	114
2.4.2.1	Το μέγεθος των κόκκων και η διάταξή τους	114
2.4.2.2	Σχηματισμός κενών	116
2.4.2.3	Διαφορισμοί	120
2.4.3	Διαμόρφωση	122
2.4.3.1	Θερμή διαμόρφωση	122
2.4.3.2	Ψυχρή διαμόρφωση	123
2.4.4	Συγκόλληση	125
2.5	Σφάλματα θερμικών κατεργασιών	130
2.5.1	Σφάλματα κατά την σκλήρυνση μετατροπής του χάλυβα	130
2.5.1.1	Μείωση της σκληρότητας	130
2.5.1.2	Εσωτερικές τάσεις	131
2.5.1.3	Ανομοιόμορφη σκληρότητα	133
2.5.2	Σφάλματα από άλλες μεθόδους θερμικής κατεργασίας	133
2.5.2.1	Σκλήρυνση οριακού στρώματος	133
2.5.2.2	Σκλήρυνση οριακού στρώματος με προσθήκη	136
2.5.2.3	Ανόπτηση και απαλειφή τάσεων	137
2.5.2.4	Εξομάλυνση	139
2.5.2.5	Πυρωμα	141

3. Εξετάσεις προσδιορισμού του μηχανισμού καταστροφής 143

3.1	Μεθοδολογία για την επιλογή των δοκιμών	143
3.2	Μηχανικές δοκιμές, καταστροφικές για το δοκίμιο	146
3.2.1	Στατικές δοκιμές	146
3.2.1.1	Δοκιμή εφελκυσμού	146
3.2.1.2	Δοκιμή ερπυσμού	150
3.2.1.3	Δοκιμή θλίψης	151
3.2.1.4	Δοκιμή κάμψης	152
3.2.1.5	Δοκιμή στρέψης	153
3.2.1.6	Δοκιμή διάτμησης	154
3.2.1.7	Δοκιμή σκληρότητας	155
3.2.2	Δυναμικές μέθοδοι δοκιμών	160
3.2.2.1	Δυναμική σκληρομέτρηση	160
3.2.2.2	Δοκιμή κρουστικής κάμψης	161
3.2.2.3	Δοκιμή κόπωσης	164
3.2.3	Θραυστομηχανικές μέθοδοι δοκιμής	166
3.2.4	Τεχνολογικές μέθοδοι δοκιμών	168
3.2.4.1	Δοκιμή ολκιμότητας βασικών κατασκευαστικών υλικών	168
3.2.4.2	Δοκιμή σκληρυνσιμότητας	171
3.2.4.3	Ελεγχος απλών προϊόντων	171
3.2.4.4	Ελεγχος συγκολλήσεων	172
3.2.4.5	Σύντομος προσεγγιστικός έλεγχος αναγνώρισης υλικών	172
3.3	Μεταλλογραφική εξέταση της κατάστασης του μετάλλου	174
3.3.1	Μακροσκοπικές εξετάσεις	174
3.3.2	Μικροσκοπικές εξετάσεις	175
3.3.3	Εξέταση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	179
3.4	Χημική ανάλυση για τη σύσταση υλικού ή περιοχών του	182
3.4.1	Υδροχημική ανάλυση	182
3.4.2	Φασματογραφία	183

3.4.2.1	Οπτική φασματογραφία	183
3.4.2.2	Φασματογραφία ακτίνων X (Roentgen)	184
3.4.2.3	Μικροανάλυση ακτίνων X	184
3.5	Μη καταστροφικές δοκιμές βλαβέντων τεμαχίων	185
3.5.1	Δοκιμή με ακτίνες X και γ	186
3.5.2	Ελεγχος με υπερήχους	188
3.5.3	Μαγνητικός έλεγχος	189
3.5.4	Μαγνητοεπαγγελματικός έλεγχος	191
3.5.5	Μέθοδος διείσδυσης	191
3.5.6	Μέθοδος εκπομπής πήχου	192
3.6	Ελεγχος σε διάβρωση	193
3.6.1	Ελεγχοι λειτουργικής και ατμοσφαιρικής διάβρωσης	193
3.6.2	Εργαστηριακές δοκιμές	193
3.7	Νεότερες εξελίξεις	194

4. Ελεγχοι αντοχής 197

4.1	Τα φορτία των κατασκευών	197
4.1.1	Αίτια πρόκλησης φορτίων	198
4.1.2	Εργο καταστροφής	199
4.1.3	Διάκριση των φορτίων	200
4.1.3.1	Διαχωρισμός των φορτίων σύμφωνα με τους κανονισμούς	201
4.1.4	Προσδιορισμός των αναμενόμενων φορτίων	202
4.1.4.1	Εφαρμογή των κανονισμών	202
4.1.4.2	Μετρήσεις και μοντελοποίηση	204
4.1.5	Φορτία δοκιμών αντοχής λειτουργίας	206
4.2	Υπολογισμοί	209
4.2.1	Υπολογιστική φιλοσοφία	209
4.2.2	Επιλογή επίπεδου ακρίβειας υπολογισμού	209
4.2.3	Επικίνδυνη διατομή	210
4.2.4	Τάσεις και παραμορφώσεις	211
4.2.4.1	Συμβολισμοί καταπονήσεων και αντοχών	212
4.2.4.2	Καταπόνηση του εξαρτήματος (τεμαχίου)	213
4.2.5	Διαδικασία υπολογισμών	214
4.2.5.1	Προσεγγιστική διαστασιολόγηση κατασκευής	215
4.2.5.2	Βέλτιστη διαστασιολόγηση κατασκευής	215
4.2.5.3	Υπολογισμοί διαρκούς αντοχής	216
4.2.5.3.1	Αντοχή διαμορφωμένου συγκριτικού δοκιμίου	216
4.2.5.3.2	Συντελεστές αναγωγής	218
4.2.5.3.2.1	Συντελεστής επιφανειακής τραχύτητας b_s	218
4.2.5.3.2.2	Συντελεστής ευασθησίας εγκοπών β_K	219
4.2.5.3.2.3	Συντελεστής μεγέθους b_o	219
4.2.5.3.2.4	Συντελεστής αναγωγής καταπόνησης u_o	219
4.2.5.3.2.5	Συντελεστής ενίσχυσης εγκοπών u_d	220
4.2.5.3.2.6	Σχέση μεταξύ συντελεστών αναγωγής	220
4.2.5.4	Υπολογισμοί χρονικής αντοχής	221
4.2.5.4.1	Νόμος αθροιστικής κόπωσης Palmgren-Miner	221
4.2.5.4.2	Ρωγμές	222
4.2.5.4.3	Εξελιξη ρωγμής κόπωσης	224
4.2.5.5	Προειδοποίηση καταστροφής κατά τη λειτουργία	227
4.2.5.5.1	Μέθοδοι ανίχνευσης ρωγμών	227
4.2.5.6	Η στοχαστική φύση της κόπωσης	229
4.3	Παραδείγματα υπολογιστικής ανάλυσης καταστροφών	231
4.3.1	Θραύση κοίλου άξονα καδοτροχού	231
4.3.2	Θραύση Βάκτρου εμβολοφόρου συμπιεστή	234
4.3.3	Θραύση άξονα τριβέσιου	235

5. Επιλεγμένα παραδείγματα καταστροφών	237
5.1 Εισαγωγή	237
5.1.1 Αντικείμενο του ελέγχου	237
5.1.2 Διεξαγόμενες δοκιμές	238
5.1.3 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	239
5.1.4 Περίληψη	240
5.2 Θραύση κατά τη λειτουργία	241
5.2.1 Βίαιη θραύση	241
5.2.2 Θραύση κόπωσης	246
5.2.3 Θραύση ρηγματικής διάβρωσης υπό τάση	249
5.2.4 Θραύση από διάβρωση λόγω προσρόφησης υδρογόνου	255
5.3 Επιφανειακές φθορές κατά τη λειτουργία	259
5.3.1 Μηχανική φθορά	259
5.3.2 Ηλεκτροχημική διάβρωση	261
5.3.3 Τοπική υπερθέρμανση	262
5.4 Καταστροφές λόγω σφαλμάτων κατασκευής και επεξεργασίας	266
5.4.1 Σφάλματα χυτηρίου	266
5.4.2 Σφάλματα θερμικής κατεργασίας	269
5.4.3 Σφάλματα συγκολλήσεων	270
6. Ερωτηματολόγιο	275
Ευρετήριο όρων	281

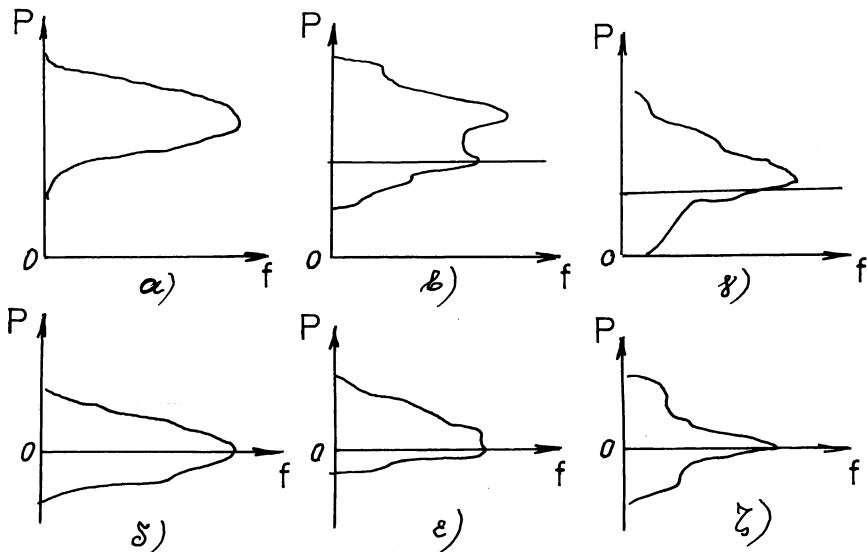
4. Ε Λ Ε Γ Χ Ο Ι Α Ν Τ Ο Χ Η Σ

4.1 Τα φορτία των κατασκευών

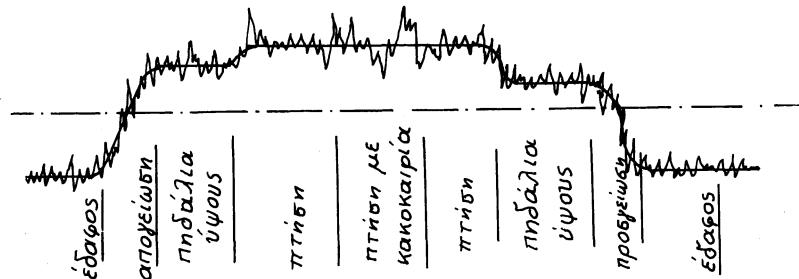
Για την αποφυγή της καταστροφής είναι απαραίτητη η γνώση ή η εκτίμηση των φορτίων, που θα αντιμετωπίσει κάθε τεμάχιο, από το οποίο αποτελείται η κατασκευή, κατά τις φάσεις της επεξεργασίας, της μεταφοράς, της συναρμολόγησης με τα άλλα τεμάχια και τέλος κατά την λειτουργία του. Συνεπώς η πλέον απαραίτητη γνώση για την διαμόρφωση και τον υπολογισμό μιάς κατασκευής είναι ο τρόπος με τον οποίο αυτή φορτίζεται. Με αυτό εννοείται η φύση, η κατανομή και η χρονική εξάρτηση των δυνάμεων ή ροπών που καταπονούν την κατασκευή.

Στο σχ. 4.1/1 φαίνονται, για μερικές τυπικές μηχανές και εγκαταστάσεις, η συχνότητα f εμφάνισης διαφόρων τιμών του φορτίου λειτουργίας P . Οι καμπύλες των σχημάτων έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση των φορτίσεων, που έγινε σε σημαντικό αριθμό όμοιων μηχανών ή εγκαταστάσεων [1]. Η χρονική σειρά των φορτίσεων δεν υποδηλώνεται προφανώς στα σχήματα αυτά. Στο σχήμα 4.1/2 φαίνεται η χρονική αλληλουχία των φορτίσεων της πτέρυγας ενός αεροπλάνου, κατά την διάρκεια μιάς πτήσης. Στο σχήμα φαίνεται ότι κατά την φάση προσγείωσης και απογείωσης μεταβάλλεται το μέσο φορτίο καταπόνησης της πτέρυγας σε σχέση με την ομαλή πτήση.

Συνοπτικά διακρίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη της συχνότητας εμφάνισης των φορτίων διαφόρων μεγεθών, σχ. 4.1/1 και η καμπύλη χρονικής αλληλουχίας των φορτίσεων, σχ. 4.1/2. Η τελευταία μπορεί να αποτελείται από την επαλληλία ενός φορτίου αργής μεταβολής με στοχαστικές φορτίσεις ποικίλων μεγεθών. Από την καμπύλη αυτή μετά από στατιστική επεξεργασία μπορεί να προκύψει η πρώτη.



Σχ. 4.1/1 Διαγράμματα φορτίου-συχνότητας εμφάνισης φορτίων τυπικών μηχανών και εγκαταστάσεων. α Σφαιρόμυλος. β Λεωφορείο. γ Βαρούλκο. δ Τριβείο. ε Τραπέζι κοπής. στ. Ελαστρο.



Σχ. 4.1/2 Φορτίση πτέρυγας κατά την πτήση αεροπλάνου.

Βιβλιογραφία:

1. Fischer, K.: Lastannahmen im Maschinenbau. Z. Materialprüfung 31 (1989) 6 S. 181-186.
2. Klein, B.: Bauteilanalyse in der Schädigungsphase. Z. Materialprüfung 28 (1986) 11 S. 361-367.

4.1.1 Αίτια πρόκλησης φορτίων

Οσον αφορά τα αίτια που προκαλούν φορτία, μπορεί να γίνει η παρακάτω λογική διάκριση:

- Κανονική λειτουργία
- Εκτακτα συμβάντα λειτουργίας
- Περιβάλλον
- Μεταφορά και εγκατάσταση
- Τυχαία γεγονότα

Στα κανονικά φορτία λειτουργίας υπάγονται όλα εκείνα τα φορτία που αναπτύσσονται για να παραχθεί το ωφέλιμο έργο, ή για να παραληφθεί το αναμενόμενο φορτίο. Από το είδος της μηχανής και τις ιδιομορφίες χρήσης της (π.χ. εκσκαπτική μηχανή σε μαλακά ή σκληρά εδάφη), προκύπτει μία κατανομή φορτίσεων με τα χαρακτηριστικά της γνωρίσματα. Συνεπώς τα φορτία λειτουργίας μεταβάλλονται μέσα σε δεδομένα, για την κατασκευή και την χρήση της, όρια και εμφανίζονται με αλληλουχία, που εξαρτάται από το είδος της μηχανής και τους χειρισμούς της. Από την στατιστική ανάλυση των φορτίων λειτουργίας προκύπτει η στατιστική κατανομή, η οποία χαρακτηρίζει εν μέρει και το είδος της μηχανής.

Εκτακτα φορτία λειτουργίας είναι εκείνα που προβλέπονται μεν από τις προδιαγραφές λειτουργίας, αλλά εμφανίζονται δε σε αραιά διαστήματα.

Φορτία περιβάλλοντος είναι εκείνα των οποίων η προέλευση εξαρτάται από το γειτονικό, ή συνήθως το φυσικό περιβάλλον. Τέτοια φορτία είναι εκείνα που προέρχονται από άνεμο, χιόνι, σεισμό και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τα μεγέθη των φορτίων αυτών, τα οποία υπεισέρχονται στους υπολογισμούς, συνήθως προβλέπονται από τους αντίστοιχους προς το είδος της κατασκευής κανονισμούς. Σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο οι ταχύτητες των ανέμων είναι μεγαλύτερες, σε βορειότερες περιοχές το αναμενόμενο ύψος χιονιού είναι μεγαλύτερο και σε σεισμογενείς περιοχές οι σεισμικές δονήσεις ισχυρότερες. Επομένως οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές εξαρτώνται και από τον τόπο που ευρίσκεται η κατασκευή.

Τα φορτία μεταφοράς και εγκατάστασης είναι φορτία, τα οποία εμφανίζονται μόνο κατά την φάση της μεταφοράς και κατά την διάρκεια της εγκατάστασης. Το είδος και το μέγεθος τους εξαρτάται από τον τρόπο που σχεδιάζεται για την μεταφορά και την εγκατάσταση. Είναι πιθανό για ορισμένα στοιχεία της κατασκευής οι καταπονήσεις, από μεταφορά και εγκατάσταση, να είναι πολύ μεγαλύτερες, αλλά και άλλοι μορφής, από εκείνες της λειτουργίας. Ετσι σε δικτύωμα είναι πιθανό οι υπό συνθήκες λειτουργίας εφελκυόμενες ράβδοι, κατά την φάση της συναρμολόγησης του μηχανήματος, να θλίψονται, με συνέπειες απρόβλεπτες. Η ορθή αντιμετώπιση απαιτεί εμφανή σημεία ανάρτησης και αντίστοιχο υπολογισμό αντοχής.

Τα φορτία από τυχαία γεγονότα ή ατυχήματα λαμβάνονται υπόψη εάν οι συνέπειες από αυτά είναι δυσανόλογες προς τα ατυχήματα αυτά τα ίδια. Οπως π.χ. η πτώση αεροπλάνου επάνω σε ατομικό αντιδραστήρα είναι ενα τυχαίο, σπάνιο γεγονός, του οποίου οι συνέπειες είναι δυσανάλογα μεγαλύτερες από την ίδια την πτώση του αεροπλάνου. Επομένως, ανάλογα προς τους κινδύνους που μπορούν να προκύψουν από τα τυχαία γεγονότα, λάμβανονται και τα κατάλληλα μέτρα. Πολύ μικρότερης κλίμακας, ως προς το προηγούμενο παράδειγμα, είναι η περιπτώση χρήσης προσκρουστήρων στά τέρματα διαδρομών οχημάτων, που κινούνται επάνω σε τροχιές. Επίσης είναι πιθανό, από εσφαλμένο χειρισμό, να χτυπήσῃ κεραία οικοδομικού γερανού σε παρακείμενη οικοδομή. Είναι φανερό ότι το φορτίο που προέρχεται από την κρούση αυτή μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια σαν εξωτερικό τυχαίο φορτίο και να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό και την διαμόρφωση της κεραίας.

4.1.2 Εργο καταστροφής

Εκτός από την προηγούμενη διάκριση προέλευσης των φορτίων, μπορεί να ληφθεί σαν κριτήριο η πηγή παροχής της ενέργειας που μετατρέπεται σε καταστροφικό έργο. Ετσι με κριτήριο την πηγή παροχής της ενέργειας υπάρχουν οι παρακάτω διακρίσεις:

I. Το καταστροφικό έργο προκύπτει με δαπάνη εξωτερικής ενέργειας, όπως σε περιπτώσεις φορτίων που προέρχονται από το φυσικό ή τεχνικό περιβάλλον, όπως από αέρα, χιόνι, σεισμό, πτώση ξένου αντικειμένου, κατά τους ακόλουθους δύο τρόπους:

1) Η ξένη ενέργεια λειτουργεί σαν διέγερση, ώστε να προκληθεί παραγγή καταστροφικού έργου, από αλλαγή των συνθηκών εσωτερικής ισορροπίας, δηλαδή μετατροπή δυναμικής ενέργειας σε έργο καταστροφής (π.χ. πτώση μάζας από υψηλότερο επίπεδο).

2) Η ξένη ενέργεια παράγει αμέσως το έργο καταστροφής, χωρίς μετατροπή δυναμικής ενέργειας ή συμμετοχή της πηγής παροχής ενέργειας στο σύστημα.

II. Το καταστροφικό έργο προκύπτει, όταν με μικρή εξωτερική ενέργεια, π.χ. κακός χειρισμός, διαταραχθεί η εσωτερική ισορροπία του συστήματος. Τότε η ενέργεια, η προσφερόμενη στο σύστημα για την λειτουργία του, μετατρέπεται σε καταστροφικό έργο.

Κατά την ανάλυση της καταστροφής, από το μέγεθος του καταστροφικού έργου, μπορεί να απορριφθεί ή να υποστηριχθεί η