



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2016-17
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS ENGINEERING)

(ΠΔ 96 / 2015 / ΦΕΚ 163Α' / 20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

ΟΠΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

Αλέξανδρο Τρίκα

A.M.: 2015018017

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2018

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Αλέξανδρου Τρίκα εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής (Επιβλέπων):

Κωνσταντίνος Σταμούλης

Καθηγητής (Συνεπιβλέπων):

Διονύσιος Μουζάκης

Καθηγητής:

Γεώργιος Κλάδης

© Copyright υπό ...Αλέξανδρο Τρίκα.....



Έτος 2018

Αφιερώσεις

στους δικούς μου...

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην ενότητα αυτή θα ήθελα πρωτίστως να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Κωνσταντίνο Σταμούλη, καθηγητή του μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων – Systems Engineering» της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και του Πολυτεχνείου Κρήτης, ως επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Με την καταλυτική συμβολή του, την υποστήριξη και τις ουσιώδεις παρατηρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με το συγκεκριμένο θέμα, με καθοδήγησε σε αυτό το αποτέλεσμα.

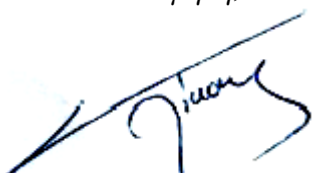
Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής κ. Διονύσιο Μουζάκη και κ. Γεώργιο Κλάδη, καθώς και τον κ. Κωνσταντίνο Ζηκίδη, καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων – Systems Engineering», που με τα εύστοχα σχόλιά τους και παρατηρήσεις συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της όλης αυτής προσπάθειας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος, διότι μέσω των διαφόρων αντικείμενων που edίδαξαν, ο καθένας στον τομέα του, συνέβαλαν στο να έχω μια πιο ολοκληρωμένη αντίληψη περί των διαφόρων τύπου συστημάτων.

Θα ήταν παράληψή μου να μην ευχαριστήσω την Υπηρεσία μου, την 180 ΜΚ/Β «HAWK» για την επαγγελματική εμπειρία που μου έχει παράσχει μέσω της υπηρετήσης ενός σύγχρονου οπλικού συστήματος, καθώς και για την έγκριση όλων των αιτημάτων μου που αφορούσαν τη χορήγηση αδείας (κανονική, φοιτητική). Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον οπλίτη πυροβολικού Αλέξανδρο Μακρή, ιστορικό, για την καταλυτική συμβολή του στην αναζήτηση βιβλιογραφίας.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο και μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στην οικογένεια και τους φίλους μου για την απεριόριστη στήριξη, κατανόηση και βοήθειά τους, ώστε να περατωθεί με επιτυχία η φοίτησή μου στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

*Σας ευχαριστώ πολύ όλους
Με εκτίμηση,*



Αλέξανδρος Τρίκας

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	3
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή	
§1.1 Ανάπτυξη της μεταπτυχιακής διατριβής.....	5
§1.2 Ιστορικά παραδείγματα αστοχίας οπλικών συστημάτων.....	6
§1.3 Ιστορική αναδρομή σε κριτήρια αστοχίας υλικών.....	7
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Ανάπτυξη οπλικού συστήματος	
§2.1 Η έννοια του συστήματος.....	11
§2.2 Διαδικασία ανάπτυξης ενός οπλικού συστήματος.....	15
§2.3 Σχεδίαση της διάρκειας ζωής των οπλικών συστημάτων ως «life-critical systems».....	20
§2.4 Ανοχή σε ζημιά (damage tolerance).....	22
§2.5 Κατηγορίες και ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε οπικά συστήματα.....	24
§2.6 Επεξεργασία - κατεργασία των υλικών	35
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Βασικές έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων.....	
§3.1 Αντοχή των υλικών.....	38
3.1.1 Παραμόρφωση λόγω εφαρμογής φορτίων.....	38
3.1.2 Θραύση - ολκιμότητα - δυσθραυστότητα - σκληρότητα.....	41
3.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου στην αντοχή των υλικών - ερπυσμός.....	44
3.1.4 Κόπωση - συγκέντρωση τάσεων.....	45
§3.2 Κριτήρια αστοχίας υλικών.....	47
§3.3 Τρόποι διάδοσης της ρωγμής.....	50
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Ανάλυση αστοχίας συστημάτων	
§4.1 Η έννοια της αστοχίας	53

§4.2	Δομικά στοιχεία οπλικού συστήματος που μπορεί να αστοχήσουν.....	57
4.2.1	Αστοχία υλικού μέρους (hardware).....	57
4.2.1.1	Αστοχία μηχανικού και λοιπού υλικού.....	57
4.2.1.2	Αστοχία ηλεκτρονικού - ηλεκτρολογικού υλικού.....	59
4.2.2	Αστοχία λογισμικού μέρους (software).....	63
§4.3	Αίτια - παράγοντες αστοχίας (failure causes - factors).....	66
§4.4	Τρόποι και μηχανισμοί αστοχίας (failure modes and mechanisms)....	72
4.4.1	Κόπωση (fatigue).....	72
4.4.2	Θραύση (fracture).....	76
4.4.3	Διάβρωση (corrosion).....	79
4.4.4	Φθορά (wear).....	89
4.4.5	Παραμόρφωση (deformation - distortion).....	92
4.4.6	Τρόποι αστοχίας σύνθετων υλικών.....	95
§4.5	Ορισμός της ανάλυσης αστοχιών συστημάτων και ο σκοπός αυτής.....	99
§4.6	Προσόντα ενός καλού αναλυτή αστοχιών.....	100
§4.7	Διαδικασία ανάλυσης αστοχιών συστημάτων.....	101
4.7.1	Μέθοδοι ανάλυσης αστοχιών συστημάτων.....	101
4.7.2	Μη καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου (Non - Destructive Testing - NDT).....	109
4.7.3	Καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου (Destructive Testing - DT)..	115
4.7.3.1	Μηχανικός έλεγχος (mechanical testing).....	116
4.7.3.2	Μικροσκοπικός έλεγχος – μεταλλογραφία - θραυστογραφία (microscopic examination - metallography - fractography).....	120
4.7.3.3	Χημική ανάλυση (chemical and elemental testing...)	123
4.7.4	Χρήσιμα εργαλεία και όργανα ενός αναλυτή για εργασίες πεδίου - χώρου αστοχίας.....	124
4.7.5	Βασικά στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται στην τελική αναφορά αστοχίας.....	125
4.7.6	Συνήθη σφάλματα και παγίδες στις οποίες μπορεί να υποπέσει ένας αναλυτής αστοχιών.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Περιπτώσεις εργαστηριακής ανάλυσης αστοχιών υλικού (case studies)

§5.1	Ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου πτέρυγας αεροσκάφους (aluminum extrusion aircraft wing component).....	127
§5.2	Ανάλυση αστοχίας κεφαλής κλειστρου ατομικού τυφεκίου M16 (rifle bolt).....	131
§5.3	Ανάλυση αστοχίας πέλματος ερπύστριας οχήματος μάχης του πεζικού (track shoe).....	134

§5.4	Ανάλυση αστοχίας κελύφους διατρητικής οβίδας 30 mm (armor piercing shell).....	136
§5.5	Ανάλυση αστοχίας σωλήνα πυροβόλου μεγάλου διαμετρήματος (large caliber gun barrel).....	138
§5.6	Ανάλυση αστοχίας τροχού μαχητικού αεροσκάφους (main wheel).....	141
§5.7	Ανάλυση αστοχίας ηλεκτρικών επαφών (electrical contacts) ενός DIMM (Dual In - line Memory Module).....	144
§5.8	Ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου στροφέου ελικοπτήρου (rotor head component of an ADF helicopter).....	147
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....		150
Βιβλιογραφία.....		152
Ιστότοποι		155
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		158
Α'	Βασικοί ορισμοί αστοχίας.....	158
Β'	Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάλυσης αστοχίας.....	159
Γ'	Διάγραμμα βασικών τρόπων αστοχίας (failure modes).....	160
Δ'	Διάγραμμα ανάλυσης ενδοκρυσταλλικής και περικρυσταλλικής θραύσης	161
Ε'	Διάγραμμα ανάλυσης των κατηγοριών διάβρωσης.....	162
ΣΤ'	Διάγραμμα ανάλυσης των κατηγοριών φθοράς.....	163
Ζ'	Πίνακας «Check List» πιθανών αστοχιών (failure causes).....	164
Η'	Ερωτήματα στα οποία πρέπει να απαντήσει ένας αναλυτής αστοχιών κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης αστοχίας.....	165
Θ'	Πίνακας με βασικά χαρακτηριστικά των NDT.....	166
Ι'	Πίνακας με προτεινόμενες μεθόδους ανάλυσης ανάλογα τον τρόπο αστοχίας.....	168
ΙΑ'	Χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών.....	169
ΙΒ'	Βασικό Τυπολόγιο της Μηχανικής των Υλικών.....	171
ΙΓ'	Διάγραμμα βασικών κατηγοριών επεξεργασίας - κατεργασίας - συναρμολόγησης υλικών.....	172
ΙΔ'	Πίνακας με τιμές χαρακτηριστικών ιδιοτήτων βασικών υλικών.....	173
ΙΕ'	Τεχνικές Σκληρομέτρησης.....	174
ΙΣΤ'	Χρήσιμα εργαλεία που πρέπει να περιέχονται στο βαλιτσάκι ενός αναλυτή αστοχιών.....	175

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελίδα
Σχήμα 1. Κύρια μέρη στρατιωτικού οπλικού συστήματος.....	13
Σχήμα 2. Δομή κύριου-σύνθετου συστήματος.....	14
Σχήμα 3. Waterfall model.....	17
Σχήμα 4. Spiral model	17
Σχήμα 5. Ανάπτυξη - χρήση οπλικού συστήματος.....	18
Σχήμα 6. Μηχανουργική Κατεργασία.....	19
Σχήμα 7. Τεχνικές σχεδίασης συστημάτων για ανοχή στις ρωγμές.....	23
Σχήμα 8. Κατηγορίες διαθέσιμων υλικών μέσα στον χρόνο.....	24
Σχήμα 9. Φωτογραφική απεικόνιση διαφόρων μεταλλικών υλικών.....	26
Σχήμα 10. Συνδυασμοί επιμέρους κατηγοριών υλικών σε σύνθετα υλικά.....	33
Σχήμα 11. Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	34
Σχήμα 12. Συνήθεις απλές μηχανικές φορτίσεις υλικών στοιχειώδους όγκου.....	39
Σχήμα 13. Διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα.....	40
Σχήμα 14. Τυπικά δοκίμια και επιφάνειες θραύσης μετά από όλκιμη και φαθυρή θραύση με εφαρμογή εφελκυστικών φορτίων.....	42
Σχήμα 15. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για όλκιμο και εύθραυστο υλικό.....	43
Σχήμα 16. (α) Εναλλασσόμενη φόρτιση και (β) Διάγραμμα κοπώσεως.....	45
Σχήμα 17. Τυπική διάδοση ρωγμής σε σχέση με τον χρόνο.....	50
Σχήμα 18. Βασικοί τρόποι καταπόνησης ρωγμών.....	51
Σχήμα 19. Τασικό πεδίο γύρω από την κορυφή της ρωγμής.....	51
Σχήμα 20. Διάγραμμα τάσεων σε σχέση με την απόσταση r και ζώνη πλαστικότητας.....	52
Σχήμα 21. Τύποι αστοχιών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός συστήματος	55
Σχήμα 22. Συνήθη ποσοστά αστοχίας διαφόρων δομικών στοιχείων.....	58
Σχήμα 23. Παραδείγματα αστοχιών σε περίβλημα IC.....	61
Σχήμα 24. Παραδείγματα αστοχιών IC λόγω EOS (λιώσιμο και ρωγμή).....	62
Σχήμα 25. Παραδείγματα χρήσης στρατιωτικών υπολογιστικών συστημάτων.....	64
Σχήμα 26. Παράγοντες που μειώνουν τη ζωή ενός συστήματος.....	71
Σχήμα 27. Μηχανισμός της κόπωσης σχηματικά, αριστερά και παράδειγμα θραύσης λόγω κόπωσης δεξιά.....	74
Σχήμα 28. Intergranular mode of fraction: (α) Σχηματική απεικόνιση (β) Ψηφιακή απεικόνιση θραύσης χάλυβα από SEM.....	77
Σχήμα 29. Transgranular mode of fraction: (α) Σχηματική απεικόνιση (β) Ψηφιακή απεικόνιση θραύσης χάλυβα από SEM.....	77

Σχήμα 30.	Παράδειγμα ομοιόμορφης διάβρωσης.....	81
Σχήμα 31.	Παράδειγμα γαλβανικής διάβρωσης.....	82
Σχήμα 32.	Διάβρωση με βελονισμούς στο εσωτερικό αγωγού από ανοξείδωτο χάλυβα.....	83
Σχήμα 33.	Παραδείγματα διάβρωσης χαραγών ή ρωγμών σε αγωγό και μεταλλικό δακτύλιο.....	83
Σχήμα 34.	Περιρυσταλλική διάβρωση σε αλουμίνιο.....	84
Σχήμα 35.	Παράδειγμα περιρυσταλλικής διάβρωσης σε ανοξείδωτο χάλυβα.....	85
Σχήμα 36.	Παράδειγμα επιλεκτικής διάβρωσης.....	85
Σχήμα 37.	Παραδείγματα διάβρωσης εκ τριβής.....	86
Σχήμα 38.	Παραδείγματα διάβρωσης εκ τριβής μεταλλικών επιφανειών.....	86
Σχήμα 39.	Παράδειγμα διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση.....	87
Σχήμα 40.	Παράδειγμα διάβρωσης αγωγών αλουμινίου από υψηλή θερμοκρασία..	88
Σχήμα 41.	Παράδειγμα MIC διάβρωσης σε αγωγούς.....	89
Σχήμα 42.	Φθορά τριβής σε χαλύβδινη επιφάνεια εξαρτήματος.....	90
Σχήμα 43.	Ψήγματα χαλκού προσκολλημένα σε χαλύβδινη επιφάνεια λόγω φθοράς πρόσφυσης.....	91
Σχήμα 44.	(α) Παράδειγμα υδραντλίας με φθορά τριβής (β) Φθορά επαφής σε άξονα χάλυβα στη επιφάνεια σύνδεσής του.....	92
Σχήμα 45.	(α) Παραμόρφωση περιστροφου πιστολιού (β) Παραμόρφωση κάμψης σε γρανάζι.....	93
Σχήμα 46.	Κυριότεροι τρόποι αστοχίας σύνθετων υλικών.....	95
Σχήμα 47.	(α) Σχηματική απεικόνιση ρωγμών σε μήτρα σύνθετου υλικού, (β) Απεικόνιση ρωγμών σε μήτρα σύνθετου υλικού μέσω SEM.....	96
Σχήμα 48.	(1) Ανέπαφη ίνας, (2) Ίνα εκτός μήτρας, (3) Αποκόλληση ίνας και (4) Θραύση ίνας.....	96
Σχήμα 49.	Παραμόρφωση και θραύση ινών λόγω άσκησης εφελκιστικών και καμπτικών τάσεων.....	97
Σχήμα 50.	(α) Απεικόνιση ρωγμών σε ίνες σύνθετου υλικού μέσω SEM, (β) Απεικόνιση αστοχίας σύνθετου μέσω SEM, όπου (Α): θραύση ίνας, (Β) ίνα εκτός μήτρας, (C) θραύση μήτρας και (D) αποκόλληση ίνας....	97
Σχήμα 51.	Παραμόρφωση (α) και ρωγμή (β) κόκκων ενίσχυσης σύνθετου υλικού...	97
Σχήμα 52.	Delamination Modes (a) Mode I: Normal delamination, (b) Mode II: Shear delamination, (c) Mode III: Shear delamination.....	98
Σχήμα 53.	Παραδείγματα αποστρωματοποίησης σύνθετου υλικού.....	98
Σχήμα 54.	Παραδείγματα LPT με χρήση φωσφορίζοντα διεισδυτικά υγρά.....	110
Σχήμα 55.	(α) Βασική αρχή της τεχνικής MT (β) Εντοπισμός επιφανειακής ρωγμής.....	111
Σχήμα 56.	(α) Παράδειγμα ελέγχου σε μεταλλικό υλικό, (β) Οπτική απεικόνιση εσωτερικής ατέλειας με χρήση UT.....	111

Σχήμα 57.	Απεικόνιση της τεχνικής ελέγχου με υπερήχους	112
Σχήμα 58.	2D Digital Radiography Testing.....	113
Σχήμα 59.	α. Ανίχνευση ρωγμής σε μεταλλικό εξάρτημα μέσω RT β. 3D απεικόνιση μεταλλικού εξαρτήματος.....	113
Σχήμα 60.	Τεχνική ελέγχου με δινορεύματα, (β) Ενδεικτικός εξοπλισμός.....	114
Σχήμα 61.	Θερμογραφική απεικόνιση ρωγμών σε εξαρτήματα.....	115
Σχήμα 62.	Παραδείγματα σταθερών και φορητών οργάνων σκληρομέτρησης.....	118
Σχήμα 63.	Ενδεικτικό όργανο σκληρομέτρησης και δοκιμής σε βίδα.....	118
Σχήμα 64.	Εξοπλισμός δοκιμής τριών και τεσσάρων σημείων.....	119
Σχήμα 65.	(α) Ενδεικτικό όργανο μέτρησης και (β) Τυπική διάταξη οργάνου.....	120
Σχήμα 66.	Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) - ενδεικτικός εξοπλισμός.....	121
Σχήμα 67.	Απεικονίσεις μέσω SEM περικρυσταλλικής θραύσης (αριστερά) και ραβδώσεων κόπωσης (δεξιά).....	122
Σχήμα 68.	Απεικονίσεις χημικής ανάλυσης μέσω SEM - XFS	123
Σχήμα 69.	Φωτογραφία της δοκού που εμφάνισε ρωγμή στο συναρμολόγημα της πτέρυγας του αεροπλάνου.....	128
Σχήμα 70.	(a) Μακροσκοπική απεικόνιση του θραυσμένου τμήματος της δοκού, (b) Αποδομημένη τραχιά περιοχή- Ζώνη Α, (c) Λεία περιοχή θραύσης λόγω κόπωσης με χαρακτηριστικά beach marks- Ζώνη Β και (d) Επιφανειακή αποδόμηση- παρουσία κοιλοτήτων και οπών.....	128
Σχήμα 71.	(α) Ζώνη Α: Τραχιά περιοχή, (β) Διάβρωση στη τραχιά περιοχή (γ) Ζώνη Β: Λεία περιοχή με σημάδια κόπωσης, (δ) Επιφανειακή περιοχή.....	129
Σχήμα 72.	Απεικόνιση κατανομής φορτίων με προσομοίωση.....	130
Σχήμα 73.	Ατομικό τυφέκιο M16.....	131
Σχήμα 74.	Επιφάνειες θραύσης της κεφαλής του κλειστρου.....	131
Σχήμα 75.	Επιφάνεια θραύσης και φθοράς μέσω SEM.....	132
Σχήμα 76.	Προσομοίωση πεδίου τάσεων της κεφαλής του κλειστρου	133
Σχήμα 77.	Φωτογραφία του πέλματος που αστόχησε.....	134
Σχήμα 78.	(α) IGC & TGC (β) IGC.....	134
Σχήμα 79.	(α) Έγκλεισμα πυριτινού αλάτος (β) Tempered martensite structure...	135
Σχήμα 80.	Επιφάνεια θραύσης του κελύφους μακροσκοπικά.....	136
Σχήμα 81.	(α) Μικροδομή με IGC, TGC και εγκλείσματα, (β) Μικροδομή με εγκλείσματα σουλφιδίου και πυριτινού αλάτος.....	137
Σχήμα 82.	Μικροδομή δείχνοντας τη «banded» δομή αποτελούμενη από «tempered martensite and bainite».....	137
Σχήμα 83.	Αντιπροσωπευτικό θραύσμα σωλήνα πυροβόλου.....	139
Σχήμα 84.	(α) Μικροδομή στην οποία φαίνεται η περικρυσταλλική θραύση (β) Περικρυσταλλικές ρωγμές.....	139

Σχήμα 85.	Τροχός αεροσιγάφους και θραυσμένο τμήμα αυτού.....	141
Σχήμα 86	(α) Περιοχή θραύσης 1 (β) Περιοχή θραύσης 2 και 3.....	142
Σχήμα 87.	Εσωτερική περιοχή εκκίνησης της ρωγμής.....	142
Σχήμα 88.	Ραβδώσεις κόπωσης στην περιοχή 1.....	142
Σχήμα 89.	Ένδειξη συγκέντρωσης τάσεων μέσω προσομοίωσης.....	143
Σχήμα 90.	Πλακέτα με ενσωματωμένο DIMM.....	145
Σχήμα 91.	Οπτικό μικροσκόπιο: (α) απόξεση στα σημεία υποδοχής των pins στις ηλεκτρικές επαφές, (β) σημάδια φθοράς στις επαφές των memory modules.....	145
Σχήμα 92.	Εικόνα SEM: (α) παρουσία οξειδίων Νικελίου στην επιφάνεια ηλεκτρικής επαφής, (β) σημάδια φθοράς σε pin.....	146
Σχήμα 93.	(α) Το starflex στροφείο εγκατεστημένο στο κεντρικό στροφείο του ελικοπτέρου, (β) Starflex στροφείο με αστοχία(θραύση) σε δύο από τους τρεις «star» βραχίονες.....	147
Σχήμα 94.	Επιφάνειες θραύσης ενός από τους βραχίονες του starflex στροφείου ελικοπτέρου.....	148
Σχήμα 95.	Εικόνα από SEM (α) Επίπεδη επιφάνεια θραύσης της άκρης βραχίονα του starflex στροφείου (β) Παραμόρφωση- λύγισμα ινών στην επιφάνεια θραύσης.....	148

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σελίδα

Πίνακας 1.	Βασικά βήματα ανάλυσης αστοχίας ημιαγωγού - IC.....	63
Πίνακας 2.	Ποσοστά εμφάνισης μηχανισμών αστοχίας.....	94
Πίνακας 3.	Αντικειμενικοί σκοποί ανάλυσης αστοχιών.....	99
Πίνακας 4.	Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 7075 - T6.....	129
Πίνακας 5.	Χημική ανάλυση του δομικού στοιχείου της κεφαλής του κλείστρου.....	132
Πίνακας 6.	Χημική ανάλυση δείγματος θραυσμένου πέλματος	135
Πίνακας 7.	Χημική ανάλυση χάλυβα κελύφους 30 mm βλήματος.....	137
Πίνακας 8.	Μηχανικές ιδιότητες του εξεταζόμενου σωλήνα πολυβόλου.....	140
Πίνακας 9.	Μηχανικές ιδιότητες σωλήνα πυροβόλου.....	140

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΗΜΗΣΕΩΝ

Συντομογραφία	Ανάλυση
AES	Auger Electron Spectroscopy
CAD	Computer - Aided Design
CAE	Computer - Aided Engineering
CAM	Computer - Aided Manufacturing
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
EBSD	Electron Backscattered Diffraction
ECT	Eddy Current Testing
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
ESD	Electrostatic Discharge
EOS	Electrical Over - Stress
EPMA	Electron Probe Microanalysis
FEA	Finite Element Analysis
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscopy
HCF	High Cycle Fatigue
IC	Integrated Circuit
IGC	Intergranular Cracking
LCF	Low Cycle Fatigue
LPT	Liquid - Penetrant Testing
MIC	Microbiologically - Influenced Corrosion
MT	Magnetic particle testing
RAM IC	Random - Access Memory Integrated Circuit
RT	Radiography Testing
SCC	Stress Corrosion Cracking
SEM	Scanning Electron Microscopy
TEM	Transmission Electron Microscopy
TMA	Termo - Mechanical Analysis
TGC	Transgranular Cracking
TT	Thermographic Testing
UT	Ultrasonic Testing
VT	Visual Testing
XPS	X - ray Photoelectron Spectroscopy
XRF	X - ray Fluorescence
XRD	X - ray Diffraction

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύγχρονα οπλικά συστήματα αποτελούν πολύπλοκα συναρμολογήματα επιμέρους δομικών στοιχείων. Παρά τις εξελίξεις στον τομέα της πολεμικής βιομηχανίας παρατηρούνται πολλές φορές αστοχίες σε δομικά στοιχεία, ικανές να καταστήσουν ένα σύστημα μη λειτουργικό και να θέσουν σε κίνδυνο τόσο την αποστολή όσο και το προσωπικό. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως θέμα την **ανάλυση αστοχιών οπλικών συστημάτων** (failure analysis of military systems). Πραγματεύεται δηλαδή, το σύνολο των τεχνικών, των μεθόδων και των κριτηρίων ελέγχου που ένας μηχανικός πρέπει να εφαρμόσει προκειμένου να εξακριβώσει «το πως και το γιατί» ένα σύστημα, υποσύστημα, συγκρότημα ή εξάρτημα σταμάτησε να επιτελεί την λειτουργία για την οποία έχει κατασκευαστεί.

Γενικά, η ανάλυση αστοχίας ενός συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στο στάδιο της σχεδίασης και κατασκευής του, είτε αφού αυτό έχει τεθεί σε λειτουργία και τελικά αστοχήσει σε κάποια από τις φάσεις της ζωής του. Στην πρώτη περίπτωση, η ανάλυση αστοχίας έχει σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας του συστήματος και την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο πρόκλησης ατυχημάτων σε προσωπικό, την πιθανότητα απώλειας υλικού ή μόλυνσης του περιβάλλοντος, καθώς και το κόστος των επισκευών. Στη δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα, η ανάλυση αστοχίας διεξάγεται με σκοπό την εύρεση των αιτιών και των παραγόντων που οδήγησαν ένα σύστημα σε αστοχία, καθώς και τον καθορισμό των απαιτούμενων ενεργειών θεραπείας - επισκευής. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επικεντρώνεται στη δεύτερη κατηγορία ανάλυσης αστοχιών, αναπτύσσοντας μια γενική μεθοδολογία.

Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι, όταν μιλάμε για «σύστημα» εννοούμε: «ένα σύνολο αλληλένδετων εξαρτημάτων/δομικών στοιχείων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά έναν οργανωμένο τρόπο προς εκπλήρωση ενός κοινού σκοπού. Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους, αποτελούμενα από ανθρώπους, οργανισμούς, διαδικασίες, εξοπλισμό (hardware), λογισμικό (software) και εγκαταστάσεις» (Δάρας, 2014). Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ο όρος «δομικό στοιχείο» θα χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει οποιοδήποτε μέρος του κυρίου οπλικού συστήματος, όπως επιμέρους συστήματα, υποσύστημα, υποσυγκροτήματα και εξάρτηματα. Η περιστασιακή χρήση του όρου «κατασκευή» θα υποδηλώνει την έννοια του οπλικού συστήματος.

Ο όρος «αστοχία» (failure) υποδηλώνει την οποιαδήποτε αλλαγή που συμβεί σε ένα δομικό στοιχείο συστήματος ή διαδικασίας και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητάς του να εκτελεί ορθά μία προδιαγεγραμμένη λειτουργία για την οποία έχει

σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Από όλα τα δομικά στοιχεία ενός οπλικού συστήματος, η διατριβή αυτή επικεντρώνεται περισσότερο στην αστοχία του υλικού μέρους αυτού (hardware), κάνοντας ωστόσο μια μικρή αναφορά σε αστοχίες του λογισμικού μέρους (software). Επιπλέον, από το σύνολο του υλικού μέρους ενός συστήματος θα αναλυθούν περισσότερο οι αστοχίες των μηχανικών - μηχανολογικών μερών αυτού, αναφέροντας ωστόσο εν συντομία αστοχίες ηλεκτρονικού - ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και αναλύοντας μια περίπτωση αστοχίας ηλεκτρονικού εξαρτήματος.

Όπως είναι γνωστό, το υλικό μέρος ενός συστήματος κατασκευάζεται από μεταλλικά ή μη μεταλλικά υλικά (πολυμερή, σύνθετα). Η επιλογή του καταλληλότερου υλικού για την κατασκευή ενός δομικού στοιχείου εξαρτάται από μια σειρά λειτουργικών απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιήσει. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, η σύνθεσή του, οι ιδιότητες της επιφάνειάς του και η μικροδομή του. Όσον αφορά τον τρόπο αστοχίας του υλικού, αυτός εκδηλώνεται διαφορετικά στα μέταλλα απ' ότι στα σύνθετα ή τα πολυμερή υλικά. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι μηχανισμοί αστοχίας οι οποίοι είναι κοινοί και στους δύο τύπους υλικών (μεταλλικά και μη). Οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας που παρατηρούνται στα μεταλλικά υλικά είναι η κόπωση (fatigue), η θραύση (fracture), η διάβρωση (corrosion), η φθορά (wear), η παραμόρφωση (distortion) ή συνδυασμός των ανωτέρω. Η διατριβή αυτή επικεντρώνεται στα μεταλλικά υλικά, αναφέροντας περιληπτικά και τους τρόπους αστοχίας των σύνθετων υλικών.

Οι αστοχίες γενικά μπορεί να οφείλονται σε σχεδιαστικά ή κατασκευαστικά σφάλματα, στον τρόπο χειρισμού του συστήματος, στις συνθήκες λειτουργίας του, στο επίπεδο συντήρησης και επισκευών κ.α. Για την εξακρίβωση των πιθανών αιτιών αστοχίας ενός δομικού στοιχείου χρησιμοποιείται μια σειρά καταστρεπτικών και μη τεχνικών ελέγχου. Στην πρώτη περίπτωση ο έλεγχος πραγματοποιείται χωρίς την πρόκληση καταστροφής στο στοιχείο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται η λήψη δείγματος (δοκιμίου) από αυτό για την εκτέλεση περαιτέρω εργαστηριακών ελέγχων. Επιπλέον, η διεξαγωγή μιας ανάλυσης αστοχιών πολυσύνθετου συστήματος, όπως είναι τα οπλικά, απαιτεί τη συνεργασία πολλών επιστημόνων και μηχανικών, προκειμένου το αποτέλεσμα αυτής να είναι γρήγορο και αξιόπιστο. Ο αναλυτής συστημάτων θα πρέπει να είναι πλήρως καταρτισμένος στον τομέα του και να διακατέχεται από ήθος και αρχές.

Τέλος, με τη διατριβή αυτή συμπεραίνεται ότι κάθε αστοχία είναι μοναδική και πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τέτοια. Ακολουθώντας μια συστηματική διαδικασία και μεθοδολογία, προσαρμοσμένη ανά περίπτωση και εκτελώντας μια σειρά από κατάλληλους τεχνικούς ελέγχους (NDT - DT) μπορεί η ομάδα ανάλυσης να καταλήξει σε ένα αξιόπιστο συμπέρασμα για τα αίτια της αστοχίας. Έτσι, η ανάλυση αστοχίας θα μπορεί να αποτελεί εργαλείο για την ορθή επιδιόρθωση της αστοχίας, τη λήψη προληπτικών μέτρων προς αποφυγή μελλοντικών αστοχιών, καθώς και για την αποκατάσταση της αλήθειας μέσω δικαστικών ή διοικητικών διαδικασιών σε περιπτώσεις απώλειας ζωής ή υγείας.

ABSTRACT

Although today's weapon systems are becoming more sophisticated and able to perform complicated functions, they are also more complex, consisted of numerous components and thus, usually more susceptible to failures. In order to avoid potential failures, quality control and assurance activities are being carried out during the stage of design and manufacturing. But, these predictive and preventive measures cannot eliminate the presence of systems' failures. This thesis addresses the failures of weapon systems that may occur during their life-cycle and deals with the set of techniques and methods that must be systematically carried out by an engineer in order to confirm "HOW and WHY" a system does not perform its intended function. The objective of failure analysis is to identify the causes and the factors of the failure by analyzing failure mechanisms and modes like overstress, fracture, fatigue, corrosion, wear, deformation, etc and in addition to suggest corrective actions.

System failures can be induced by component failures or they can occur as a result of complex component and subsystem interactions, without any parts failing. As far as early failures is concerned, they are usually caused due to manufacturing defects, assembly or implementation faults, design errors, etc, whereas the chance and wear-out failures are generally caused by chance factors (overstresses, inadequate use) and due to wear and lack of maintenance respectively. Moreover, a failure can be occurred in the hardware or in the software part of the system. With regard to hardware failures, they can be observed in the mechanical, electrical, electromechanical or electronic parts of it. This thesis focuses on the hardware failures and especially on mechanical failures. In addition, components can be manufactured by metallic or non metallic materials (composites, polymeric) which perform different failure modes. This thesis deals mainly with metallic materials failures, while it also provides a brief discussion of composites' failure modes and a respective case study.

Finding the root causes of systems failures is far more difficult. Several techniques and methods are used in failure analysis investigation to find out the cause of failure, depending on the severity and type of problem. These techniques range from simple optical macroscopic observations (visual and obvious manifestations) to examinations of samples under a microscope or carrying out other mechanical or chemical analysis.

This thesis came to the conclusion that each failure is different and it has to be addressed as an unique incident. Only with a systematic failure analysis which deploys all the available techniques and methods (NDT –DT) depending on the type of component failure and the prevailing circumstances, the analyst can identify the causes and the factors that made the system incompetent to function properly. Failure analysis can provide

valuable feedback to the product manufacturers and operators for improving design, manufacturing or even maintenance faults that might have been overlooked.

The thesis is divided in five chapters, as follows:

Chapter 1: “Introduction”: outlines this thesis and provides some historical examples of military systems’ failures as well as a brief look at criteria of failure throughout the years.

Chapter 2: “Development of a system”: discusses the concept of “system”, the stages of its life-cycle, the types of the materials that are used in military systems and the respective treatments that are used in order to obtain desirable properties.

Chapter 3: “Basic concepts of Engineering Fracture Mechanisms”: provides a basic background of fracture mechanics and failure criteria.

Chapter 4: “Failure Analysis of Systems”: examines the failure analysis purpose and procedure, the fundamental causes and factors of failures, the basic failure modes and mechanisms and finally the basic investigation techniques.

Chapter 5: “Case Studies of Military Systems’ Failures”: examines and discusses eight (8) examples of real-world failures of interest and their respective failure analysis.

Finally, the **Epilogue** summarizes the thesis conclusion followed by **References** and some useful appendices, whereas lists of images and matrices included.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η εισαγωγή παρέχει τρεις παραγράφους. Η πρώτη παράγραφος περιλαμβάνει τον τρόπο ανάπτυξης της μεταπτυχιακής διατριβής θεματικά, ενώ στη δεύτερη και τη τρίτη παράγραφο αναφέρονται κάποια ιστορικά παραδείγματα αστοχιών και μια σύντομη ιστορική αναδρομή σε κριτήρια αστοχίας αντίστοιχα.

§1.1 Ανάπτυξη της μεταπτυχιακής διατριβής

Το **1° Κεφάλαιο** αποτελεί ένα εισαγωγικό μέρος της μεταπτυχιακής διατριβής όπου αναφέρονται ορισμένα ιστορικά παραδείγματα αστοχίας οπλικών συστημάτων, ενώ γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή σε κριτήρια αστοχίας υλικών.

Στο **2° Κεφάλαιο** περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης ενός οπλικού συστήματος, μιας και οι περισσότερες από τις αστοχίες που παρατηρούνται στην πρώιμη φάση της ζωής του συστήματος οφείλονται σε σχεδιαστικά και κατασκευαστικά λάθη. Συγκεκριμένα, αναλύεται η έννοια του συστήματος, βασικά στάδια της σχεδίασης και κατασκευής αυτού, η διάρκεια ζωής του, καθώς και η ανοχή του σε ζημία (damage tolerance). Επιπλέον, αναφέρονται εν συντομία οι κύριες κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται σε οπικά συστήματα και ο τρόπος επεξεργασίας και κατεργασίας αυτών.

Στη συνέχεια, το **3° Κεφάλαιο** περιλαμβάνει βασικές έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων - Αντοχής των Υλικών, όπως οι έννοιες της παραμόρφωσης, της θραύσης, της σκληρότητας, της δυσθραυστότητας, του ερπυσμού, της κόπωσης, τρόποι διάδοσης της ρωγμής κ.α. Επιπλέον, γίνεται μια απλή αναφορά σε κριτήρια αστοχίας υλικών, ως συμπλήρωμα της ιστορικής αναδρομής των κριτηρίων αυτών στην εισαγωγή της διατριβής.

Στο **4° Κεφάλαιο** περιγράφεται η διαδικασία ανάλυσης αστοχιών, περιλαμβάνοντας διάφορες τεχνικές και μεθοδολογίες. Αρχικά γίνεται αναφορά στα είδη και τους τύπους αστοχιών που παρατηρούνται στο υλικό μέρος ενός συστήματος (hardware - μηχανικό, ηλεκτρονικό, ηλεκτρολογικό), αλλά και στο λογισμικό (software), με έμφαση τις μηχανικές αστοχίες. Επίσης, αναλύονται οι τρόποι αστοχίας ενός δομικού στοιχείου με εμβάθυνση σε

αυτούς που εμφανίζονται στα μεταλλικά υλικά, όπως μη αναμενόμενη κόπωση, διάβρωση, φθορά, υπερφόρτωση, παραμόρφωση κ.α., αλλά και τα σύνθετα. Επιπλέον, περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι και τεχνικές ελέγχου αστοχίας υλικού (καταστροφικές και μη) σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς και χρήσιμα εργαλεία - όργανα που πρέπει ένας αναλυτής να έχει για εκτέλεση εργασιών πεδίου. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται και τα βασικά στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνει η τελική αναφορά αστοχίας, καθώς και τα συνήθη σφάλματα στα οποία μπορεί να υποπέσει ένας αναλυτής αστοχιών.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** περιγράφονται κάποιες πραγματικές περιπτώσεις αστοχίας δομικών στοιχείων οπλικών συστημάτων (case studies), στις οποίες αποδεικνύεται ο τρόπος αστοχίας και τα πιθανότερα αίτια που οδήγησαν σε αυτή.

Τέλος, παρατίθενται η **βιβλιογραφία - ιστότοποι**, ο **επίλογος**, **παραρτήματα**, **πίνακας συντμήσεων** και **κατάλογος σχημάτων και πινάκων**.

§1.2 Ιστορικά παραδείγματα αστοχίας οπλικών συστημάτων

- **Patriot Missile Defense System (Φεβρουάριος 1991)**

Κατά τη διάρκεια του Πολέμου του Κόλπου, μια αστοχία στο λογισμικό (software) του αντιαεροπορικού οπλικού συστήματος PATRIOT προκάλεσε τον θάνατο 28 στρατιωτών. Αιτία ήταν μια τροποποίηση του λογισμικού του συστήματος η οποία επηρέασε την ώρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση υπολογισμού του βεληνικού κατά 50% μετά από 20 ώρες λειτουργίας. Έτσι, η πυροβολαρχία δεν κατόρθωσε να αναχαιτίσει έναν πύραυλο «Scud» και προσβλήθηκε από αυτόν. (Lakshminarayanan, 1992)

- **GPS Receiver Communication**

Κατά τη διάρκεια των στρατιωτικών επιχειρήσεων των Η.Π.Α στο Αφγανιστάν ένας στρατιώτης έπρεπε να διαβιβάσει σε ένα αεροσκάφος τις συντεταγμένες ενός μεμαχρυσμένου στόχου μέσω μιας συσκευής επικοινωνίας χειρός GPS. Καθώς τοποθετούσε τις συντεταγμένες του στόχου στο GPS είχε ένδειξη για χαμηλή ενέργεια συσσωρευτών και αποφάσισε να τις αντικαταστήσει. Δεν γνώριζε όμως, ότι με την αλλαγή των συσσωρευτών και την ενεργοποίηση του GPS, αυτό τοποθετεί αυτόματα τις συντεταγμένες του σημείου στάσεώς του και όχι αυτές του στόχου. Αποτέλεσμα αυτού, ήταν να διαβιβαστούν τα στοιχεία

της δικής του θέσης και να σκοτωθούν όλοι οι στρατιώτες στο σημείο αυτό. Η απώλεια ζωής των στρατιωτών δεν οφειλόταν σε χειριστικό λάθος, αλλά σε λανθασμένη σχεδίαση του συστήματος, αφού αυτός που έθεσε τις προδιαγραφές λειτουργίας έπρεπε να είχε αποκλείσει μια τέτοια εκδοχή. (Jackson, 2004)

- **Πτώση μαχητικού αεροσκάφους F-16 (Φεβρουάριος 1992)**

Τον Φεβρουάριο του 1992 ένα μαχητικό αεροσκάφος προσέκρουσε σε κατοικημένο τόπο στην πόλη Hengelo της Ολλανδίας. Η πτώση ήταν αποτέλεσμα αστοχίας ενός δομικού στοιχείου του κινητήρα. Συγκεκριμένα ένας πείρος βαλβίδας συμπιεστή του κινητήρα, υλικού κατασκευής Nitronic 60, υπέστη θραύση. Στον πείρο είχαν επιδράσει οι μηχανισμοί της διάβρωσης, τύπου χαραγής (crevice) και ρωγμάτωσης λόγω μηχανικής καταπόνησης (stress corrosion crack - SCC). Μέχρι τη στιγμή της αστοχίας δεν ήταν γνωστό ότι το υλικό Nitronic 60 είναι επιρρεπές σε ρωγμές λόγω συνδυασμού διάβρωσης και άσκησης φορτίων. Επιπλέον, εντοπίστηκαν και άλλοι πείροι με ρωγμές, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραμενουσών τάσεων (residual stresses) και της διάβρωσης τύπου crevice. Η αστοχία δηλαδή, οφειλόταν σε λάθος επιλογή υλικού. Έτσι, ο μηχανικός κατασκευής αποφάσισε να αντικαταστήσει το υλικό Nitronic 60 με το Inconel 625, ένα κράμα με βάση το νικέλιο, το οποίο παρουσιάζει αντοχή σε SCC. Σταδιακά αλλάχθηκαν οι πείροι σε όλα τα F-16 παγκοσμίως. (Wanhill, Byrnes, & Smith, 2010)

§1.3 Ιστορική αναδρομή σε κριτήρια αστοχίας υλικών

Η μελέτη της αστοχίας των υλικών, συστηματική ή μη, είναι καταγεγραμμένη στη συλλογική μνήμη όλων των ανθρώπων από την αρχαιότητα έως σήμερα. Πάντοτε ο άνθρωπος ενστικτωδώς ανησυχούσε για τις κατασκευές που υπήρχαν στον χώρο του, π.χ. ανησυχούσε εάν «αντέξει» το σανίδι της γέφυρας που θα διασχίσει ή εάν καταρρεύσει η σκεπή της καλύβας που τον προστάτευε. Σήμερα, ανησυχεί επιπλέον για πολυσύνθετες κατασκευές και συστήματα, π.χ. εάν «αντέξει» ο δορυφόρος κατά την εκτόξευση ή εάν «κρακάρει» ένα λειτουργικό σύστημα υπολογιστή. Αυτή η σχεδόν μεταφυσική ανησυχία παραλληλίζεται τόσο με την αγωνία του ανθρώπου να μακροημερεύει, όσο και με την ανάγκη να λειτουργούν με ασφάλεια οι κατασκευές του. Έτσι, ο άνθρωπος ασχολούμενος με τα κριτήρια αστοχίας, στην πραγματικότητα πολεμούσε, και πολεμάει ακόμα, αυτήν την

προαιώνια «ανησυχία»: μια «ανησυχία» που διαφαίνεται έντονα στη σύντομη ιστορική αναδρομή που ακολουθεί. (Ανδριανοπουλος, 2003)

• Η ΕΠΟΧΗ ΤΩΝ ΛΙΘΙΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Το πρώτο κριτήριο αστοχίας των υλικών, δηλαδή νόμος που προβλέπει τις συνθήκες αστοχίας τους, διατυπώθηκε μισό αιώνα περίπου προτού η Μηχανική θεμελιωθεί ως επιστήμη. Λίγο πριν τη γαλλική επανάσταση, όταν ακόμη δεν είχαν ορισθεί θεμελιώδη μεγέθη της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος (τάσεις, παραμορφώσεις, μηχανικές ιδιότητες), ο περίφημος Coulomb, διετύπωσε ένα κριτήριο αστοχίας κατάλληλο για τα οικοδομικά υλικά της εποχής του (λίθους και πλίνθους). Το διετύπωσε με έναν μεγαλοφυή στην απλότητά του τρόπο, ο οποίος με όρους της εποχής μας είναι:

«Ένα υλικό αστοχεί όταν σε μια τομή του δημιουργηθεί κατάλληλος συνδυασμός ορθής (σ) και διατμητικής (τ) τάσης.»

Δηλαδή σύμφωνα με την παραπάνω διατύπωση, σε κάθε τομή οι τάσεις είναι αυτές που μαρτυρούν ότι το υλικό καταπονείται, κάτι το οποίο θα δούμε στο 3^ο Κεφάλαιο. Ο Coulomb επίσης γνώριζε ότι τα υλικά αστοχούν όταν υπάρξει λύση της συνέχειάς τους, δηλαδή εξουδετέρωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των δομικών τους λίθων.

Το κριτήριο του Coulomb με τις παραλλαγές του είναι αναντικατάστατο για τα ψαθυρά υλικά, υλικά τα οποία θα αναλύσουμε στο 3^ο Κεφάλαιο, ενώ όσα άλλα κριτήρια υπάρχουν τελικά καταλήγουν σε αυτό.

• Η ΕΠΟΧΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στις αρχές του 19ου αιώνα, η βιομηχανική επανάσταση οδήγησε στη γενίκευση της χρήσης των μετάλλων στις κατασκευές. Η αστοχία των κατασκευών αυτών δεν θύμιζε καθόλου την αστοχία των λίθων, καθώς επίσης και το είδος των καταπονήσεων ήταν διαφορετικό. Ο μηχανικός του 19ου αιώνα είχε να αντιμετωπίσει τις εφελκυστικές, καμπτικές ή στρεπτικές καταπονήσεις στα μέταλλα και όχι τις σχεδόν αποκλειστικά θλιπτικές καταπονήσεις των λίθων. Επιπλέον, η χρήση του ατμού ως κινητήρια δύναμη εισήγαγε τη θερμοκρασία ως έναν επιπλέον παράγοντα που επιδρά στον τρόπο αστοχίας των υλικών, καθώς τα μέταλλα όντας από τη φύση τους όλκιμα, γίνονται περισσότερο όλκιμα με την επίδραση της θερμότητας.

Οι λίθοι αστοχούν χωρίς αισθητή αλλαγή της εξωτερικής τους γεωμετρίας, του σχήματός τους. Αντιθέτως, τα μέταλλα πριν διαχωρισθούν, αλλάζουν σημαντικά και μόνιμα την εξωτερική μορφή τους (δημιουργούν λαιμούς). Το νέο κριτήριο έμοιαζε να είναι εκείνο της

«μέγιστης εφελκυστικής τάσης». Ο Lamè και άλλοι πολλοί, ήδη από το 1832, υιοθέτησαν και υποστήριξαν το κριτήριο αυτό, αλλά δεν απέδωσε. Ήταν δύσκολο να αποδώσει μια σχεδόν εξοντωτική απλοποίηση του κριτηρίου του Coulomb, όπου υπήρχε παραμέληση της διατμητικής τάσης στην κρίσιμη τομή. Έτσι, η κατάσταση παρέμενε ακόμα σκοτεινή.

Το φως ήρθε ακριβώς τριάντα χρόνια αργότερα από μια απροσδόκητη πηγή, αλλά δεν έγινε ορατό. Ο J. C. Maxwell, ο πατέρας της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας, ισχυρίστηκε σε μια επιστολή προς ένα φίλο του, ότι τα υλικά αστοχούν επειδή στρεβλώνονται, δηλαδή επειδή αλλάζουν οι γωνίες του στοιχειώδους κύβου. Υποστήριζε στην ουσία δηλαδή, ότι η αστοχία των υλικών αυτών ήταν υπόθεση μόνο διατμητικών τάσεων και καθόλου ορθών, όπως υποστήριζε ο Lamè.

Η ιδέα του Maxwell δεν έγινε ευρύτερα γνωστή, αλλά λίγο μετά, το 1864, ο Tresca, μηχανικός του γαλλικού στρατού, επανέλαβε την θεωρία αυτή διατυπώνοντας ρητά και με απλούς όρους το παρακάτω κριτήριο:

«Η μέγιστη διατμητική τάση, όταν λάβει μια κρίσιμη τιμή σε κάποια τομή, οδηγεί σε αστοχία το όλκιμο υλικό.»

Το κριτήριο του Tresca απέδωσε και εξακολουθεί να αποδίδει. Αποτελεί ωστόσο ειδική περίπτωση του κριτηρίου του Coulomb, όταν η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη είναι η ίδια.

• Η ΕΠΟΧΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Στην πρώτη δεκαετία του 20ού αιώνα, ο Rutherford παρουσίασε το ατομικό μοντέλο της δομής της ύλης: ο πυρήνας-ήλιος και τα ηλεκτρόνια-πλανήτες. Η ύλη είχε πλέον δομή και δεν ήταν ένα συνεχές πεδίο ιδιοτήτων, μηχανικών και άλλων. Στην απλούστερη περίπτωση ήταν ένα τρισδιάστατο δικτύωμα με άυλες «ράβδους». Τι συμβαίνει, όμως, στο δικτύωμα εάν αφαιρεθεί ένας κόμβος και πως αυτό αλλάζει την μέχρι τότε θεωρία περί της Αντοχής των Υλικών;

Οι παραδοσιακοί υπολογισμοί των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων βασιζόταν σε λείες (ομαλές) γεωμετρικές μορφές των κατασκευαστικών στελεχών. Η ίδια υπόθεση της ομαλότητας ίσχυε και για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών, δηλαδή ότι αυτές είναι χωρικά σταθερές (ισότροπα υλικά) ή μεταβάλλονταν κατά συνεχή τρόπο (ανισότροπα υλικά). Αυτή η γενικώς ομαλή συμπεριφορά των υλικών, επέτρεπε την απρόσκοπτη εφαρμογή των νόμων της Μηχανικής, στους οποίους είχε βασιστεί η κλασική Αντοχή των Υλικών.

Η πικρή εμπειρία από πολλές και ανεξήγητες κατασκευαστικές αστοχίες, όπως τρένων, καταρρεύσεις μεταλλικών γεφυρών κ.α., υπεδείκνυε ότι κάτι δεν ήταν σωστό στην κλασική θεωρία της Αντοχής των Υλικών. Επειδή η αξιοπιστία των μαθηματικών υπολογισμών και η

μακροσκοπική «ομαλότητα» των κατασκευαστικών στελεχών μπορούσαν εύκολα να ελεγχθούν, ο μόνος ύποπτος για τις αστοχίες αυτές ήταν πλέον η μικροσκοπική «ομαλότητα» των υλικών. Έτσι, τέθηκε το ερώτημα μήπως οι αόρατες, μικροσκοπικές ανωμαλίες της δομής των υλικών ήταν υπαίτιες για τις αστοχίες των υλικών - κατασκευών. Οι πειραματικοί φυσικοί της εποχής είχαν αρχίσει να ακτινοσκοπούν τα υλικά και να διαπιστώνουν ότι τέτοιες μικρές δομικές ανωμαλίες όντως υπάρχουν και είναι, μάλιστα, πολλές και ποικίλες.

Το 1919, ο Άγγλος ναυπηγός Α. Α. Griffith παρουσίασε μια λαμπρή ιδέα, η οποία του δικαιολογεί τον τίτλο του «Πατέρα» ενός νέου κλάδου της Αντοχής των Υλικών, της «Μηχανικής των Θραύσεων», βασικές αρχές της οποίας θα δούμε στο 3^ο Κεφάλαιο. Υπέθεσε ότι σε ένα πραγματικό υλικό με δομικές ανωμαλίες επιβάλλεται τεχνητά μια πολύ μεγαλύτερη μακροσκοπική γεωμετρική ανωμαλία, έτσι ώστε οι πραγματικές μικροσκοπικές ανωμαλίες να μην παίζουν κανένα ρόλο στη συμπεριφορά του υλικού. Με την υπόθεση αυτή, μπορούσε να θεωρήσει ότι το υλικό δεν είχε καμία δομική ανωμαλία, πλην της τεχνητής μακροσκοπικής και επομένως, ήταν ένα τέλειο, ομογενές, ισότροπο, ελαστικό υλικό με κάπως «περίεργη» μακροσκοπική γεωμετρία. Η γεωμετρική ανωμαλία που επέβαλε ο Griffith ήταν μια ελλειπτική οπή της οποίας ο μικρός ημιάξονας έτεινε στο μηδέν. Ήταν, δηλαδή, μια ευθύγραμμη «ρωγμή». Το πρόβλημα τώρα που παρουσιαζόταν ήταν ο προσδιορισμός των συνθηκών εκκίνησης της ρωγμής σε ένα τέλειο, συνεχές υλικό. Έτσι, η προσέγγιση του Griffith ήταν καθαρά ενεργειακή:

«Η ρωγμή εκκινεί (οδηγώντας το υλικό σε αστοχία), όταν η ελαστική ενέργεια που προσφέρεται στο υλικό από τα εξωτερικά φορτία γίνει αρκετή ώστε να καλύψει την ενεργειακή δαπάνη δημιουργίας νέων ελευθέρων επιφανειών κατά μήκος της επέκτασης της ρωγμής.»

Αν και το πρόβλημα του κριτηρίου ήταν βασικά, ο τρόπος εκκίνησης της ρωγμής, οι δυσκολίες στον υπολογισμό των τασικών πεδίων έθεσαν αυτό σε δεύτερη μοίρα. Έτσι, το 1955, ο Irwin εμμέσως επανέθεσε το πρόβλημα του κριτηρίου εισάγοντας την έννοια του «Συντελεστή Έντασης των Τάσεων», τον οποίο θα αναλύσουμε στο 3^ο Κεφάλαιο, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση του μεγέθους των τάσεων. Έτσι, ο Irwin εισήγαγε ένα νέο κριτήριο στο οποίο δεν ασχολείται με τις τάσεις, διότι έτσι κι αλλιώς απειρίζονται στο σημείο ενδιαφέροντος, αλλά επικεντρώνεται μόνο στο συντελεστή έντασης των τάσεων, ο οποίος είναι ένας αριθμός ενδεικτικός της τασικής κατάστασης που επικρατεί κοντά στη ρωγμή. Συγκεκριμένα,

«Η ρωγμή θα εκκινήσει, όταν ο συντελεστής έντασης των τάσεων πάρει μια κρίσιμη τιμή.»

Αν και ο απειρισμός των τάσεων στην αιχμή της ρωγμής μπορεί να θεωρηθεί ως μια δευτερεύουσα αδυναμία ενός μοντέλου υπολογισμού των τάσεων, ωστόσο, αφήνει απάντητα πολλά ερωτήματα σχετικά με το τι συμβαίνει στο σημείο αυτό. Για παράδειγμα, τίθενται ερωτήματα σχετικά με την αντιμετώπιση των πλαστικών παραμορφώσεων ή για τον κρίσιμο συντελεστή έντασης των τάσεων που δεν μένει σταθερός όταν αλλάζει το πάχος του δοκιμίου που χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό του.

Οι δεκαετίες που ακολούθησαν, του 1970 και του 1980, χαρακτηρίζονται από υπερβολικά μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων που πρότειναν νέα κριτήρια αστοχίας ρωγματομένων υλικών. Υπήρξαν τεύχη διεθνών ειδικών περιοδικών στα οποία όλα τα άρθρα παρουσίαζαν τέτοια κριτήρια, ενώ παράλληλα η απλή παρακολούθηση της συνεχώς αυξανόμενης βιβλιογραφίας γινόταν δύσκολη. Πολλά από τα κριτήρια αυτά είχαν νόημα μόνο σε μια στενή περιοχή υλικών, γεωμετρικών και φορτίσεων, ενώ άλλα παρουσίαζαν ήδη υπάρχοντα κριτήρια με νέα διατύπωση και αλγεβρική μορφή. Έτσι, υπήρχε η ανάγκη επιλογής του «ορθού» για κάθε εφαρμογή κριτηρίου, προκειμένου να μην οδηγούνται σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάπτυξη οπλικού συστήματος

§2.1 Η έννοια του συστήματος

Αρχικά, θα ήταν σκόπιμο να αποδώσουμε την έννοια του «συστήματος», ώστε να γίνεται εύκολα αντιληπτό τι εννοούμε όταν αναφερόμαστε στον όρο «σύστημα» και συγκεκριμένα σε οπλικό σύστημα.

«Κάθε **σύστημα** είναι ένα σύνολο αλληλένδετων εξαρτημάτων/δομικών στοιχείων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά έναν οργανωμένο τρόπο προς εκπλήρωση ενός κοινού σκοπού. Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους, αποτελούμενα από ανθρώπους, οργανισμούς, διαδικασίες, εξοπλισμό (hardware), λογισμικό (software) και εγκαταστάσεις.» (Δάρας, 2014), (Shishko, 1995)

«Με τον όρο **σύστημα** εννοούμε μια σύνθετη πληροφοριακή δομή, με πληροφοριακό περιεχόμενο, το οποίο μπορεί να εκφράζεται με υλικά και χωρικά, αποτελούμενη από πολλαπλά δομικά μέρη τα οποία είναι αυτόνομα, με ατομική ταυτότητα και συμπεριφορές, αλλά αλληλεπιδρούν στενά μεταξύ τους.» (Δάρας, 2014)

«Ένα **σύστημα** αποτελεί δίκτυο από αλληλεπιδρούσες μεταβλητές. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αλλαγή σε οποιονδήποτε κόμβο του συστήματος θα προκαλέσει αλλαγές και στους άλλους κόμβους, οι οποίες όμως δεν είναι απαραίτητο να είναι προβλέψιμες.» (Δάρας, 2014)

Ο **σκοπός** ενός συστήματος είναι να επιτελέσει μια λειτουργία, ώστε να παράσχει ένα «έργο», είτε δρώντας ως αυτόνομη οντότητα, είτε ως μέρος ενός άλλου συστήματος. Αυτός μπορεί να είναι τόσο απλός και μοναδικός, όπως η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα όχημα, όσο και πολύπλοκος και μεγάλος, όπως η εξερεύνηση της επιφάνειας του διαστήματος.

Κάθε σύστημα έχει εισόδους, εξόδους και επεξεργασίες, και περιβάλλεται από ένα περιβάλλον από το οποίο διαχωρίζεται με ένα όριο. Επιπλέον, κάθε σύστημα δύναται να υφίσταται και να λειτουργεί στα πλαίσια ενός «εξωτερικού υπέρ-συστήματος», ενός συνόλου δηλαδή, από συσχετιζόμενα συστήματα. Παράλληλα, κάθε σύστημα μπορεί να αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα, τα οποία από μόνα τους αποτελούν συστήματα. Επιπλέον, υπάρχει «κάποιος» ο οποίος είναι υπεύθυνος για την λήψη αποφάσεων σχετικών με το σύστημα, είτε άνθρωπος, είτε μηχανή.

Όσον αφορά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα, αυτά μπορεί να πολυάριθμα και αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους. Τα **δομικά στοιχεία** ενός συστήματος ομαδοποιούνται και διακρίνονται στις παρακάτω πέντε γενικές κατηγορίες (Δάρας, 2014):

- το υλικό μέρος (hardware) του συστήματος
- το λογισμικό μέρος (software) του συστήματος
- το μέρος των δεδομένων (data) του συστήματος
- το διαδικαστικό μέρος (process) του συστήματος
- το ανθρώπινο μέρος (people) του συστήματος
- τις εγκαταστάσεις (facilities) του συστήματος

Ιδιαίτερα, το υλικό μέρος και το λογισμικό μέρος περιλαμβάνουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Τα δομικά εργαλεία (manufacturing tools), τα οποία έχουν σκοπό τη σύνδεση των υλικών μερών του συστήματος.
- Τα λειτουργικά/επιχειρησιακά στοιχεία (operational elements), τα οποία έχουν σκοπό την λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με τις δυνατότητες του.
- Τον ελεγκτικό εξοπλισμό (test equipment), ο οποίος έχει σκοπό τον έλεγχο της λειτουργίας του υλικού μέρους του συστήματος.

Ως **κρίσιμο** δομικό στοιχείο συστήματος (υποσύστημα, εξάρτημα, κ.λπ.) θεωρείται το στοιχείο του οποίου η αστοχία έχει επιπτώσεις στη λειτουργία του όλου συστήματος, δηλαδή η σύμφωνα με τις προδιαγραφές απόδοσή του είναι κρίσιμης σημασίας για το σύστημα.

Ειδικότερα, στα στρατιωτικά οπλικά συστήματα το υλικό μέρος περιλαμβάνει επιπλέον τις παρακάτω κατηγορίες στοιχείων:

- Τα στοιχεία εγκατάστασης (deployment elements), για την εγκατάσταση και ολοκλήρωση/προσαρμογή των στοιχείων στη λειτουργική τους θέση.
- Τα στοιχεία εκπαίδευσης (training elements), για την εκπαίδευση και εξάσκηση του προσωπικού που χειρίζεται το σύστημα.
- Τα στοιχεία συντήρησης (maintenance elements) και τα στοιχεία υποστήριξης (support elements), για τη εξασφάλιση της λειτουργίας όλου του συστήματος.

Επίσης, το ανθρώπινο μέρος μπορεί να διαχωριστεί στα:

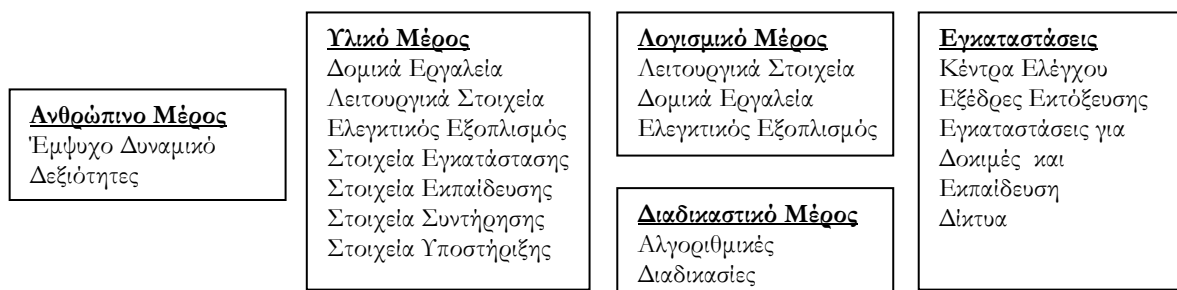
- Στοιχεία του έμφυχου δυναμικού (manpower)
- Στοιχεία δεξιοτήτων (skill levels)

Ακόμη, το διαδικαστικό μέρος περιλαμβάνει τις (αλγοριθμικές) διαδικασίες (procedures) που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή, τη λειτουργία, την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας, την εγκατάσταση, τη συντήρηση του συστήματος, καθώς και την απόρριψη αναλωσίμων υλικών ή εξοπλισμού που δε χρειάζεται πλέον.

Τέλος, οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν:

- Κέντρα ελέγχου (control centers)
- Εξέδρες εκτόξευσης (launch pads)
- Εγκαταστάσεις για δοκιμές και εκπαίδευση (test and training facilities)
- Δίκτυα, που συνδέουν το σύστημα με επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το νερό ή ακόμη και οδικά δίκτυα

ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΟ ΟΠΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

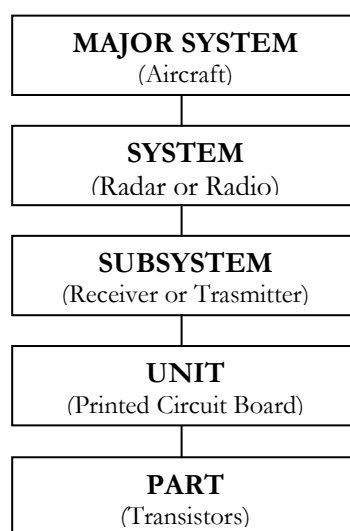


Σχήμα 1. Κύρια μέρη στρατιωτικού οπλικού συστήματος

Έτσι, ως παραδείγματα στρατιωτικών συστημάτων μπορούν να αναφερθούν:

- Τα οπλικά συστήματα που εφαρμόζονται στη μάχη
- Τα συστήματα επιχειρησιακής υποστήριξης που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο, την αξιολόγηση και το χαρακτηρισμό της υπάρχουσας απειλής εντός ενός περιβάλλοντος, μέσα στο οποίο οι δυνάμεις και ο εξοπλισμός τους πρέπει να επιχειρήσουν.

Ένα **σύνθετο σύστημα** (major system) αποτελείται από επιμέρους συστήματα (systems), υποσυστήματα (subsystems), μονάδες - στοιχεία (units) και μέρη - εξαρτήματα (parts), όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Τα οπλικά συστήματα (Ο.Σ) είναι συνήθως σύνθετα συστήματα, διότι αποτελούν σύνθεση πολυάριθμων επιμέρους συστημάτων, υποσυστημάτων ή εξαρτημάτων, τα οποία ως ενοποιημένο σύνολο λειτουργούν αποτελεσματικά για την υλοποίηση μιας συγκεκριμένης αποστολής. Ως υποσυστήματα θεωρούνται το μηχανολογικό μέρος αυτού, το υδραυλικό, το ηλεκτρολογικό, το ηλεκτρονικό, το λογισμικό, τα όπλα που φέρει, κ.α. Ως παράδειγμα πολυπλοκότητας σύγχρονου οπλικού συστήματος αποτελεί το μαχητικό αεροσκάφος. Η συνθετότητά του δεν πηγάζει μόνο από το γεγονός ότι αποτελεί συναρμολόγημα επιμέρους υποσυστημάτων, όπως κινητήρας, ηλεκτρονικά, όπλα, κ.α., αλλά ότι ταυτόχρονα αποτελεί ενοποίηση αλληλένδετων οντοτήτων, όπως εξειδικευμένο προσωπικό, χειριστές, τεχνικοί, διεργασίες, συσκευές, εγκαταστάσεις, δηλαδή οντότητες που συνθέτουν ένα συνολικό οπλικό σύστημα για την επιτυχή εκτέλεση της αποστολής του. Στη σχεδίαση και κατασκευή οπλικών συστημάτων χρησιμοποιείται υψηλή τεχνολογία (υψηλό κόστος) και υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την επιτυχή κάλυψη των απαιτήσεων που έχουν τεθεί (Σταμούλης 1, 2017).



Σχήμα 2. Δομή κύριου - σύνθετου συστήματος (Bowles & Bonnell, 1995)

Έτσι, η δεδομένη συνθετότητα - πολυπλοκότητα των οπλικών συστημάτων απαιτεί την εφαρμογή μιας συστηματικής προσέγγισης - μεθοδολογίας ανάπτυξης οπλικών συστημάτων, που περιλαμβάνει δύο επίπεδα: το τεχνικό και το μη τεχνικό επίπεδο. Στο μη τεχνικό επίπεδο ανήκουν διαδικασίες και λειτουργίες, όπως η λήψη αποφάσεων, τεχνικές βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας, οικονομικά κ.α., ενώ το τεχνικό επίπεδο περιλαμβάνει τη σχεδίαση, τη μελέτη, την κατασκευή και την πιστοποίηση - δοκιμή του οπλικού συστήματος. Τα δύο παραπάνω επίπεδα έχουν διακριτές λειτουργίες μεταξύ τους, όμως είναι αλληλένδετα και πρέπει να υπάρχει συντονισμός (Σταμούλης 1, 2017).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ο όρος «δομικό στοιχείο» θα χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει οποιοδήποτε μέρος του κυρίου συστήματος, όπως επιμέρους συστήματα, υποσυστήματα, υποσυγκροτήματα και εξαρτήματα. Η περιστασιακή χρήση του όρου «κατασκευή» υποδηλώνει την έννοια του οπλικού συστήματος.

§2.2 Διαδικασία ανάπτυξης ενός οπλικού συστήματος

Όπως είναι γνωστό, η μηχανική συστημάτων (systems engineering) αποτελεί την εφαρμογή των επιστημών στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων, δηλαδή τον καθορισμό και την οργάνωση των στοιχείων του συστήματος προκειμένου να επιτευχθεί ο προκαθορισμένος σκοπός (απαιτήσεις). Η μηχανική συστημάτων είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μεγάλα και πολύπλοκα συστήματα, όπως τα στρατιωτικά οπλικά συστήματα, τα οποία απαιτούν αυστηρές διαδικασίες για τον έλεγχο και τη διαχείριση του κόστους, χρονοδιαγράμματα και υψηλή τεχνολογία.

Για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία ενός συστήματος και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες μη αναμενόμενης αστοχίας του (δηλαδή αστοχίας πριν παρέλθει ο χρόνος ζωής που δίνεται από τον κατασκευαστή, αφού κανένα σύστημα δε μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει απεριόριστη ωφέλιμη ζωή), ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στα στάδια της σχεδίασης, κατασκευής, δοκιμής - ελέγχου και λειτουργίας του συστήματος.

Κάθε σύστημα είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να επιτελέσει ένα σαφώς προσδιορισμένο έργο. Αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιώντας συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν τη γενική και συνολική εικόνα του συστήματος. Οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να είναι γνωστές στον μηχανικό σχεδίασης, έτσι ώστε να τις εναρμονίσει με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία παραγωγής οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να είναι ξεκάθαρες, τόσο στην ομάδα που χειρίζεται τον προϋπολογισμό, όσο και την ομάδα των κατασκευαστών, προκειμένου να μειώνεται ο κίνδυνος των κατασκευαστικών

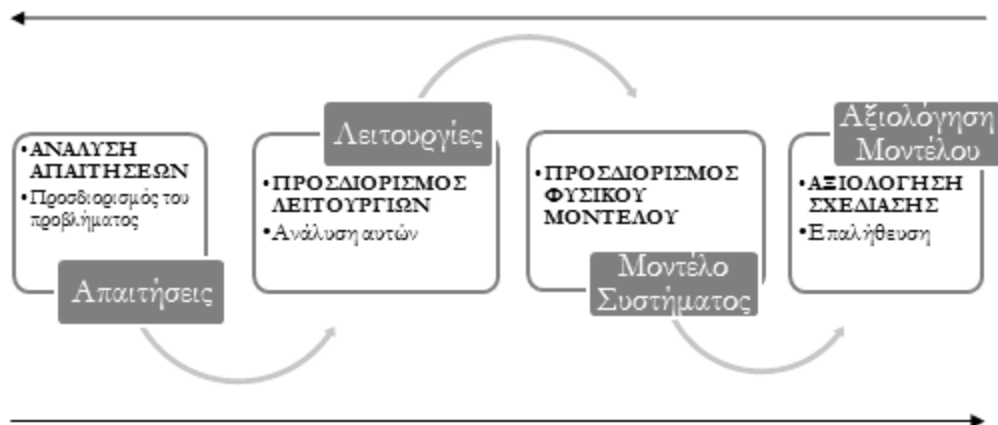
λαθών και προβλημάτων. Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές αιτίες και συνθήκες που μπορούν να οδηγήσουν το υλικό σε αστοχία, ώστε να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά στην περίπτωση εμφάνισής τους.

Επικεντρώνοντας στο τεχνικό επίπεδο της διαδικασίας ανάπτυξης των οπλικών συστημάτων, διαπιστώνεται εύκολα η συνθετότητα και η διεπιστημονικότητα, αφού συνδυάζονται επιμέρους εξειδικευμένες γνώσεις και πρακτικές, ώστε να κατασκευαστούν τα επιμέρους υποσυστήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξίσου σημαντικές με τις διεπιστημονικές γνώσεις, είναι κι οι εμπειρικές πρακτικές και η κρίση του μηχανικού στη σχεδίαση ενός συστήματος. Η τεχνική διαδικασία της ανάπτυξης ενός οπλικού συστήματος είναι μια συλλογική διεργασία, στην οποία συμμετέχει προσωπικό πολυάριθμων και ποικίλων εξειδικεύσεων, όπως μηχανολόγοι μηχανικοί, μεταλλειολόγοι, σχεδιαστές, κατασκευαστές, ηλεκτρολόγοι, ηλεκτρονικοί, μαθηματικοί, φυσικοί, χημικοί, δοκιμαστές, αναλυτές κ.α., οι οποίοι πρέπει να συνεργαστούν αποτελεσματικά, ώστε στο τέλος της διαδικασίας να συγκλίνουν σε ένα σύνολο συγκεκριμένων προδιαγραφών που ικανοποιούν τις δοθείσες απαιτήσεις.

Για παράδειγμα σε ένα σύστημα εκτόξευσης ο μηχανικός επιλέγει τα υλικά, το ωφέλιμο φορτίο, τη διαμόρφωση του πυραύλου και άλλα, σε συνεργασία με άλλους επιστήμονες, όπως σχεδιαστές, φυσικοί κ.α. Επίσης, εξετάζονται και καθορίζονται οι εναλλακτικές επιλογές. Στη συνέχεια αξιολογείται η κάθε μια επιλογή με ανάλυση ή με δοκιμές (αναλυτές). Στο τέλος, υλοποιείται η επιλογή η οποία θα ανταποκρίνεται περισσότερο στο στόχο του σχεδιασμού (απαιτήσεις) και θα εξισορροπεί παράγοντες, όπως το κόστος, τη δυνατότητα παραγωγής και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς (ιδιότητες των υλικών, δυναμικό φορτίο). Ο μηχανικός θα πρέπει να κοινοποιεί με σαφήνεια τη δημιουργία του και το σχέδιο στον κατασκευαστή του συστήματος. Σε αυτό συντελούν έγγραφα που καθορίζουν το σχέδιο όπως (Δάρας, 2014):

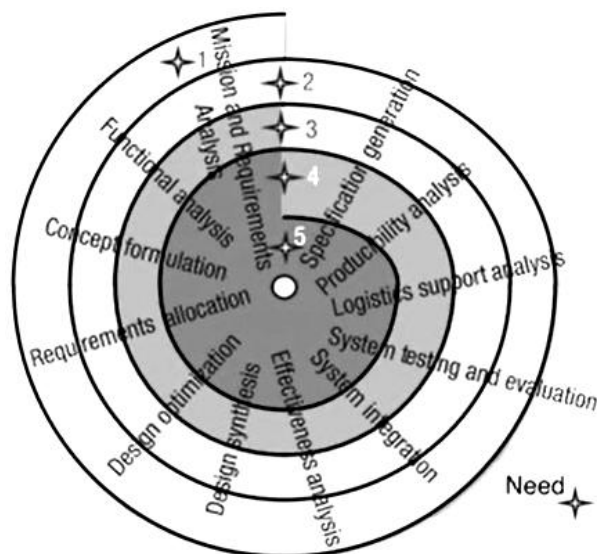
- Σχέδια
- Λίστες εξαρτημάτων
- Οδηγίες κατασκευής (βήμα προς βήμα) για το υλικό ή τα εξαρτήματα
- Διαγράμματα δραστηριοτήτων για το λογισμικό

Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά σε δύο ιδιαίτερα γνωστά μοντέλα ανάπτυξης οπλικών συστημάτων σύμφωνα με τις προσεγγίσεις των προτύπων του Systems Engineering: Το «waterfall model» (μοντέλο «καταρράκτη») και το «spiral model» (μοντέλο «σπιδράλ»). Στο πρώτο μοντέλο (σχήμα 3) η διαδικασία ανάπτυξης αποτελεί μια ακολουθία - ροή της φάσης της ανάλυσης των απαιτήσεων, της σχεδίασης (προσδιορισμός των λειτουργιών και του φυσικού μοντέλου του συστήματος), της τεκμηρίωσης και τέλος της πιστοποίησης - αξιολόγησης του συστήματος. Κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι είναι σειριακό, δηλαδή για να συνεχίσει η διαδικασία στην επόμενη φάση πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη (Σταμούλης 2, 2017), (Σταμούλης 3, 2017).



Σχήμα 3. Waterfall model

Στο «spiral model» η διαδικασία της ανάπτυξης ενός συστήματος δεν είναι γραμμική, αλλά επαναληπτική, δηλαδή επαναλαμβάνεται έως την επίτευξη μιας σύγκλισης σε επιθυμητές προδιαγραφές σχεδίασης (σχήμα 4). Το μοντέλο αυτό βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή σε σύνθετα συστήματα, όπως τα οπλικά συστήματα και εφαρμόζεται σε μεγάλα έργα όπου εμφανίζουν μεγάλο συνήθως ρίσκο (Fielding, 1999).

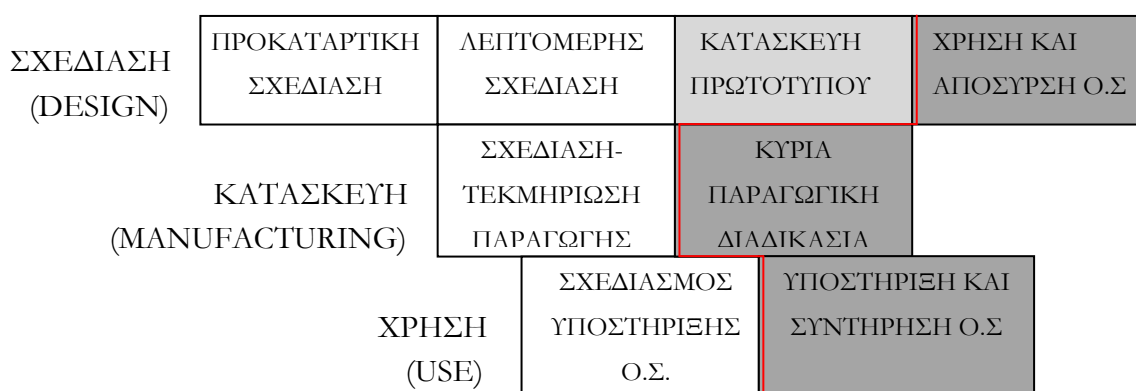


Σχήμα 4. Spiral model

Η σχεδίαση ενός συστήματος αποτελεί μια απαιτητική και επανατροφοδοτούμενη διαδικασία. Αρχικά γίνεται η διαστασιολόγηση της κατασκευής, δηλαδή καθορίζονται τα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων μερών και της συνολικής κατασκευής και στη συνέχεια επιλέγεται το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι το σύστημα είναι πιθανόν να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα μηχανικών φορτίσεων, που ενδεχομένως να επιβαρύνεται από την παρουσία χημικών παραγόντων ή θερμικών φορτίων, από τη συνέργεια επιφανειακών καταπονήσεων ή/και από την επενέργεια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (παράγοντας εξαιρετικά επιβαρυντικός στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολυμερή υλικά). Επίσης, στο στάδιο της σχεδίασης καθορίζονται οι τεχνικές μορφοποίησης και κατεργασίας του υλικού των επιμέρους μερών, καθώς και οι τεχνικές συναρμολόγησής του. Η μελέτη σχεδιασμού συνιστά μέρος του τεχνικού φακέλου ενός συστήματος, ο οποίος αποτελεί αναπόσπαστο τεχνικό εγχειρίδιο που το συνοδεύει σε όλη τη διάρκεια της ζωής του.

Όσον αφορά τη διαδικασία της σχεδίασης, αυτή περιλαμβάνει συνήθως τρεις φάσεις, την Εννοιολογική (Conceptual Design), την Προκαταρκτική (Preliminary Design) και την Λεπτομερή (Detailed Design), όπου στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα πρωτότυπο. Η κάθε φάση μπορεί να ακολουθεί η μία την άλλη, με αλληλοεπικάλυψη προς κέρδος χρόνου ή μπορεί να ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία τύπου «σπирάλ», με ζητούμενο τη σύγκλιση στο στάδιο της λεπτομερούς σχεδίασης. Στην Εννοιολογική Φάση Σχεδίασης σχεδιάζονται τα βασικά μέρη του συστήματος, ενώ στις επόμενες φάσεις, και κυρίως στην Λεπτομερή, υπάρχουν αναλυτικά σχέδια τόσο του συστήματος, όσο και των δομικών στοιχείων αυτού. Η σχεδίαση ενός συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων (Computer - Aided Design, CAD). Τα CAD αποτελούν ψηφιακά περιβάλλοντα, με τα οποία επιτυγχάνονται με ακρίβεια η δημιουργία, η τροποποίηση, η ανάλυση και η βελτιστοποίηση ενός σχεδίου. Έτσι, χρησιμοποιώντας ειδικά εργαλεία μπορεί να καθοριστεί η γεωμετρία του σχεδίου (η αρχιτεκτονική δομή, η διάταξη, το μηχανικό μέρος) και η ανάλυση ανοχών, υπολογισμοί ιδιοτήτων μάζας κ.α. (Σταμούλης 1, 2017).



Σχήμα 5. Ανάπτυξη - χρήση οπλικού συστήματος

Στο σχήμα 5 περιγράφεται ο κύκλος ζωής ενός συστήματος και παρατηρούμε ότι τα στάδια της σχεδίασης, της κατασκευής και της χρήσης αλληλοκαλύπτονται. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, παράλληλα με τη λεπτομερή σχεδίαση του συστήματος πραγματοποιείται και το στάδιο της σχεδίασης και της παραγωγής ή η υποστήριξη κι η συντήρηση του Ο.Σ λαμβάνει χώρα και κατά την κύρια παραγωγική διαδικασία.



Σχήμα 6. Μηχανουργική Κατεργασία

Σχετικά με την μηχανουργική κατεργασία (manufacturing process), μια απλή και τυπική μοντελοποίηση φαίνεται στο σχήμα 6. Στο στάδιο αυτό γίνεται χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού, εργαλείων - συσκευών, πρώτων υλών, συστημάτων ενέργειας, πληροφοριών και ανθρωπίνων πόρων προκειμένου να παραχθεί το τελικό προϊόν. Υπάρχουν και κάποιες απώλειες - παραπροϊόντα, τα οποία είτε επαναχρησιμοποιούνται, είτε δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία. Και στο στάδιο αυτό σημαντική είναι η συμβολή των υπολογιστικών προγραμμάτων Computer - Aided Manufacturing (CAM), δηλαδή η χρήση ψηφιακών περιβαλλόντων που προγραμματίζουν, διαχειρίζονται και ελέγχουν τις διαδικασίες κατασκευής είτε μέσω της άμεσης, είτε της έμμεσης διεπαφής των ψηφιακών περιβαλλόντων με τους πόρους παραγωγής των εγκαταστάσεων.

Τέλος, στην τεχνολογία των ψηφιακών περιβαλλόντων χρησιμοποιείται και η Μηχανική, όπου με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer - Aided Engineering - CAE), καθίσταται εφικτή η ανάλυση ενός υπό μελέτη προϊόντος, μέσω της γεωμετρικής του αναπαράστασης από ένα περιβάλλον CAD. Ένα τέτοιο περιβάλλον επιτρέπει στον σχεδιαστή να εξομοιώσει και να μελετήσει τη συμπεριφορά ενός προϊόντος.

Είναι σαφές ότι οποιαδήποτε απόκλιση, παράβλεψη ή λανθασμένη αξιολόγηση - εκτίμηση σε κάποιο από τα στάδια της σχεδίασης, κατασκευής, δοκιμής και χρήσης ενός οπλικού συστήματος μπορεί να εισάγει παράγοντες ικανούς να οδηγήσουν σε αστοχία σε χρονικό διάστημα μικρότερο από τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής του συστήματος. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη λεπτομερούς ανάλυσης (background reports) της μελέτης σχεδιασμού και των βημάτων υλοποίησης - κατασκευής, καθώς και η συστηματική τήρηση πρωτοκόλλου χρήσης και εργασιών συντήρησης του συστήματος.

§2.3 Σχεδίαση της διάρκειας ζωής των οπλικών συστημάτων ως «life-critical systems»

Κάθε οπλικό σύστημα έχει σχεδιαστεί με τέτοιον τρόπο που να του προσδίδει τη μέγιστη διάρκεια ζωής (design life). Κατά τη διάρκεια του χρονικού αυτού ορίου, ο σχεδιαστής θεωρεί ότι τα εξαρτήματα, τα υποσυστήματα και γενικά όλο το κατασκευαστικό μέρος του οπλικού συστήματος θα λειτουργεί με αξιόπιστο τρόπο. Επιπλέον, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, η τακτική συντήρηση και ο περιοδικός έλεγχος εξασφαλίζουν την επίτευξη του σχεδιαστικού στόχου, που είναι η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Σε αντίθετη περίπτωση, η μη έγκαιρη διάγνωση φθορών και η μη αντικατάσταση συγκεκριμένων εξαρτημάτων μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία, ατύχημα ή απώλεια ζωής. Για τον λόγο αυτό, τα οπλικά συστήματα θεωρούνται «life-critical systems», συστήματα δηλαδή των οποίων η δυσλειτουργία/βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρό τραυματισμό ανθρώπων ή/και θάνατο, ή/και περιβαλλοντική καταστροφή. Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί να έχουν απώλειες μικρότερες από $1 \text{ ζωή}/10^9 \text{ ώρες λειτουργίας}$.

Κρίνεται απαραίτητο να διέπονται από συγκεκριμένες τεχνικές σχεδιασμού που υπαγορεύονται από τη Μηχανική Ασφαλείας (Safety Engineering), με κυριότερες τις εξής (κυρίως για αεροσκάφη) (Γριμπά, 2010) , (Reddick, n.d.), (MIL-STD-1522A, 1984):

- Safe-life design (σχεδίαση ασφαλούς ζωής)
- Fail-safe design (σχεδίαση ασφάλειας υπό αστοχία)
- **Safe-life design (Σχεδίαση ασφαλούς ζωής)**

Η τεχνική αυτή λαμβάνει υπόψη της ως ζωή του εξαρτήματος το χρονικό διάστημα στο οποίο δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης κρίσιμων αστοχιών σε αυτό (design life). Έτσι, πριν τη λήξη του χρόνου αυτού, θεωρείται απαραίτητη η αντικατάσταση του εξαρτήματος, για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, πριν το τέλος της ζωής του εξαρτήματος, είναι πιθανόν να παρατηρηθούν ρωγμές, που μπορεί να οφείλονται σε μικρά σφάλματα κατά την παραγωγή ή κατά τη σχεδίαση (ελαττωματική ανάλυση τάσεων). Έτσι, τυχόν προϋπάρχοντα ελαττώματα στα υλικά ορισμένων δομών μπορεί να εξελιχθούν σε ρωγμές αμέσως αφού τεθεί σε χρήση το σύστημα. Αξίζει να τονισθεί ότι η παραπάνω τεχνική είναι οικονομικά ασύμφορη.

- **Fail-safe design (Σχεδίαση ασφάλειας υπό αστοχία)**

Στην τεχνική «fail-safe» ακόμα και όταν κάποιο εξάρτημα αστοχήσει, η κατασκευή θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει με αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να διαθέτει επαρκή ανοχή σε βλάβη ικανοποιώντας τις εξής απαιτήσεις: πρώτον την απαίτηση ασφαλείας ότι η δομή θα αντέξει το υπολογίσιμο φορτίο παρά την ύπαρξη ρωγμών ή δομικών στοιχείων που έχουν σημειώσει αστοχία, και δεύτερον, η βλάβη να μπορεί να εντοπιστεί πριν καταστεί επικίνδυνη ή ότι δε θα καταστεί ποτέ επικίνδυνη κατά τη διάρκεια της προσδιοριζόμενης διάρκειας ζωής του συστήματος. Δηλαδή, όταν συμβεί αστοχία, θα συμβεί με τον ασφαλέστερο δυνατό τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση εφεδρικών εξαρτημάτων και δευτερευουσών οδών φόρτισης.

Ένα τέτοιο σύστημα έχει την ιδιότητα της περίσσειας ασφαλείας (redundancy), διαθέτει, δηλαδή, εφεδρικά εξαρτήματα - υποσυστημάτα που αυτόματα αντικαθιστούν τα προβληματικά. Είναι όμως πρακτικά αδύνατον όλα τα στοιχεία του συστήματος να είναι σχεδιασμένα με αυτήν τη λογική. Για να αποφασίσει ο σχεδιαστής ποια στοιχεία πρέπει να έχουν ανοχή σε ζημία, πρέπει να υπολογίσει το πόσο κρίσιμα είναι αυτά στη λειτουργία του συστήματος, το πόσο πιθανό είναι να παρουσιάσουν κάποια βλάβη και τέλος, το πόσο υψηλό είναι το κόστος μιας τέτοιας σχεδίασης. Αυτή η τεχνική σχεδιασμού συναντάται σε life-critical systems, όπως σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, αεροσκάφη και οπλικά συστήματα.

Τα συστήματα που είναι σχεδιασμένα με την παραπάνω τεχνική έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Η ύπαρξη εξαρτημάτων - υποσυστημάτων με υψηλή ανοχή σε αστοχία, καθώς και των εφεδρικών τους, αυξάνει τόσο το οικονομικό κόστος, όσο και το μέγεθος και βάρος του συστήματος. Τα εφεδρικά στοιχεία ενίοτε είναι χαμηλότερης αξιοπιστίας από τα πρωτεύοντα, γεγονός που επηρεάζει αθροιστικά την αξιοπιστία του συστήματος. Επιπλέον, η ανοχή σε ένα δομικό στοιχείο μπορεί να εμποδίσει την ανίχνευση βλάβης σε κάποιο άλλο στοιχείο που συνδέεται λειτουργικά με το πρώτο. Είναι επίσης δύσκολο και επικίνδυνο να ελέγξει κανείς αν λειτουργούν σωστά τα εφεδρικά εξαρτήματα, καθώς θα πρέπει να απενεργοποιήσει το αντίστοιχο πρωτεύον, κάτι που στα «life-critical systems» είναι παρακινδυνευμένο. Τέλος, η ανοχή του συστήματος ευνοεί την αναβολή επιδιόρθωσης βλαβών, κάτι που μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε ολική αστοχία.

§2.4 Ανοχή σε ζημιά (Damage tolerance)

Η προσπάθεια βελτίωσης των σχεδιαστικών τεχνικών οδήγησε κατά τη δεκαετία του 1970 στη τεχνική «damage tolerance» (ανοχή σε ζημιά). Η φιλοσοφία της ανοχής σε ζημιά σχετίζεται με «την ικανότητα του κατασκευαστή να προβλέπει τα βασικά χαρακτηριστικά μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής και αξιόπιστα να βρίσκει τις ρωγμές κατά τη λειτουργία του συστήματος» (Γριμπά, 2010), (Goksel, 2013), (Forth et al., 2005).

Damage tolerance είναι η ιδιότητα μιας κατασκευής να διατηρεί την απαιτούμενη αντοχή της στην παρουσία αστοχίας για μια περίοδο χρήσης χωρίς επισκευή. Η τεχνική αυτή επιτρέπει, δηλαδή, σε ένα σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί, ενίοτε με μειωμένη απόδοση, παρά να αποτύχει εντελώς, όταν αστοχήσει κάποιο στοιχείο του (hardware ή software). Έτσι το σύστημα διατηρεί την ακεραιότητά του και τη λειτουργία του, παρά τις παρουσιαζόμενες αστοχίες που ενδεχομένως οφείλονται σε κόπωση, διάβρωση, κατασκευαστικές ατέλειες, ανεπαρκή συντήρηση κ.α. (Everett & Sen, n.d.).

Όσον αφορά τα οπλικά συστήματα και την κατασκευαστική δομή τους, βασικό στοιχείο αυτής της τεχνικής είναι η δημιουργία ενός προγράμματος ανίχνευσης ρωγμών, και γενικά βλαβών, πριν αυτές αποτελέσουν απειλή για όλο το σύστημα και το προσωπικό που το υπηρετεί. Τα συστήματα, δηλαδή, που παράγονται σύμφωνα με αυτήν την τεχνική σχεδίασης έχουν τη δυνατότητα να «ανέχονται» τη ρωγμή ή γενικά κάποια βλάβη, χωρίς κίνδυνο αστοχίας, μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη συντήρηση και την επιδιόρθωση ή αντικατάσταση του υπόψη δομικού στοιχείου. Επιπλέον, η τεχνική αυτή συνυπολογίζει και δομικές ή κατασκευαστικές ατέλειες, δεχόμενη κάποιες αρχικές ρωγμές, κάτι που δεν κάνει η τεχνική «fail-safe». Οι ρωγμές, έτσι, εντοπίζονται πριν φτάσουν στο κρίσιμο σημείο που είναι δυνατό να προκαλέσει αστοχία.

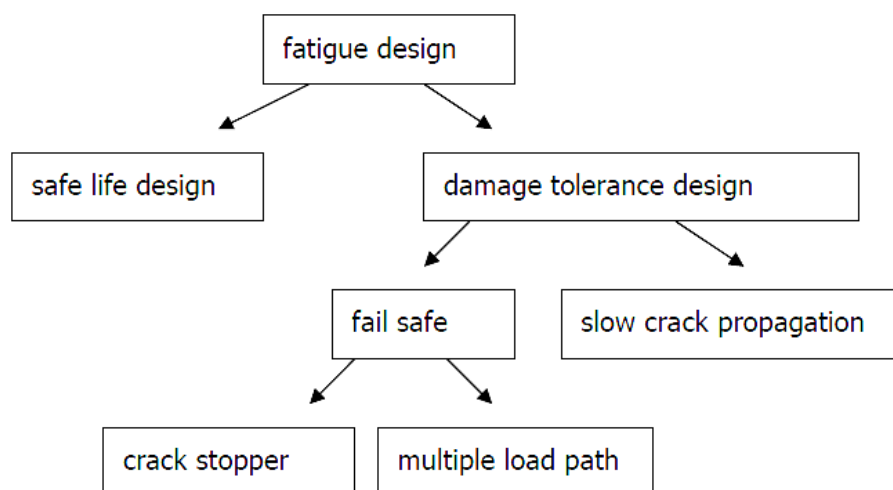
Εκτός του προσδιορισμού του κρίσιμου φορτίου για συγκεκριμένο μέγεθος ρωγμής, απαραίτητη είναι και η κατανόηση, και συνεπώς, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ρωγμής. Κατανοώντας το πως συμπεριφέρεται η ρωγμή και προσδιορίζοντας τον χρόνο που η ρωγμή θα αποδειχτεί κρίσιμη για το σύστημα, και γνωρίζοντας τη διάρκεια ζωής αυτού, μπορεί να καθοριστεί τη συχνότητα της επιθεώρησης, αλλά και τα στάδια αξιολόγησης και επισκευής. Έτσι επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα βελτιστοποιείται η απόδοση και η ασφάλεια αυτού.

Η τεχνική «damage tolerance» μπορεί περαιτέρω να εφαρμοστεί και σε σχεδιαστικές τροποποιήσεις, αλλά και στη διαδικασία επισκευής, χάριν στην ιδιότητα της πρόβλεψης. Επίσης, δεν περιορίζεται μόνο σε βλάβες από κόπωση, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κατασκευαστικές ατέλειες (παραμένουσες τάσεις), ατέλειες που προκαλούνται κατά τη

συναρμολόγηση (σχισμές, εκδορές, χτυπήματα), βλάβες από την χρήση (ρωγμές, ξένα σώματα) κ.α. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη και οι δομικές ατέλειες των υλικών, η ακατάλληλη θερμική και μηχανική κατεργασία κραμάτων κ.α. Έτσι, η τεχνική αυτή εξασφαλίζει ότι όλα τα σημεία ενός στοιχείου του συστήματος πρέπει να είναι σε θέση να αντέξουν τις ρωγμές αυτές (fatigue resistance).

Δύο είναι οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην τεχνική «damage tolerance»: η «βραδεία ανάπτυξη ρωγμών» (slow crack propagation) και η «σχεδίαση ασφάλειας υπό αστοχία» (fail-safe design). Στην πρώτη περίπτωση προσδιορίζονται τα όρια κόπωσης, ώστε η υπάρχουσα ρωγμή να μην προκαλέσει αστοχία κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ο χρόνος στον οποίο κρίνεται απαραίτητη η επιθεώρηση, για λόγους ασφαλείας, έχει προσδιοριστεί ως το ήμισυ της συνολικής διάρκειας ανάπτυξης ρωγμής. Στη «fail-safe design», η βλάβη σε ένα δομικό στοιχείο δεν επηρεάζει όλο το σύστημα, αφού χάρη στην ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών φορτίου (multiple load path) ή/και στοιχείων ανάσχεσης της ρωγμής (crack stoppers), το φορτίο του προβληματικού στοιχείου το επωμίζεται κάποιο παρακείμενο. Αν, όμως, δεν εντοπιστεί και διορθωθεί εγκαίρως η αρχική ρωγμή, ο νέος καταμερισμός φορτίου θα επηρεάσει τη διάρκεια ζωής των υπόλοιπων στοιχείων.

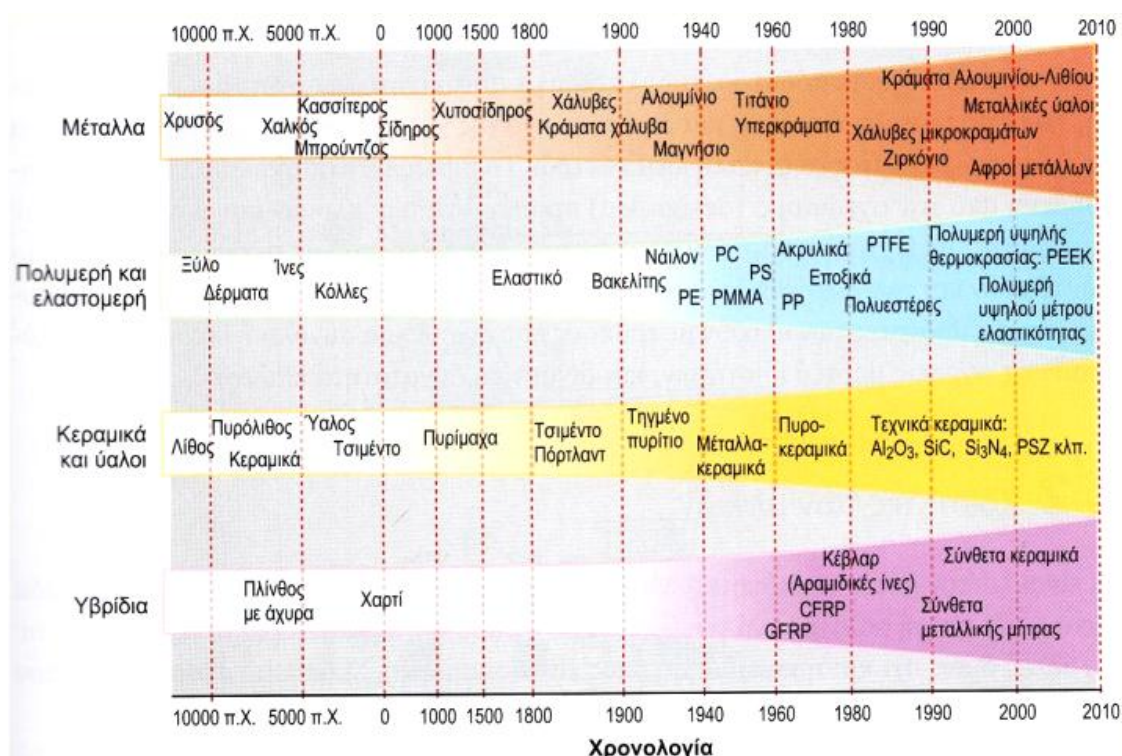
Στο σχήμα 7 παρουσιάζονται σχηματικά οι τρεις τεχνικές σχεδίασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, στην προσπάθεια αντιμετώπισης της κόπωσης των υλικών:



Σχήμα 7. Τεχνικές σχεδίασης συστημάτων για ανοχή στις ρωγμές (Γριμπά, 2010)

§2.5 Κατηγορίες και ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε οπλικά συστήματα

Κατά τη σχεδίαση ενός οπλικού συστήματος απαιτείται η λύση σειράς προβλημάτων σε διάφορους τομείς, όπως αυτοί της δυναμικής, της μηχανικής, της δομικής ανάλυσης κ.α., αλλά πάνω απ' όλα στην επιλογή των καταλληλότερων υλικών. Σήμερα, ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε χιλιάδες διαθέσιμα υλικά, σε αντίθεση με τον μηχανικό του 19^{ου} αιώνα, όπου τα υλικά ήταν περιορισμένα και δεν υπήρχαν σύγχρονα υλικά, όπως τα ελαφρά κράματα, τα σύνθετα και τα πολυμερή. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την πληθώρα των υλικών και τη διάθεση αυτών μέσα στον χρόνο:



Σχήμα 8. Κατηγορίες διαθέσιμων υλικών μέσα στον χρόνο¹

¹

Η επιλογή του καταλληλότερου υλικού² για την κατασκευή ενός δομικού στοιχείου εξαρτάται από μια σειρά λειτουργικών απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιήσει. Πρέπει αρχικά να διευκρινιστούν η λειτουργία που θα επιτελέσει και οι συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο θα λειτουργήσει, καθώς και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία με τα οποία θα αλληλεπιδρά. Στη συνέχεια λαμβάνονται υπόψη οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, οι ιδιότητες της επιφάνειάς του, η σύνθεση και η μικροδομή του. Επιπλέον, ο τρόπος κατασκευής και σύνδεσης των στοιχείων μεταξύ τους, η κατεργασιμότητά του, η επιθυμητή εμφάνιση, το κόστος (υλικού και κατεργασιών), η ευκολία προμήθειας κ.α. είναι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του υλικού. Δεν υπάρχει μοναδικό υλικό κατάλληλο για κάθε εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και επισκευή οπλικών συστημάτων επιλέγεται με βάση την αντοχή τους σε ασκούμενα φορτία, την σκληρότητά τους, σε συνδυασμό με την αντίστασή τους σε διάβρωση και φθορά κ.α (MIL-STD-1522A, 1984).

Όσον αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή οπλικών συστημάτων, χρησιμοποιούνται όλες οι κατηγορίες των σύγχρονων υλικών, με εξαίρεση του οπλισμένου σκυροδέματος. Ωστόσο, οι συνεχείς απαιτήσεις στη βελτίωση των επιδόσεών τους απαιτούν νέα υλικά με μικρότερο ειδικό βάρος και βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά και αντοχή.

Συγκεκριμένα, τα υλικά κατασκευής οπλικών συστημάτων ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες (Σταμούλης 4, n.d.):

- Μεταλλικά (metallic)
- Μη μεταλλικά (composites)

Τα **μεταλλικά**, στη συνέχεια, διακρίνονται σε:

- Σιδηρούχα (ferrous)
- Μη σιδηρούχα (non ferrous)

Στα **μη μεταλλικά** συμπεριλαμβάνονται:

- Τα κεραμικά
- Τα πολυμερή
- Οι ημιαγωγοί
- Τα σύνθετα

Τα **μέταλλα** είναι ανόργανες ουσίες που αποτελούνται από ένα ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία, όπως Fe, Cu, Al, Ni, Zn κλπ. Είναι αδιαφανή στο ορατό φως, καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και της θερμότητας και εμφανίζουν σχετικά υψηλή μηχανική

² <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/9%20EPILOGH%20YLIKWNw.pdf>

αντοχή και πλαστικότητα. Χρησιμοποιούνται συνήθως με τη μορφή κραμάτων (συνδυασμός δύο ή περισσότερων στοιχείων) και όχι μόνα τους, διότι έτσι αυξάνεται η μηχανική αντοχή τους, η αντίστασή τους στη διάβρωση και τη φθορά, καθώς βελτιώνεται και η συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η βασικότερη κατηγοριοποίηση των **σιδηρούχων μεταλλικών υλικών** είναι σε:

- Χάλυβες (Steels)
- Χυτοσίδηροι (Cast Irons)

Ο **χάλυβας** είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Όσον αφορά τη σύνθεσή του, αποτελεί κράμα σιδήρου με μικρή περιεκτικότητα άνθρακα (C) από 0,08% - 2,2%. Όταν η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι μεγαλύτερη από 1%, ο χάλυβας ονομάζεται ανθρακούχος. Η περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του. Γενικά, ο χάλυβας είναι αρκετά ελαστικός, ώστε να αντέχει φορτίσεις πέραν του ορίου διαρροής του (σημείο όπου η τάση εμφανίζει για πρώτη φορά αξιοσημείωτη αύξηση, ενώ η αντίστοιχη επιμήκυνση παραμένει σταθερή) μέχρι την τελική του αστοχία.

Επιπλέον, υπάρχουν και τα **χαλυβοκράματα**, που δημιουργούνται με την πρόσμιξη επιπρόσθετων στοιχείων στον χάλυβα, όπως νικέλιο (Ni), μαγνήσιο (Mg), πυρίτιο (Si), χρώμιο (Cr), φώσφορο (P), μολυβδαίνιο (Mo), βανάδιο (V), τιτάνιο (Ti), κοβάλτιο (Co), κ.λπ. και εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά έναντι του χάλυβα. Κάθε δευτερεύον στοιχείο πρόσμιξης προσδίδει στο χαλυβόκρμα συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως αλλαγή της σκληρότητας και της αντοχής, αντοχή σε κόπωση και θερμοκρασία κ.λπ.



Σχήμα 9. Φωτογραφική απεικόνιση διαφόρων μεταλλικών υλικών

Συνοπτικά, αναφέρονται οι δύο κύριες κατηγορίες χαλυβοκραμάτων ως προς τη σύστασή τους:

- **Κοινοί (Ανθρακούχοι):**
 - Μαλακοί (ποσοστό άνθρακα 0,1% - 0,3%)
 - Μετρίου άνθρακα (ποσοστό άνθρακα 0,3% - 0,5%)
 - Υψηλού άνθρακα (ποσοστό άνθρακα μεγαλύτερο του 0,5%)
- **Ειδικοί (Κραματωμένοι, εμπεριέχουν και άλλα στοιχεία εκτός του άνθρακα):**
 - Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες (ποσοστό κραματικών στοιχείων: <2%)
 - Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες (ποσοστό κραματικών στοιχείων: 2% - 10%)
 - Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες (ποσοστό κραματικών στοιχείων: >10%)

Οι κυριότερες κατηγορίες χαλυβοκραμάτων ως προς τη χρήση τους είναι:

- **Κατασκευών (Ni - Cr - Mo)**, με σημαντικές εφαρμογές στην κατασκευή οπλικών συστημάτων, όπως το σύστημα προσγείωσης των μαχητικών αεροσκαφών.
- **Εργαλειοχάλυβες** (δυσθραυστοι, ανθεκτικοί σε τριβή, αντοχή σε φθορά), όπου περιέχουν, ως προσθήκες, ενώσεις του άνθρακα (καρβίδια) και χρησιμοποιούνται κυρίως για κατασκευή κοπτικών εργαλείων ή καλουπιών.
- **Ανοξείδωτοι** (πυρίμαχοι), με κύριο στοιχείο πρόσμιξης το χρώμιο, όπου εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή οχημάτων και αεροχημάτων.

Οι μη-ανοξείδωτοι χάλυβες είναι επιρρεπείς στη διάβρωση, οπότε χρησιμοποιούνται χημικές ή ηλεκτροχημικές τεχνικές για την επιφανειακή προστασία τους. Οι τεχνικές αυτές συνίστανται είτε σε εμβάπτιση του χάλυβα σε λουτρό τήγματος του μετάλλου επικάλυψης σε υψηλή θερμοκρασία είτε σε ηλεκτρολυτική απόθεση του υλικού πάνω στον χάλυβα. Οι κυριότερες μέθοδοι προστατευτικής επικάλυψης των μη-ανοξείδωτων χαλύβων είναι οι εξής:

- Επικαδμίωση (Cadmium Plating)
- Σκληρή Επιχρωμίωση (Hard Chromium)
- Επινικέλωση (Nickel Plating)

Η επιφάνεια των υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά αυτών, καθώς δέχεται την άμεση επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος και των μηχανικών καταπονήσεων, και έτσι επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του υλικού σε κόπωση και σε φθορά. Οι κυριότερες μέθοδοι επιφανειακής σκλήρυνσης (case hardening), συνίστανται σε θερμοχημικές κατεργασίες εμποτισμού, δηλαδή εμπλουτισμού μέσω μηχανισμών διάχυσης σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Η επιφανειακή σκλήρυνση αφορά κυρίως ελαφρώς κραματωμένους χάλυβες και οι κυριότερες μέθοδοι πραγματοποίησης είναι οι εξής:

- Ενανθράκωση (Carburising)
- Εναζώτωση (Nitriding)

Οι μηχανικές ιδιότητες αντοχής των χαλυβοκραμάτων είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές των κραμάτων αλουμινίου και εξαρτώνται πάρα πολύ από την τελική θερμική κατεργασία τους.

Ο **χυτοσίδηρος** περιέχει συνήθως 2% έως 5% περίπου άνθρακα και μικρή ποσότητα πυριτίου. Αποτελεί μια ταπεινότερη μορφή κράματος σιδήρου - άνθρακα και είναι γνωστός συνήθως με την ονομασία «μαντέμι». Θεωρείται φτηνό υλικό και μορφοποιείται αποκλειστικά και μόνο με χύτευση, δεδομένου ότι η πλαστική του παραμόρφωση είναι πρακτικά αδύνατη. Γι' αυτό, οι εφαρμογές του περιορίζονται σε κατασκευές αντικειμένων με χαμηλές λειτουργικές απαιτήσεις όπου απαιτούνται σκληρότητα και πορώδης επιφάνεια, όπως κύρια εξαρτήματα εργαλειομηχανών - εξοπλισμού. Εξαιρέση αποτελεί η οικογένεια των ελατών χυτοσιδήρων σφαιροειδούς γραφίτη, όπου εμφανίζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά ολκιμότητας και δυσθραυστότητας και χρησιμοποιούνται για κατασκευές εξαρτημάτων κινήτρων, όπως κυλινδρων και άλλων μηχανικών εξαρτημάτων, όπως αντλιών, γραναζιών, δακτυλίων εμβόλων και οδηγών βαλβίδων.

Γενικά, οι χυτοσίδηροι παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χαμηλό κόστος παραγωγής
- Χαμηλό σημείο τήξης (1140-1200°C)
- Ευκολία χύτευσης σε συγκεκριμένες διαστάσεις
- Σχετικά καλή αντίσταση στη μηχανική φθορά και τη διάβρωση
- Υψηλή ικανότητα απορρόφησης κραδασμών
- Σχετικά καλή μηχανική αντοχή (108-340 MPa)

Με τον όρο «**μη σιδηρούχα μέταλλα**» εννοούνται όλα τα μέταλλα και κράματα που δεν περιέχουν ως βασικό στοιχείο το σίδηρο. Οι βασικότερες κατηγορίες των μη σιδηρούχων μεταλλικών υλικών με εφαρμογές σε οπλικά συστήματα είναι οι εξής:

- **Ελαφρά Κράματα** (μέταλλα με χαμηλή πυκνότητα)
 - Κράματα Αλουμινίου (Αργιλίου)
 - Κράματα Τιτανίου
- **Υπερκράματα** (Κράματα Νικελίου)

Κράματα Αλουμινίου (Al)

Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι ελαφρύ, λευκό, γυαλιστερό, ελατό με μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση, αλλά μικρή αντοχή.

Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al:

- Ελατότητα και πολύ καλή κατεργασιμότητα
- Καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και δεν είναι μαγνητικά υλικά.
- Αντοχή σε εφελκυσμό, που προσεγγίζει τις τιμές των χαλυβοκραμάτων με κατάλληλη θερμική κατεργασία.
- Αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση
- Χαμηλό κόστος και ειδικό βάρος, περίπου 1/3 του χάλυβα, που τα καθιστά κατάλληλα για αεροναυπηγικές εφαρμογές.

Τα κύρια μειονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου είναι το σχετικό μικρό όριο αντοχής στη θερμοκρασία (περίπου 120 °C) και η μικρή αιχαμψία. Επιπλέον, εμφανίζουν μικρή σχετική αντίσταση σε διάβρωση, η οποία αντιμετωπίζεται με εξωτερική επίστρωση (Cladding - Alclad covering).

Τα κράματα αλουμινίου με χαλκό, πυρίτιο, μαγνήσιο, μαγγάνιο και χρώμιο αποτελούν τα κλασικά υλικά των αεροπορικών κατασκευών και γενικά των περισσοτέρων οπλικών συστημάτων. Η κατασκευή της πλειοψηφίας των δομικών στοιχείων των σύγχρονων αεροσκαφών (δοκοί, πλαίσια, νευρώσεις, πτερύγια, άτρακτοι κ.λπ.) υλοποιείται με κράματα Al (κυρίως τύπου 2XXX και 7XXX, όπως τα κράματα 2024, 2019, 7075 και 7079). Μετά το έτος 2000 άρχισαν να χρησιμοποιούνται και κράματα αλουμινίου τύπου 8XXX, τα οποία εμφανίζουν αυξημένη μηχανική αντοχή κατά 10-20% έναντι των παραδοσιακών κραμάτων και μείωση του βάρους τους κατά 7-15%.

Κράματα Τιτανίου (Ti)

Εξωτερικά μοιάζουν πολύ με τον ανοξείδωτο χάλυβα και η αναγνώρισή τους μπορεί να γίνει εύκολα από τον άσπρο και λαμπρό σπινθηρισμό που βγαίνει στον τροχό κατά την κατεργασία τους και από τη μαύρη γραμμή που αφήνουν όταν χαράζουν ένα γυαλί. Η διαδικασία παραγωγής, διαμόρφωσης και χρήσης τους εμφανίζει πολλές δυσκολίες, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας τους σε ξένες προσμίξεις.

Η αντοχή τους κυμαίνεται μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των κραμάτων αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα. Είναι 60% περίπου βαρύτερα από τα κράματα αλουμινίου και 50% ελαφρύτερα από τον ανοξείδωτο χάλυβα. Αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως και τα χαλυβοκράματα.

Εκτεταμένη είναι η χρήση των κραμάτων τιτανίου στην κατασκευή εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρων, αξόνων περιστροφής κ.α. Ενδεικτικά, το κράμα Ti αποτελεί κύρια πρώτη ύλη (ποσοστό > 85%) στην κατασκευή του αμερικανικού μαχητικού αεροσκάφους SR-71 Blackbird, λόγω της αντίστασής του στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται

κατά την πτήση του. Το κόστος των κραμάτων τιτανίου είναι πέντε έως δέκα φορές μεγαλύτερο του κόστους των κραμάτων αλουμινίου.

Υπερκρατά νικελίου (Ni)

Χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή οπλικών συστημάτων που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως και τα κράματα Ti. Εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, έως και 1200 °C και αυξημένη αντιδιαβρωτική ικανότητα σε οξειδωτικές συνθήκες. Κυρίως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομικών στοιχείων και εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρων, όπως δίσκων, πτερυγίων και αξόνων, στα οποία αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως στα οπλικά συστήματα χρησιμοποιούνται τα υπερκρατά Ni των οικογενειών Hastelloy X (σύσταση σε Ni 50%), Inconel 600 (σύσταση σε Ni περίπου 40%) και Nimonic 75-115 (σύσταση σε Ni μεγαλύτερη του 55%). Τα παραπάνω υπερκρατά Ni εκτός από την υψηλή αντοχή στη θερμότητα, εμφανίζουν υψηλή ικανότητα διαμορφωσιμότητας και συγκολλησιμότητας, ιδιότητες που τα καθιστούν ιδανικά ως πρώτη ύλη για κατασκευή θαλάμων καύσεων.

Χαλκός και Κράματα Χαλκού

Ο χαλκός έχει κόκκινη απόχρωση, τη μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα μετά τον άργυρο, αλλά πολύ αυξημένο ειδικό βάρος και για το λόγο αυτό δεν έχει αεροπορικές εφαρμογές. Τα κράματα χαλκού με βηρύλλιο είναι τα πιο διαδεδομένα. Η αντοχή τους σε κόπωση και επιφανειακές καταπονήσεις τα καθιστούν κατάλληλα για την κατασκευή τριβείων ακριβείας, διαφραγμάτων σε όργανα κ.α. Ο ορείχαλκος (μπρούντζος) είναι κράμα χαλκού με προσμίξεις ψευδαργύρου, αλουμινίου, σιδήρου, μολύβδου κ.α. Το κράμα χαλκού Muntz περιέχει 60% χαλκό και 40% ψευδάργυρο και χρησιμοποιείται για την κατασκευή βλήτρων, περικοχλίων και υλικών που έρχονται σε επαφή με θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον.

Μη μεταλλικά υλικά

Ως **κεραμικό** υλικό θεωρείται κάθε ανόργανο μη μεταλλικό υλικό, το οποίο έχει υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C) είτε κατά το στάδιο της κατασκευής του, είτε κατά το στάδιο της εφαρμογής του. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως κινητήρες, εξατμίσεις, μπουζί αυτοκινήτων κ.λπ. Παρακάτω παρατίθενται κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κεραμικών υλικών σε σύγκριση με τα μεταλλικά³:

³ http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/B1_Keramika_1.pdf

Πλεονεκτήματα:

- Σχετικά χαμηλή πυκνότητα (πιο ελαφριά)
- Υψηλό σημείο τήξης (μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών υψηλής θερμοκρασίας)
- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας (πιο στιβαρά)
- Χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα (μονωτές)
- Καλή αντίσταση σε θλίψη (πιο ανθεκτικά)
- Πολύ υψηλή σκληρότητα (πιο ανθεκτικά σε φθορά)
- Ανώτερη πυρίμαχη αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά, ως συνδυασμός των ανωτέρω ιδιοτήτων

Μειονεκτήματα:

- Μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό (ψαθυρή συμπεριφορά)
- Ευθραυστότητα
- Εύκολη διάδοση ρωγμών
- Μεγάλη επίδραση μικροδομής και πορώδους στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες
- Συνήθως υψηλό κόστος παραγωγής

Υπάρχουν οι ακόλουθες κατηγορίες κεραμικών υλικών:

- Παραδοσιακά υλικά
- Προηγμένα κεραμικά
- Γυαλιά
- Ορυκτά κεραμικά
- Τσιμέντο

Τα **προηγμένα κεραμικά υλικά** είναι υλικά αυξημένων απαιτήσεων και ειδικών προδιαγραφών και έχουν εφαρμογή σε οπλικά συστήματα. Είναι κυρίως οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια και βορίδια, που συνδυάζουν μοναδικές ιδιότητες, όπως εξαιρετική μηχανική αντοχή, μεγάλη σκληρότητα, μοναδικές μαγνητικές, οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες που διατηρούνται σε υψηλή θερμοκρασία, θερμομονωτικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς κ.α. Μπορούμε να τα ταξινομήσουμε σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- Προηγμένα δομικά κεραμικά
- Ηλεκτρονικά κεραμικά
- Κεραμικές επικαλύψεις
- Σύνθετα κεραμικά υλικά

Με προηγμένα δομικά κεραμικά κατασκευάζονται εξαρτήματα μηχανών, βαλβίδες, κοπτικά εργαλεία, αντιτριβικά εξαρτήματα, εναλλάκτες θερμότητας κ.λπ., υλικά που συνήθως υφίστανται έντονη μηχανική καταπόνηση και ταυτόχρονη θερμική φόρτιση.

Τα ηλεκτρονικά κεραμικά χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές και ηλεκτρομηχανικές εφαρμογές, όπως μονωτές, υλικά υποστρωμάτων, στοιχεία για ολοκληρωμένα κυκλώματα, πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, υπεραγώγιμα κεραμικά κ.α.

Οι κεραμικές επικαλύψεις έχουν θεωρηθεί ως η λύση εκεί που τα δομικά κεραμικά αποτυγχάνουν και περιλαμβάνουν θερμικές επικαλύψεις και εναποθέσεις με χημικές ή φυσικές μεθόδους και δέσμες ιόντων.

Τα σύνθετα κεραμικά υλικά, που αποτελούν τον πιο πρόσφατα αναπτυγμένο τύπο κεραμικών, χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων δομών, κατάλληλων για υψηλής θερμοκρασίας βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Ως **πολυμερή** θεωρούνται τα **πλαστικά** και τα **ελαστικά** υλικά. Αποτελούν ενώσεις του άνθρακα με το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο και άλλα μη μεταλλικά στοιχεία. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους είναι ότι έχουν χαμηλή πυκνότητα και εμφανίζουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Το κόστος τους είναι συνήθως χαμηλό και γι' αυτό αντικαθιστούν πολλές φορές σε αρκετές εφαρμογές τα μεταλλικά υλικά και το γυαλί.

Τα **πλαστικά** χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου εφαρμόζονται μικρές τάσεις, απαιτείται καλή οπτική και χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα διαφανή πλαστικά χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα για την κατασκευή αλεξηνέμων, καλυπτρών και παρόμοιων διαφανών επιφανειών. Διακρίνονται σε θερμοπλαστικά και θερμοστατικά ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στη θέρμανση.

- **Θερμοπλαστικά Υλικά**

Έχουν την ιδιότητα να μαλακώνουν όταν θερμαίνονται και να σκληραίνουν όταν ψύχονται. Είναι ευκόλοχρηστα, έχουν χαμηλό κόστος και χρησιμοποιούνται στον εξοπλισμό του χώρου επιβατών και διακυβέρνησης του αεροσκάφους ή οχημάτων, καθώς και στους πίνακες οργάνων.

- **Θερμοστατικά Υλικά**

Έχουν την ιδιότητα να σκληραίνουν μετά τη θέρμανσή τους και να μην επηρεάζονται από μετέπειτα αναθερμάνσεις. Ένα από τα μειονεκτήματά τους είναι ότι αλλοιώνονται, όταν θερμαίνονται και δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

Τα **ελαστικά** χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα για την στεγανοποίησή τους και ειδικά για την αποφυγή εισόδου ακαθαρσιών και νερού στα διάφορα συστήματα, την αποφυγή διαρροής υγρών και αερίων, την απόσβεση κραδασμών και τη μείωση του θορύβου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σωλήνων καυσίμου, λαδιού, εσωτερικών

επενδύσεων δεξαμενών καυσίμου, εδράνων αντλιών, αεροθαλάμων, σε πλαίσια παραθύρων ως στεγανοποιητικά και σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές ως μονωτικά. Διακρίνονται σε:

- **Φυσικά Ελαστικά:** σε σύγκριση με τα συνθετικά ελαστικά εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, ευκαμψία κ.λπ. Έχουν περιορισμένη χρήση στα οπλικά συστήματα επειδή διαβρώνονται εύκολα σε επαφή με καύσιμα και λιπαντικά.
- **Συνθετικά Ελαστικά:** υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία συνθετικών ελαστικών, ικανά να ικανοποιούν πολλές απαιτήσεις κατά την κατασκευή ενός οπλικού συστήματος. Τα πιο γνωστά είναι το βουτύλιο, τα μπόουνα S, N, το νεοπρένιο και τα ελαστικά σιλικόνης.

Τα στέρεα υλικά με βάση την ευκολία που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα διακρίνονται σε αγωγοί, ημιαγωγοί και μονωτές. Οι **ημιαγωγοί** (πυρίτιο, γερμάνιο) επιτρέπουν τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος κάτω από ορισμένες συνθήκες. Τα τρανζίστορ, οι δίοδοι, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (microchips) είναι διατάξεις ημιαγωγών.

Ως **σύνθετο υλικό** χαρακτηρίζεται το υλικό το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη (φάσεις), που έχουν διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ τους. Τα διακριτά αυτά μέρη μπορεί να προέρχονται από τις κατηγορίες των μετάλλων, των κεραμικών ή των πλαστικών υλικών. Το σύνθετο υλικό που δημιουργείται έχει διαφορετικές και σε μερικές περιπτώσεις μοναδικές ιδιότητες, συγκρινόμενο με τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών.



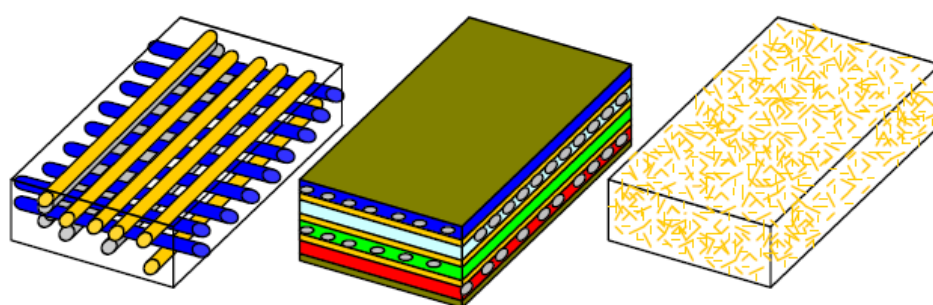
Σχήμα 10. Συνδυασμοί επιμέρους κατηγοριών υλικών σε σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από μία μήτρα και ένα ή περισσότερα ενισχυτικά υλικά (σχήμα 10). Ο συνδυασμός του υλικού της μήτρας με τα ενισχυτικά υλικά είναι αυτός που προσδίδει βελτιωμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Τα ενισχυτικά υλικά ή «οπλισμός» προσδίδουν μεγάλη αντοχή και ελαστικότητα, παραλαμβάνουν τις δυνάμεις και εμποδίζουν

τη διάδοση ρωγμών. Η μήτρα συγκρατεί τον οπλισμό στη θέση του, παρέχει την απαραίτητη ευκαμψία και τον προστατεύει από εξωτερικές επιδράσεις.

Ανάλογα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ινώδη σύνθετα υλικά** (fiber composites): Με ενίσχυση ινών, εμποτισμένων σε υλικό μήτρας. Έχουν ευρύτατη εφαρμογή στα αεροσκάφη.
- **Σύνθετα υλικά πολλών στρωμάτων** (laminated composites): Αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις υλικών.
- **Κοκκώδη σύνθετα υλικά** (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων (νηματίων), διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.



α) Ινώδη σύνθετα υλικά β) Σύνθετα υλικά πολλών στρωμάτων γ) Κοκκώδη σύνθετα υλικά

Σχήμα 11. Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά των οπλικών συστημάτων, και κυρίως των αεροσκαφών, είναι ινώδους τύπου, λόγω της αυξημένης αναλογίας αντοχής προς βάρος. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι η επίτευξη της επιθυμητής αντοχής σε συγκεκριμένη διεύθυνση, σε αντίθεση με τα μέταλλα που είναι ισοτροπικά. Σε ναυτικές κατασκευές, η μήτρα συνήθως είναι ρητίνη (πολυεστερική) και σε αεροπορικές κατασκευές, εποξυδική. Το σύνθετο υλικό έχει ως οπλισμό συνήθως:

- Αρωματικό πολυαμίδιο, με την εμπορική ονομασία Kevlar και χρησιμοποιείται συνήθως σε εξαρτήματα με μέση καταπόνηση.
- Ανθρακονήματα (γραφίτης), με μεγάλη αντοχή σε κόπωση και εφαρμογές στην κατασκευή βασικών δομικών στοιχείων, όπως δοκοί και φέρουσες επικαλύψεις.

Τα σύνθετα υλικά πολλαπλών στρώσεων προκύπτουν μετά από συνδυασμό πολλών επιστρώσεων ίδιων ή διαφορετικών σύνθετων υλικών. Ως επίστρωση μπορεί να είναι λεπτό μεταλλικό έλασμα αλουμινίου, χάλυβα κ.λπ. ή σύνθετο υλικό με υαλοϋφασμα, ανθρακονήματα κ.λπ.

Στα κοκκιώδη σύνθετα υλικά ο οπλισμός είναι κόκκοι ή ίνες πολύ μικρού μήκους από διάφορα ενισχυτικά υλικά, όπως αργίλιο, πυρίτιο, λίθιο, πυρίμαχο γυαλί κ.λπ. Κύριο μειονέκτημα τους είναι η αυξημένη δυσκολία παρασκευής τους συγκριτικά με τα υπόλοιπα σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα οπλικά συστήματα, όπως σε μαχητικά αεροσκάφη (κινητήρες, πτερύγια, άτρακτοι), σε βλήματα, πυραύλους, διαστημικές εφαρμογές κ.α. Ενδεικτικά, η χρήση τους στην κατασκευή μαχητικών αεροσκαφών είναι επιβεβλημένη, λόγω μείωσης του βάρους των πτερυγίων κατά 39% και μη διάδοσης, έτσι, πιθανών ρωγμών. Επιπλέον, η μείωση του βάρους προσδίδει στο αεροσκάφος καλύτερη ταχύτητα και ευελιξία, μειώνει την κατανάλωση καυσίμων, ενώ η εύκολη μορφοποίησή τους βοηθάει στην καλύτερη αεροδυναμική σχεδίαση του αεροσκάφους. Έτσι, αντικαθιστούν σταδιακά τα κράματα αλουμινίου, καθώς έχουν βελτιωμένες ιδιότητες.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αστοχία με έναν πιο σύνθετο τρόπο, που εξαρτάται από τη σύνθεση της μήτρας και των ενισχυτικών υλικών, τη φύση της σύνδεσής τους, την κατεύθυνση των ινών, την αλληλουχία των στρωμάτων, την ύπαρξη κενών, το είδος των ασκούμενων φορτίων κ.α. Πιθανοί τρόποι αστοχίας είναι η πρόκληση ρωγμών στην μήτρα, το λύγισμα των ινών, η απόσπαση ή ράγισμα κάποιου στρώματος, η αστοχία στους δεσμούς και η αποστρωματοποίηση. Κάποια από τα ελαττώματα που προκαλούνται κατά την κατασκευή είναι η δημιουργία κενών ή ζωνών με περίσσεια ρητίνη, η μη ευθυγράμμιση ινών, η ύπαρξη περιοχών με ατελή εμποτισμό ινών κ.α.

§2.6 Επεξεργασία - κατεργασία υλικών

Τα υλικά υπόκεινται σε ορισμένες επεξεργασίες - κατεργασίες με σκοπό τη μορφοποίησή τους και τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Τα ακατέργαστα υλικά υφίστανται μια σειρά **πρωτογενών κατεργασιών**, όπως χημική - φυσική κατεργασία, μορφοποίηση μέσω χύτευσης, ψυχρή ή θερμή διαμόρφωση (έλαση, σφυρηλάτηση, κάμψη, απότμηση, ολική κ.α.) ή οποιαδήποτε άλλη ειδική μέθοδο, προκειμένου να λάβουν ένα αρχικό σχήμα και δομή. Στη συνέχεια, λαμβάνουν χώρα **δευτερογενείς κατεργασίες**, όπως μηχανικές, θερμικές, επιφανειακές και συγκολλήσεις, με σκοπό την τροποποίηση του αρχικού σχήματος, τη βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών, την προστασία από το περιβάλλον και τη συναρμολόγηση των επιμέρους δομικών στοιχείων. Οι κατεργασίες - επεξεργασίες που μπορεί να υποστεί ένα υλικό διακρίνονται σε χημικές - φυσικές, θερμικές, μηχανικές, επιφανείας και σύνδεσης (Γιαννάκης, 2013).

Οι **χημικές επεξεργασίες** περιλαμβάνουν κυρίως φυσικές και χημικές διεργασίες κατά τις οποίες γίνεται επεξεργασία της πρώτης ύλης ώστε να παρασκευαστεί το εικάστοτε υλικό. Για παράδειγμα, η εξαγωγή των μετάλλων από τα μεταλλεύματα, όπως είναι η αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου σε σίδηρο στην υψιάμινο για την παραγωγή χυτοσιδήρου και χάλυβα, η ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας (αργίλιο) σε αλουμίνιο ή ο πολυμερισμός.

Οι **θερμικές κατεργασίες** υλικών, κυρίως μετάλλων ή κραμάτων, αποτελούν συνδυασμό θερμάνσεως και αποψύξεως, ώστε αυτά να αποκτήσουν ορισμένη κρυσταλλική δομή και μέγεθος κόκκου, προκειμένου να βελτιώσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Γενικά το μέταλλο ή το κράμα θερμαίνεται σε προκαθορισμένη θερμοκρασία, παραμένει στη θερμοκρασία αυτή για ορισμένο κάθε φορά χρονικό διάστημα και ακολουθεί η απόψυξή του με ορισμένη επίσης ταχύτητα. Η ανόπτηση, η βαφή, η σιλήρυνση με τον χρόνο κ.α. αποτελούν θερμικές κατεργασίες (Πετρόπουλος, 1997).

Η **μηχανικές κατεργασίες** αποτελούν δευτερεύουσες διεργασίες κατά τις οποίες το υλικό υφίσταται κάποιο είδος αφαίρεσης τμήματός του μέσω κοπής, τριβής, τόννευσης, λείανσης, διάτρησης κ.α., προκειμένου να βελτιώσει το σχήμα του.

Οι **επιφανειακές κατεργασίες** αποτελούν διεργασίες κατά τις οποίες μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του δομικού στοιχείου, χωρίς όμως μεταβολή του σχήματός του, με στόχο την ενίσχυση των ιδιοτήτων του, αλλά και την προστασία του έναντι φθοράς, διάβρωσης, οξείδωσης και κόπωσης. Οι κατεργασίες επιφανειών μπορεί να είναι: μηχανικές (λειάνσεις με αμμοβολή, σφαιροβολή), θερμοχημικές ή εμποτισμοί (εναζώτωση, ενανθράκωση κ.α.), θερμικές (φλογοβαφή, επαγωγική βαφή, βαφή με δέσμη laser ή ηλεκτρονίων), επιστρώσεις, όπως ηλεκτρολυτικές (επιχρωμίωση, επινικέλωση), γαλβανισμός, κεραμικές κ.λπ., οργανικές επικαλύψεις κ.α.

Οι **κατεργασίες συναρμολόγησης** έχουν ως στόχο τη σύνδεση δύο ή περισσότερων στοιχείων μεταξύ τους ή τη σύνδεση ενός στοιχείου σε ένα συγκεκριμένο χώρο. Τα στοιχεία αυτά συναρμολογούνται δηλαδή σε υποομάδες - τμήματα με: συγκόλληση - τήξη (μεταλλουργική συνένωση υψηλών θερμοκρασιών, συγκόλληση με λέιζερ), κόλληση (συνένωση με χρήση συγκολλητικών ουσιών), κοχλιοσύνδεση (συναρμολογή με χρήση βιδών) ή ήλωση (συγκράτηση με χρήση καρφιών).

Στο Παράρτημα ΙΓ' παρατίθενται διαγραμματικά τα διάφορα είδη επεξεργασίας - κατεργασίας και συναρμολόγησης των υλικών που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν στο στάδιο της κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βασικές Έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων

Πριν την ανάλυση αστοχίας οπλικών συστημάτων είναι σκόπιμο να οριστούν κάποιες βασικές έννοιες της «Μηχανικής των Θραύσεων». Ο κλάδος αυτός της Μηχανικής, μαζί με την κλασική «Μηχανική των Υλικών» (ή «Αντοχή των Υλικών») αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό των περισσοτέρων δομικών στοιχείων των σύγχρονων οπλικών συστημάτων, προκειμένου αυτά να αντέχουν σε μεγάλα φορτία και να μην αστοχούν.

Τα διάφορα δομικά στοιχεία εμφανίζουν ατέλειες στα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα, έχοντας ως συνέπεια τη συγκέντρωση τάσεων (residual stresses) στα σημεία αυτά και τη δημιουργία μικρορωγμών. Οι ρωγμές αυτές εξελίσσονται με τον χρόνο, αυξάνοντας την πιθανότητα για οριστική αστοχία του δομικού στοιχείου. Αν και έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι και τεχνικές αποφυγής τέτοιων ατελειών, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τα περιστατικά αστοχίας, η εξάλειψη αυτών φαντάζει ακόμα αδύνατη. Ωστόσο, η ανάπτυξη της «Μηχανικής των Θραύσεων» και μιας σειράς «Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών Ελέγχου» έχει επιφέρει αλλαγές, τόσο στον σχεδιασμό των συστημάτων, όσο και την αντιμετώπιση των πιθανών αστοχιών. Ουσιαστικά, οι αλλαγές αυτές αφορούν τη διαλεύκανση του γεγονότος της αστοχίας και την αποτελεσματική αντιμετώπιση των ατελειών σε ένα δομικό στοιχείο. Έτσι σήμερα, επιτρέπονται μόνο μέχρι ενός βαθμού ατέλειες (βλάβες ή ρωγμές) σε ένα δομικό στοιχείο, αρκεί να υφίσταται συνεχής παρακολούθηση αυτού μέσω της συντήρησης και άλλων διαδικασιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η Μηχανική των Θραύσεων έχει βασικά το ίδιο αντικείμενο με αυτό της Αντοχής των Υλικών. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, στη Μηχανική των Θραύσεων το υπό διερεύνηση σώμα εμπεριέχει ρωγμές. Η Μηχανική των Θραύσεων ασχολείται κυρίως με την αναζήτηση των αιτιών δημιουργίας μικρορωγμών, την εξέλιξή τους σε μακρορωγμές και τη διατύπωση θεμελιωδών αρχών που αφορούν τη συμπεριφορά των ρωγμών υπό την επίδραση εξωτερικών καταπονήσεων. Σημαντικό ρόλο κατά την εξέταση της συμπεριφοράς μιας ρωγμής παίζει η κατανόηση των βασικών μηχανισμών θραύσης, ο καθορισμός των κύριων παραμέτρων θραύσης και η ακριβής εκτίμηση των φορτίων λειτουργίας της κατασκευής. Στις περιπτώσεις που τα εξωτερικά φορτία μεταβάλλονται με τον χρόνο, ο κύριος στόχος επικεντρώνεται στον καθορισμό κανόνων πρόβλεψης της διάδοσης των ρωγμών και την εκτίμηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής (Γριμπά, 2010).

§3.1 Αντοχή των υλικών

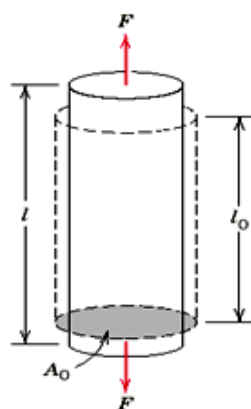
3.1.1 Παραμόρφωση λόγω εφαρμογής φορτίων

Στο στάδιο της κατασκευής ενός συστήματος ο μηχανικός πρέπει να υπολογίσει την αντοχή των δομικών στοιχείων στην άσκηση διαφόρων φορτίων προκειμένου να μην υπάρχει κίνδυνος θραύσης ή παραμόρφωσης κάποιου στοιχείου (Γαλιατσάτος, Λιναρδάτος, & Λιναρδάτος, 2016), (Ψυλλάκη, 2013), (Σοφιανόπουλος, n.d.), (Αποστόλου, 2017).

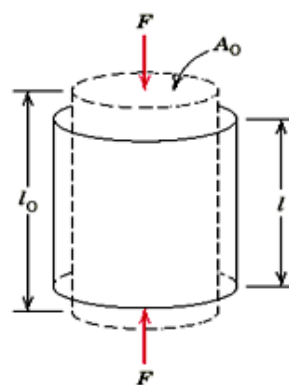
Ως **φορτίο** ορίζεται η δύναμη που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια ή το εσωτερικό του σώματος. Τα φορτία ανάλογα με το αν ασκούνται κατά μόνιμο ή όχι τρόπο διακρίνονται σε σταθερά ή μεταβλητά και ανάλογα με τον χρόνο στον οποίο δρουν σε στατικά, δυναμικά ή κρουστικά. Με κριτήριο τη μεταβολή της θέσης τους διακρίνονται σε ακίνητα ή κινητά και με κριτήριο την ένταση στην οποία ενεργούν σε συγκεντρωτικά και κατανεμημένα.

Ως **τάση** ορίζεται η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσουν τα μόρια ενός σώματος ανά μονάδα επιφάνειάς του, όταν στο σώμα ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις. Οι τάσεις διακρίνονται σε:

- **Ορθές** (σ), δηλαδή που δρουν κάθετα στην επιφάνεια⁴:
 - Εφελκυστικές (εφελκυσμός)
 - Θλιπτικές (θλίψη)
- **Διατμητικές** (τ), δηλαδή που δρουν εφαπτομενικά στην επιφάνεια.

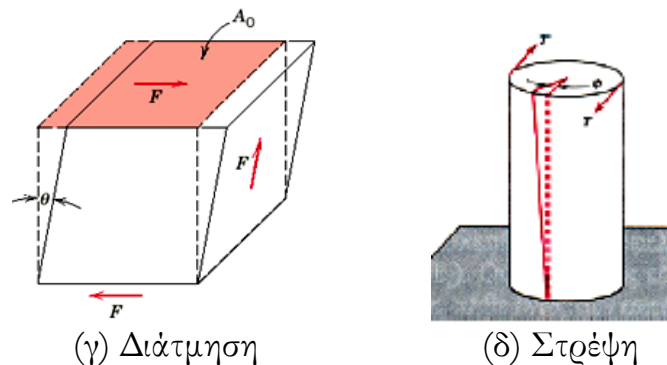


(α) Εφελκυσμός



(β) Θλίψη

⁴ Βλ. Τυπολόγιο Παραρτήματος «ΙΒ».



Σχήμα 12. Συνήθειες απλές μηχανικές φορτίσεις υλικών στοιχειώδους όγκου

Αποτέλεσμα των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα υλικό είναι η μεταβολή των διαστάσεών του, δηλαδή η ανάπτυξη **παραμορφώσεων** που διακρίνονται σε:

- Ορθές παραμορφώσεις (ϵ)
- Διατμητικές παραμορφώσεις (γ)

Ανάλογα του αποτελέσματος που επιφέρουν στο υλικό, οι παραμορφώσεις διακρίνονται σε:

- **Ελαστικές παραμορφώσεις**, όταν το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις με την παύση άσκησης του φορτίου σε αυτό.
- **Πλαστικές παραμορφώσεις**, στην αντίθετη περίπτωση.

Ο βαθμός παραμορφώσεως ενός σώματος εξαρτάται από:

- Το είδος του υλικού του σώματος
- Τις διαστάσεις του σώματος
- Το μέγεθος των εφαρμοζόμενων φορτίων
- Το μέγεθος της διατομής - επιφάνειας άσκησης των φορτίων
- Τον προσανατολισμό της διατομής σε σχέση με τη διεύθυνση του φορτίου
- Τον τρόπο στήριξης - σύνδεσης
- Το μέγεθος της θερμοκρασιακής μεταβολής

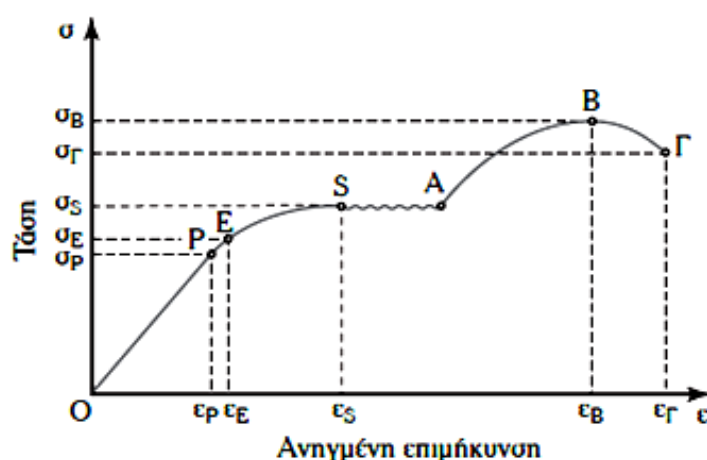
Όταν οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε ένα υλικό είναι μικρές και ευρίσκονται εντός ορισμένων ορίων, τότε είναι ανάλογες με τις αντίστοιχες τάσεις (γραμμική ελαστικότητα). Για την περίπτωση των ορθών τάσεων (εφελκυσμός - θλίψη), η παραπάνω αναλογία εκφράζεται από το **νόμο του Hooke**.⁵

⁵ Βλ. Τυπολόγιο Παραρτήματος «ΙΒ».

Το **μέτρο ελαστικότητας E** (μέτρο του Young) αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών στην περίπτωση ομοιογενών (ίδιες ιδιότητες σε κάθε σημείο) και ισότροπων (ίδιες ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση) υλικών. Τα ανισότροπα υλικά χαρακτηρίζονται από περισσότερες από 2 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές. Το μέτρο ελαστικότητας E αποτελεί μέτρο για την ακαμψία του υλικού, δηλαδή όσο πιο μεγάλο είναι, τόσο πιο στιβαρό είναι το υλικό. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέτρο ελαστικότητας και άρα το θερμαινόμενο υλικό επιδέχεται ευκολότερα μεγαλύτερη παραμόρφωση (με μικρότερη τάση).

Ως **εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση**⁶ (ϵ_g) ορίζουμε το πηλίκο της μεταβολής της διαστάσεως της διατομής του σώματος στο οποίο ασκείται εφελκυσμό προς την αρχική διάσταση της διατομής (αδιάστατο μέγεθος). Κατά όμοιο τρόπο και για τη θλίψη.

Επιπλέον, ορίζουμε ως **συντελεστή εγκάρσιας παραμορφώσεως** (μ) τον αντίθετο λόγο της εγκάρσιας ανηγμένης παραμόρφωσης προς την ανηγμένη επιμήκυνση (επιβράχυνση στην περίπτωση της θλίψεως). Ο συντελεστής αυτός είναι γνωστός και ως **λόγος Poisson**⁷ και χρησιμοποιείται ως μέγεθος που περιγράφει και τα δύο φαινόμενα. Το πρόσημο (-) χρησιμοποιείται προκειμένου ο λόγος Poisson να έχει πάντοτε θετικό πρόσημο, αφού οι ποσότητες (ϵ) και (ϵ_g) είναι πάντοτε ετερόσημες. Ο λόγος Poisson είναι χαρακτηριστική σταθερά για κάθε υλικό και είναι ίδιος για εφελκυσμό και θλίψη. Για διάφορα υλικά κυμαίνεται μεταξύ 0,25 και 0,35 π.χ. για τους χάλυβες είναι 0,30. Τέλος, ορίζουμε ως (m) τον αντίστροφο του λόγου Poisson και καλείται **σταθερά του Poisson**.



Σχήμα 13. Διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα

⁶ Βλ. Τυπολόγιο Παραρτήματος «IB».

⁷ Βλ. Τυπολόγιο Παραρτήματος «IB».

Στο διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Τμήμα OP (περιοχή αναλογίας): ισχύει ο νόμος του Hooke⁸, δηλαδή η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης και η παραμόρφωση είναι προσωρινή. Η τάση που αντιστοιχεί στο P (σ_P) ονομάζεται **όριο αναλογίας**.
- Τμήμα PE (περιοχή αναλογίας): η παραμόρφωση δεν είναι ανάλογη της τάσης και η παραμόρφωση είναι προσωρινή. Η τάση που αντιστοιχεί στο E (σ_E) ονομάζεται **όριο ελαστικότητας**.
- Τμήμα OE (ελαστική περιοχή): προσωρινή παραμόρφωση.
- Τμήμα ES: μόνιμη παραμόρφωση. Η τάση που αντιστοιχεί στο S (σ_S) ονομάζεται **όριο διαρροής** (yield stress), δηλαδή η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό προκαλώντας μόνιμες παραμορφώσεις.
- Τμήμα SA (περιοχή διαρροής): η παραμόρφωση αυξάνεται χωρίς να αυξάνεται η τάση. Υπάρχουν υλικά που δεν έχουν περιοχή διαρροής, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο.
- Τμήμα ABΓ (καμπύλη κρατύνσεως): από το σημείο A και μετά η παραμόρφωση αυξάνεται πολύ σε μικρή αύξηση της τάσης. Το υλικό στο τμήμα αυτό ανακτά την αντοχή του και παρουσιάζει αύξηση της αντοχής του.
- Η τάση αποκτά τη μέγιστη τιμή της στο σημείο B που ονομάζεται **όριο θραύσης** (tensile stress) (σ_B) λίγο πριν τη θραύση στο σημείο Γ, όπου η τάση ονομάζεται **τάση θραύσης**. Η ανηγμένη επιμήκυνση (ϵ_F) ονομάζεται **παραμόρφωση θραύσεως**, δηλαδή η μόνιμη παραμόρφωση που παρατηρείται στο υλικό μετά τη θραύση του.
- Τμήμα ΕΓ: καλείται πλαστική περιοχή.

3.1.2 Θραύση - ολκιμότητα - δυσθραυστότητα - σκληρότητα

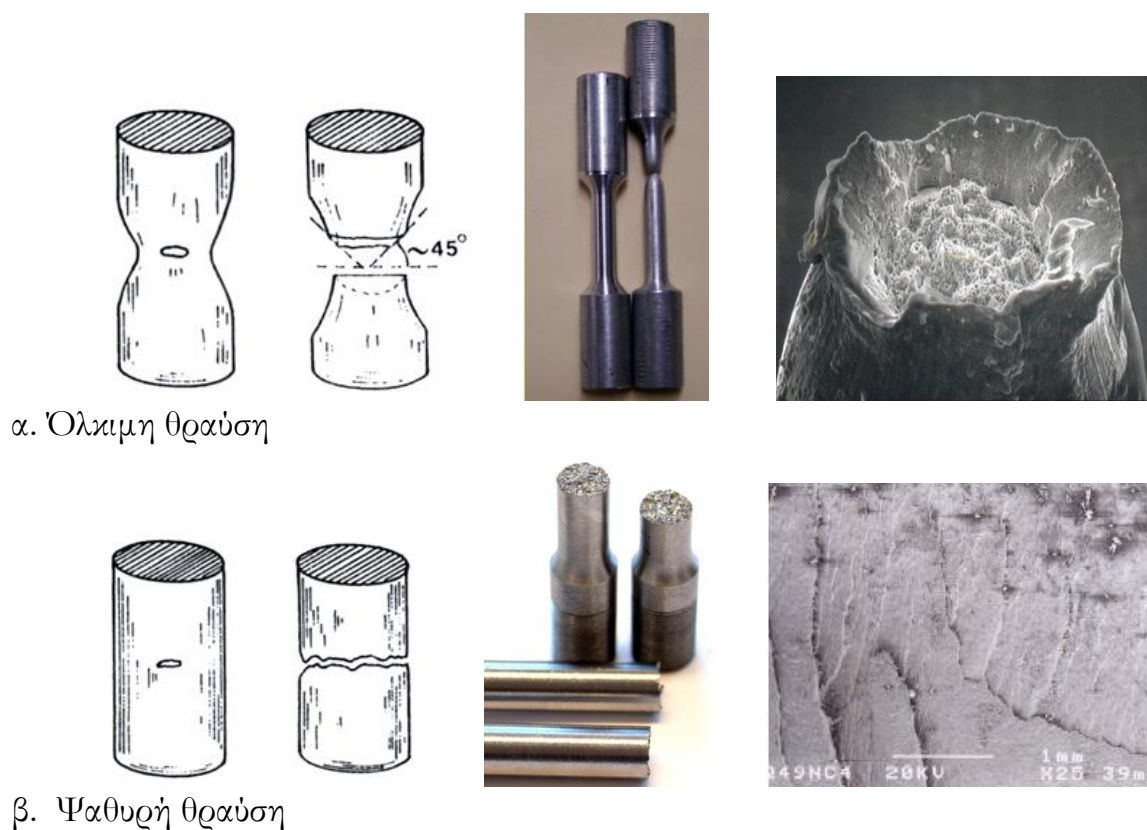
Ο όρος **θραύση** χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει τον διαχωρισμό ενός αντικειμένου σε δυο ή περισσότερα τεμάχια υπό την επίδραση στατικής ή δυναμικής μηχανικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα της μηχανικής φόρτισης ενδεχομένως να επιταχύνονται από την παρουσία χημικών παραγόντων ή/και θερμικών φορτίων. Ως επιφάνειες θραύσης καλούνται οι συζυγείς επιφάνειες που δημιουργούνται από τη θραύση, λόγω της διάδοσης ρωγμών (Ψυλλάκη, 2013), (Γαλιατσάτος et al., 2016), (Κολοβός, 2012).

⁸ Βλ. Τυπολόγιο Παραρτήματος «IB».

Αν εξετάσουμε την απλούστερη περίπτωση μονοαξονικής μηχανικής καταπόνησης με εφαρμογή εφελκυστικής φόρτισης στο υλικό, η θραύση επέρχεται:

- Αφού προηγηθεί εμφανής πλαστική παραμόρφωση (επιμήκυνση) του υλικού και χαρακτηρίζεται ως **όλκιμη θραύση**. Η επιφάνεια θραύσης που προκύπτει έχει χαρακτηριστική κυψελοειδή ή ινώδη μορφολογία που αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο επέρχεται ο τελικός αποχωρισμός (θραύση) με συνένωση μικροκενών και πλαστική παραμόρφωση σε μικροκλίμακα.

- Χωρίς να προηγηθεί εμφανής πλαστική παραμόρφωση του υλικού, που χαρακτηρίζεται ως **ψαθυρή θραύση**. Στην επιφάνεια θραύσης αποτυπώνεται η περικρυσταλλική (κατά μήκος των ορίων των «κόκκων») ή ενδοκρυσταλλική (διαμέσου των «κόκκων») διαδρομή της ρωγμής που οδήγησε στον τελικό αποχωρισμό των συζυγών τεμαχίων του υλικού.

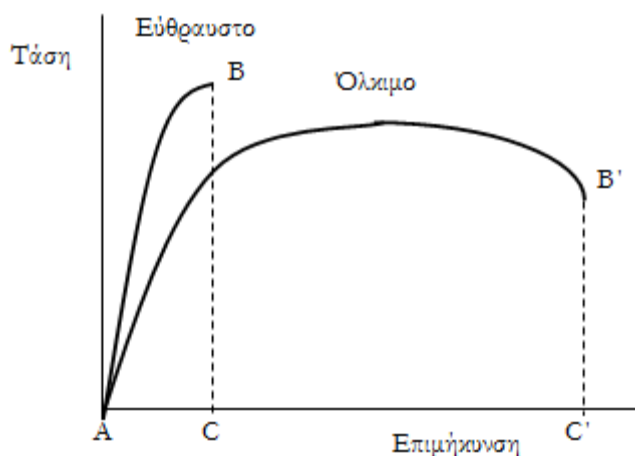


Σχήμα 14. Τυπικά δοκίμια και επιφάνειες θραύσης μετά από όλκιμη και ψαθυρή θραύση με εφαρμογή εφελκυστικών φορτίων

Με τον όρο **ολκιμότητα (πλαστικότητα)** εννοούμε τη συνολική επιμήκυνση λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Έτσι, τα υλικά διακρίνονται σε **όλκιμα** (συνεκτικά) και **ψαθυρά**.

Όλκιμα είναι αυτά που το στάδιο πλαστικής παραμόρφωσης είναι μακρύ (π.χ. μαλακός χάλυβας) και ψαθυρά εκείνα με μικρό στάδιο πλαστικής παραμόρφωσης (π.χ. τσιμεντοκονίαμα, χυτοσίδηρος, πέτρα κλπ.).

Το εμβαδόν της περιοχής που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη τάσης - επιμήκυνσης (σχήμα 15) αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό πριν σπάσει, το έργο δηλαδή που απαιτείται για να υποστεί θραύση. Το εμβαδόν αυτό αποτελεί ένα μέτρο της **δυσθραυστότητας** του υλικού. Με άλλα λόγια δυσθραυστότητα είναι η αντίσταση του υλικού στη διάδοση της ρωγμής. Τα όλκιμα υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλη δυσθραυστότητα, ενώ τα ψαθυρά από μικρή. Η τιμή της δυσθραυστότητας των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική σύσταση, την κρυσταλλική δομή και τη θερμοκρασία. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ορισμένα όλκιμα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε ψαθυρά.



Σχήμα 15. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για όλκιμο και εύθραυστο υλικό

Σκληρότητα είναι η μηχανική ιδιότητα του υλικού να αντιστέκεται στην πλαστική παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Επιπλέον, συνδέεται με την αντοχή του στο λύγισμα, την πρόκληση εκδορών ή τον τεμαχισμό του. Η σκληρότητα συνδέεται και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως την αντοχή σε εφελκυσμό, την πλαστικότητα (επιμήκυνση κατά τη θραύση) και τη δυσθραυστότητα. Όταν αυξάνεται η σκληρότητα ενός υλικού, αυξάνεται η αντοχή του αλλά μειώνονται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητά του, δηλαδή ένα πολύ σκληρό υλικό είναι πολλές φορές και ψαθυρό (εύθραυστο). Έτσι, διαπιστώνουμε ότι η σκληρότητα παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή του υλικού και το όριο θραύσης του.

3.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου στην αντοχή των υλικών - ερπυσμός

Οι παραμορφώσεις στα στερεά σώματα δεν οφείλονται μόνο στην εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων, αλλά και σε άλλα αίτια όπως είναι οι **μεταβολές της θερμοκρασίας** και η **πάροδος του χρόνου** (Γαλιατσάτος et al., 2016). Οι μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν ως αποτέλεσμα, πρώτον τα στερεά σώματα να διαστέλλονται και να συστέλλονται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα και δεύτερον να μειώνονται τα όρια αντοχής τους. Η πάροδος του χρόνου σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των παραμορφώσεων, παρόλο που τα φορτία δεν αλλάζουν, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τα όρια αντοχής των υλικών.

Η μεταβολή της αντοχής των συνηθισμένων υλικών για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας είναι πρακτικά ασήμαντη. Σημαντικές μειώσεις αντοχής μπορεί να παρατηρηθούν σε δομικά στοιχεία που αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες, πολύ μεγαλύτερες από την «οριακή θερμοκρασία»· χαρακτηριστική για κάθε υλικό. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος. Επιπλέον, το όριο θραύσης και το όριο διαρροής εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, καθώς αυτά μειώνονται με την αύξηση αυτής.

Πολλές φορές παρατηρείται το εξής φαινόμενο: ενώ μια κατασκευή δέχεται ένα σταθερό φορτίο, να παρουσιάζει αύξηση των παραμορφώσεων της με την πάροδο του χρόνου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ερπυσμός** (creep). Ο όρος αυτός οφείλεται στην παραμόρφωση - επιμήκυνση που εμφανίζει μια κατασκευή με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα να φαίνεται ότι το υλικό «έρπει». Το φαινόμενο του ερπυσμού εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Το σημείο τήξεως: Η θερμοκρασία εμφάνισης ερπυσμού στα μέταλλα είναι περίπου ίση με το 1/3 του σημείου τήξεως. Επίσης, τα μέταλλα με υψηλό σημείο τήξεως παρουσιάζουν χαμηλό ερπυσμό και το αντίθετο.
- Αν είναι καθαρά μέταλλα ή κράματα: Τα κράματα εμφανίζουν μικρότερο ερπυσμό σε σχέση με τα μέταλλα. Έτσι, σε κατασκευές που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται κράματα και όχι μέταλλα.
- Το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων: υλικά που έχουν μικρούς κόκκους παρουσιάζουν μεγαλύτερο ερπυσμό απ' ό,τι αυτά που έχουν μεγάλους κόκκους.

3.1.4 Κόπωση - συγκέντρωση τάσεων

Το φαινόμενο της κόπωσης αναφέρεται στο 4^ο Κεφάλαιο μαζί με άλλους τρόπους και μηχανισμούς αστοχίας. Στην υποπαράγραφο αυτή θα δοθούν ορισμένα στοιχεία μηχανικής του φαινομένου αυτού.

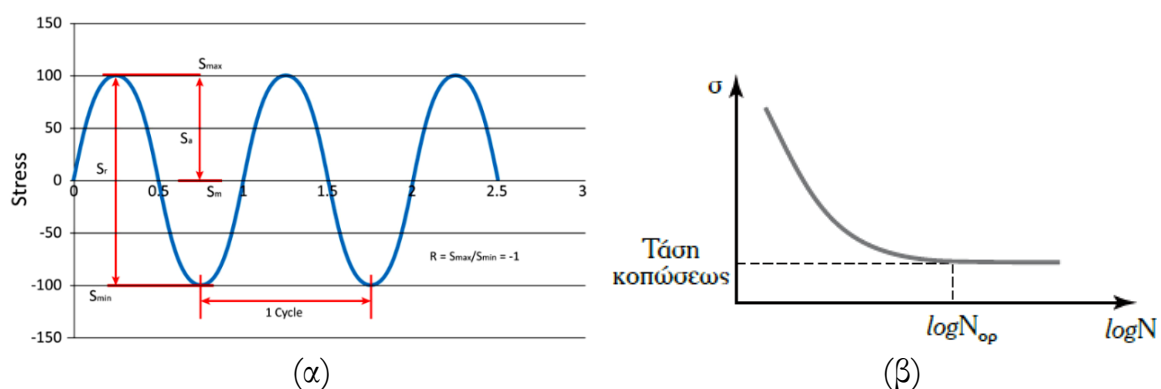
«**Κόπωση** ενός υλικού ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το υλικό στο οποίο ενεργεί μεταβλητό φορτίο, μετά από έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων της φορτίσεώς του, της τάξης των χιλιάδων φορών, θραύεται ή παρουσιάζει ρωγμές σε τάση μικρότερη από την τάση θραύσεως του υλικού για φόρτιση με σταθερό φορτίο» (Γαλιατσάτος et al., 2016).

Η κόπωση επέρχεται συνήθως μετά την εφαρμογή επαναλαμβανόμενων φορτίων κατά περιοδικό τρόπο. Ειδικές περιπτώσεις των επαναλαμβανόμενων αυτών φορτίων είναι οι εξής:

- **Μη εναλλασσόμενη περιοδική φόρτιση:** η τάση φορτίσεως μεταβάλλεται ημιτονοειδώς μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης θετικής τιμής.
- **Πρωτογενής φόρτιση:** στην περίπτωση αυτή η τάση φορτίσεως μεταβάλλεται ημιτονοειδώς μεταξύ του μηδενός και μιας μέγιστης τιμής.
- **Εναλλασσόμενη ή παλμική φόρτιση:** η τάση φορτίσεως μεταβάλλεται ημιτονοειδώς μεταξύ μιας ελάχιστης αρνητικής τιμής και μιας μέγιστης θετικής τιμής.

Διάγραμμα κοπώσεως ή διάγραμμα Wöhler

Μια πλήρης εναλλαγή φορτίσεως ονομάζεται **κύκλος φορτίσεως**.



Σχήμα 16. (α) Εναλλασσόμενη φόρτιση και (β) Διάγραμμα κοπώσεως

Το «διάγραμμα κοπώσεως» απεικονίζει τη σχέση της διακυμάνσεως της τάσεως που εφαρμόζεται στα δοκίμια ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων φορτίσεως μέχρι τη

θραύση των δοκιμίων. Η «διακύμανση τάσεως» είναι η αλγεβρική διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της τάσεως σε κάθε κύκλο (διπλάσια της μέγιστης τιμής).

Μελετώντας το διάγραμμα κοπώσεως διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

- Η συμπεριφορά του υλικού στη μεταβλητή φόρτιση είναι πολύ διαφορετική από αυτή της σταθερής. Στη φόρτιση με σταθερά φορτία, εάν δεν έχουμε ερπυσμό, το υλικό δε θραύεται όταν φορτιστεί με φορτίο κάτω του ορίου θραύσεως. Αντίθετα, στη μεταβλητή φόρτιση, όσο πιο πολλούς κύκλους φορτίσεως δέχεται το υλικό, τόσο πιο μικρή τάση μπορεί να αντέξει.
- Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση αυξάνεται όσο η διακύμανση της τάσεως που εφαρμόζεται στα υλικά μειώνεται.
- Υπάρχει μια οριακή τιμή της διακύμανσης τάσεως φορτίσεως, όπου όταν η διακύμανση είναι κάτω από αυτή, το υλικό δεν υφίσταται θραύση όσοι κύκλοι φόρτισης και αν εφαρμοστούν. Η οριακή αυτή τιμή φορτίσεως ονομάζεται **τάση κοπώσεως ή όριο κοπώσεως ή δυναμική αντοχή του υλικού ή όριο αντοχής διαρκείας**. Συνήθως, η τάση κοπώσεως εκφράζεται ως ποσοστό του ορίου θραύσεως σε εφελκυσμό που αντιστοιχεί σε φόρτιση με σταθερά φορτία.
- Η τάση κοπώσεως αντιστοιχεί σε μια οριακή τιμή αριθμού κύκλων φορτίσεως (N_{OP}), που ονομάζεται **οριακός αριθμός κύκλων φορτίσεως**. Η τάση κοπώσεως εξαρτάται από το υλικό, τον τρόπο δράσης της φορτίσεως και το είδος της μεταβλητής φορτίσεως που δρα στο υλικό.

Η αντοχή των υλικών σε κόπωση εξαρτάται τόσο από την ύπαρξη σημείων στα οποία γίνεται **συγκέντρωση τάσεων**, όπως υπάρχουσες οπές ή εγκοπές στο υλικό, τραχείς επιφάνειες αυτού, όσο και από σημεία που υπάρχουν ατέλειες προκαλούμενες στα στάδια καταργασίας του υλικού (μικρορωγμές, εγκλείσματα, κενά κ.α.) και στα οποία αναπτύσσονται **παραμένουσες τάσεις**.

Συγκέντρωση τάσεων ονομάζεται η απότομη αύξηση της τάσεως πάνω από μια ονομαστική τιμή σε μια τοπική περιοχή του υλικού, λόγω υπάρξεως γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως εγκοπές, κοιλότητες και οπές. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της αντοχής του υλικού, αφού η τοπική αύξηση των τάσεων μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που οι τοπικές τάσεις να υπερβαίνουν το όριο θραύσεως του υλικού και τελικά αυτό να αστοχήσει.

§3.2 Κριτήρια αστοχίας υλικών

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια σύντομη αναφορά της τάσης (ορθής, διατμητικής) που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα δομικό στοιχείο και της αξονικής του παραμόρφωσης. Ωστόσο, σε ένα σημείο μπορεί να ασκηθούν σύνθετα φορτία διαφορετικών κατευθύνσεων και η παραμόρφωση να μην είναι αξονική, αλλά επίπεδη ή χωρική. Το ερώτημα που πρέπει να απαντήσει ένας μηχανικός των υλικών είναι: πως συνεργάζονται τα σύνθετα αυτά φορτία και πως μπορούν να οδηγήσουν τελικά το υλικό σε αστοχία. Η απάντηση προϋποθέτει γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών της κατασκευής, καθώς και του τασικού πεδίου που ασκείται κυρίως σε κρίσιμα σημεία και περιοχές (Γαλιατσάτος et al., 2016) (Φιλόπουλος, 2005), (Γριμπά, 2010).

Η αστοχία των κατασκευών εξαρτάται τόσο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, όσο και από τις ιδιότητες των υλικών από τα οποία έχουν κατασκευαστεί. Το κάθε είδος υλικού παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στις καταπονήσεις. Επίσης, υπάρχουν ορισμένα όρια καταπονήσεως, πέρα από τα οποία συμβαίνουν σημαντικές αλλαγές στα δομικά υλικά, όπως η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων. Τέτοια όρια καταπονήσεως είναι το όριο διαρροής και το όριο θραύσεως. Έτσι, με τον όρο **αστοχία υλικού** εννοούμε για τα όλκιμα υλικά την εμφάνιση διαρροής και για τα ψαθυρά την εμφάνιση θραύσης.

Όπως προαναφέρθηκε, επειδή κάθε είδος υλικού συμπεριφέρεται διαφορετικά στην άσκηση ίδιων καταπονήσεων, η θεωρία (κριτήριο) αστοχίας του κάθε υλικού είναι διαφορετική. Ως **κριτήριο αστοχίας** λοιπόν, ορίζουμε μια συνθήκη που διακρίνει την επιθυμητή από την ανεπιθύμητη κατάσταση (ποιότητα) του υλικού. Η συνθήκη αστοχίας μπορεί να εκφραστεί μέσω επιτρεπόμενων ορίων στις αναπτυσσόμενες τάσεις ή/και τις παραμορφώσεις.

Ως **επιτρεπόμενη τάση** ($\sigma_{\text{ΕΠ}}$ ή $\tau_{\text{ΕΠ}}$) μιας κατασκευής ονομάζεται η μέγιστη τάση (ορθή ή διατμητική) που επιτρέπεται να αναπτυχθεί στην κατασκευή, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του υλικού. Προκειμένου να έχουμε ελαστικές παραμορφώσεις, η επιτρεπόμενη τάση δεν πρέπει να ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού και καθορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή ασφαλείας.

Ως **συντελεστής ασφαλείας** (ν) ονομάζεται ο αριθμός που δείχνει πόσες φορές μικρότερη είναι η επιτρεπόμενη τάση από την τάση αναφοράς (κρίσιμη). Ανάλογα με την τάση αναφοράς έχουμε τους ακόλουθους συντελεστές ασφαλείας:

- Έναντι ορίου ελαστικότητας (σ_E): Συντελεστής ασφαλείας (ν_E) = $\sigma_E / \sigma_{\text{ΕΠ}}$ (1)
- Έναντι ορίου διαρροής (σ_S): Συντελεστής ασφαλείας (ν_S) = $\sigma_S / \sigma_{\text{ΕΠ}}$ (2)
- Έναντι θραύσεως (σ_B): Συντελεστής ασφαλείας (ν_B) = $\sigma_B / \sigma_{\text{ΕΠ}}$ (3)

Όμοια και για τους συντελεστές ασφαλείας διατμητικών τάσεων. Ο συντελεστής ασφαλείας που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι αυτός έναντι θραύσεως.

Γενικά, ανάλογα το κριτήριο αστοχίας υπολογίζουμε την ισοδύναμη τάση (σ) και τη συγκρίνουμε με τη δεδομένη κρίσιμη τάση (σ_C) για το υπόψη υλικό.

- Αν $\sigma = \sigma_C$, τότε έχουμε αστοχία
- Αν $\sigma < \sigma_C$, δεν υφίσταται καμία αστοχία

Τα παραπάνω αυτά κριτήρια χαρακτηρίζονται ως γενικά, καθώς η θεμελίωσή τους δεν προϋποθέτει την αποδοχή ύπαρξης συγκεκριμένων φυσικών μικρομηχανισμών αστοχίας του υλικού που δρουν σε διακεκριμένες μικροπεριοχές δομικών ή εντατικών ανωμαλιών. Κατά συνέπεια ένα ομοιογενές και ισότροπο υλικό υπό την επίδραση ομοιογενούς εντατικού πεδίου θα διαρρεύσει αυτόματα σε όλη του την έκταση, τη στιγμή που το εντατικό πεδίο θα ικανοποιήσει τις συνθήκες αστοχίας. Σε αντιδιαστολή, τα «τοπικά κριτήρια» εκκινούν από την υπόθεση ύπαρξης μιας ανωμαλίας σε μικροσκοπικό επίπεδο και μελετούν την τοπική αστοχία που προκαλείται, καθώς και την επίδρασή της στη συνολική συμπεριφορά του υλικού.

Στον χώρο των τάσεων κάθε εντατική κατάσταση παριστάνεται από ένα σημείο με συντεταγμένες τις κύριες τάσεις ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Ωστόσο διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Περίπτωση μονοαξονικού εφελκυσμού: η συνθήκη αστοχίας παριστάνεται από ένα σημείο με συντεταγμένες

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (\sigma_\Delta, 0, 0) \quad (4)$$

- Στη γενική περίπτωση της τρισδιάστατης εντατικής κατάστασης η συνθήκη αστοχίας παριστάνεται από μια επιφάνεια που ονομάζεται επιφάνεια αστοχίας ή διαρροής και έχει γενική εξίσωση της μορφής:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_Y) = 0 \quad (5)$$

- Για ομοιογενή και ισότροπα υλικά, η προηγούμενη εξάρτηση γράφεται:

$$F_1(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = F_2(\sigma_Y) \quad (6)$$

Τα κριτήρια αστοχίας που έχουν διατυπωθεί είναι τα εξής:

«Κριτήριο μέγιστης ορθής τάσης»,

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η αστοχία συμβαίνει όταν οι μέγιστες ισοδύναμες ορθές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα υλικό γίνουν ίσες ή ξεπεράσουν το όριο διαρροής ή το όριο θραύσης. Το κριτήριο αυτό είναι το απλούστερο κριτήριο αστοχίας και δε λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές τάσεις. Προβλέπει επιτυχώς τη θραύση των ψαθυρών υλικών και έτσι αποτελεί ένα κριτήριο θραύσης για αυτά. Άρα η συνθήκη θραύσης διατυπώνεται ως εξής: Υφίσταται αστοχία όταν:

$$\max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) = \sigma_B \quad (7)$$

Οι απόλυτες τιμές μπαίνουν για να λαμβάνονται υπόψη και οι θλιπτικές κύριες τάσεις (θεωρούμε ότι η αντοχή είναι ίδια σε εφελκυσμό και θλίψη).

«Κριτήριο μέγιστης διατμητικής τάσης (Κριτήριο Tresca)»

Βάσει του κριτηρίου αυτού, αστοχία υλικού έχουμε όταν η μέγιστη διατμητική τάση γίνει ίση ή ξεπεράσει την τιμή της διατμητικής τάσης διαρροής του υλικού. Αποτελεί κριτήριο διαρροής των όλκιμων υλικών. Οι τιμές των διατμητικών τάσεων μεγιστοποιούνται σε επίπεδα που έχουν κλίση 45° ως προς τα επίπεδα των κύριων τάσεων. Οι τιμές τους εκεί είναι: $\tau_1 = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}$, $\tau_3 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}$, $\tau_1 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}$, οπότε η συνθήκη διαρροής διατυπώνεται ως εξής:

$$\max\left(\frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}\right) = \tau_s \quad (8)$$

«Κριτήριο μέγιστης ορθής παραμορφώσεως»

Βάσει του κριτηρίου αυτού, η μέγιστη παραμόρφωση παρουσιάζεται στη διεύθυνση της μέγιστης ορθής τάσεως.

«Κριτήριο κρίσιμης ενέργειας παραμορφώσεως»

Σύμφωνα με το οποίο, κατά την καταπόνηση ενός σώματος παράγεται έργο, που αποθηκεύεται ως ενέργεια παραμορφώσεως. Η ενέργεια αυτή αναλύεται σε δύο μέρη: σε αυτήν που αντιστοιχεί στη μεταβολή του όγκου χωρίς στρέβλωση και σε αυτήν που αντιστοιχεί σε στρέβλωση χωρίς μεταβολή του όγκου. Αστοχία έχουμε όταν η ενέργεια παραμορφώσεως ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή.

«Κριτήριο στροφικής ενέργειας (Κριτήριο του Mises)»

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, εάν ένα υλικό είναι ομογενές και ισότροπο, τότε είναι σημαντικό μόνο το μέρος της ενέργειας παραμορφώσεως που αντιστοιχεί σε στρέβλωση χωρίς μεταβολή του όγκου, η οποία ονομάζεται «στροφική ενέργεια». Αστοχία έχουμε όταν η στροφική ενέργεια του καταπονούμενου σώματος γίνει ίση με την αντίστοιχη ενέργεια σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κριτήριο αυτό συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα στα όλκιμα υλικά.

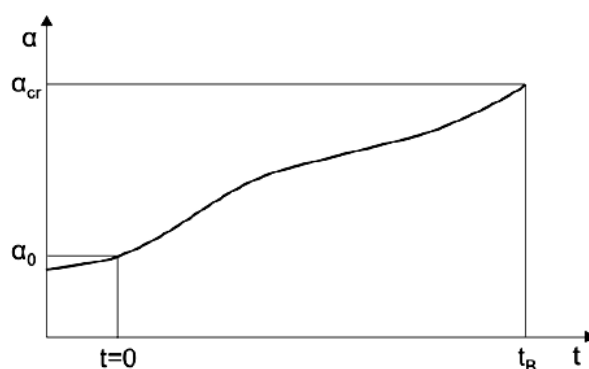
«Κριτήριο Mohr – Coulomb (κριτήριο θραύσης)»

Βάσει του οποίου, η θραύση σε δεδομένο επίπεδο επέρχεται όταν κάποιος συνδυασμός της ορθής και της διατμητικής τάσης στο επίπεδο αυτό αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή.

§3.3 Τρόποι διάδοσης της ρωγμής

Διάδοση της ρωγμής σε σχέση με τον χρόνο

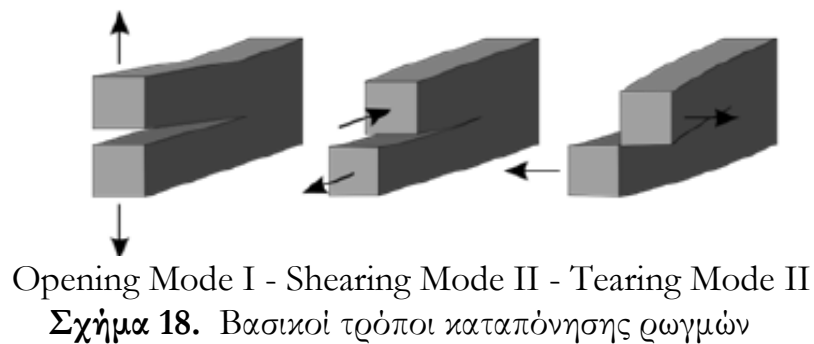
Ένα δομικό στοιχείο μπορεί να παρουσιάσει ρωγμές ή ατέλειες κατά τη λειτουργία του. Αυτές, όμως, δεν πρέπει να διαδοθούν και να εξελιχθούν σε τέτοιο βαθμό που να το οδηγήσουν σε αστοχία και σε καταστροφικές καταστάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σημαντικό ρόλο παίζει η συντήρηση της κατασκευής - οπλικού συστήματος, που έχει ως στόχο να προφυλάξει το υλικό από καταστροφές λόγω θραύσης, μέσω έγκαιρης διάγνωσης και θεραπείας. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τυπική διάδοση ρωγμής στον χρόνο, και συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή $t=0$ διαπιστώθηκε ρωγμή μήκους α_0 , ενώ τη χρονική στιγμή (t_B) η ρωγμή αυτή θα εξελιχθεί σε κρίσιμη ρωγμή α_{cr} και το δομικό στοιχείο θα αστοχήσει στις συνθήκες λειτουργίας του (Lourenco, 2010), (McEvily, 2013), (Γριμπά, 2010), (Γαλιατσάτος et al., 2016), (Διαμαντάκος, 2009).



Σχήμα 17. Τυπική διάδοση ρωγμής σε σχέση με τον χρόνο (Γριμπά, 2010)

Τρόποι καταπόνησης μιας ρωγμής - συντελεστής έντασης των τάσεων

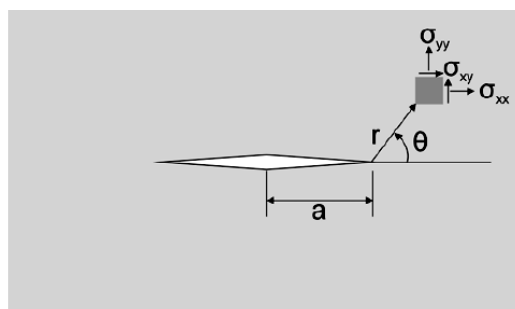
Μια ρωγμή σε ένα δομικό στοιχείο μπορεί να καταπονηθεί με έναν από τους τρεις τρόπους που φαίνονται στο σχήμα 18. Στο πρώτο τρόπο καταπόνησης (mode I), που αποτελεί και τον πιο κρίσιμο, η ρωγμή ανοίγει, δηλαδή οι επιφάνειες της ρωγμής μετατοπίζονται κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής, ενώ στο δεύτερο τρόπο (mode II), οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη παράλληλα στην ακμή της ρωγμής. Στον τρίτο τρόπο καταπόνησης (mode III), οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη κάθετα στην ακμή της ρωγμής.



Το «πεδίο εντάσεων» στην περιοχή γύρω από μια ρωγμή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^I &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_I(\theta) & (\text{mode I}) \\ \sigma_{ij}^{II} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{II}(\theta) & (\text{mode II}) \\ \sigma_{ij}^{III} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{III}(\theta) & (\text{mode III})\end{aligned} \quad (9)$$

Ο συντελεστής K_i ονομάζεται **συντελεστής έντασης των τάσεων** για το είδος καταπόνησης i , το r είναι η απόσταση του σημείου άσκησης της τάσεως από την κορυφή της ρωγμής και η συνάρτηση $f_i(\theta)$ είναι μια τριγωνομετρική συνάρτηση για το αντίστοιχο είδος καταπόνησης. Κάθε είδος καταπόνησης δημιουργεί στην κορυφή της ρωγμής τασικό πεδίο με ιδιομορφία της τάξεως $1/\sqrt{r}$. Το τασικό πεδίο για την περίπτωση της επίπεδης έντασης φαίνεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19. Τασικό πεδίο γύρω από την κορυφή της ρωγμής

Ο συντελεστής έντασης των τάσεων εκφράζει την ένταση των τάσεων και την κρισιμότητα αυτών κοντά στην άκρη της ρωγμής. **Θεωρούμε ότι μια ρωγμή δομικού στοιχείου θα οδηγήσει σε αστοχία όταν η τιμή του K γίνει ίση ή μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή (K_C για επίπεδη ένταση και K_{IC} για επίπεδη παραμόρφωση) που αποτελεί**

χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού και ονομάζεται κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων ή δυσθραυστότητα.

Ο συντελεστής αυτός και οι παραλλαγές του χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αντίσταση των υλικών στη διάδοση μιας ρωγμής κόπωσης και εξαρτάται από το είδος του υλικού, τη γεωμετρία του και τη μορφή της ρωγμής. Έτσι, ο παράγοντας β εισάγεται διορθωτικά, εξαρτώμενος από το δομικό στοιχείο, τη γεωμετρία και το μήκος της ρωγμής και το ασκούμενο φορτίο.

Σε μία άπειρου πλάτους επιφάνεια με κεντρική ρωγμή μήκους $2a$ και εφαρμοζόμενη τάση σ_0 σε μονοαξονικό εφελκυσμό (mode I), ο συντελεστής έντασης των τάσεων δίνεται από τη σχέση:

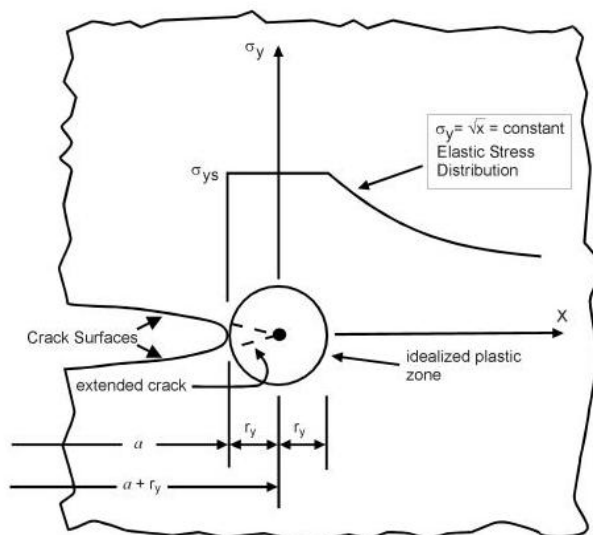
$$K = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

Στην περίπτωση μιας πεπερασμένου πλάτους επιφάνειας η σχέση αυτή γίνεται:

$$K = Y\left(\frac{a}{W}\right) \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (11)$$

όπου $2W$ το πλάτος του δίσκου και $Y\left(\frac{a}{W}\right) = \beta$ μια διορθωτική συνάρτηση λόγω του πεπερασμένου πλάτους.

Καθώς η απόσταση του τασικού πεδίου από την άκρη της ρωγμής μειώνεται, οι τάσεις αυξάνονται και πλησιάζουν τα όρια διαρροής και θραύσης προκαλώντας στο υλικό πλαστική παραμόρφωση. Έτσι, η απόσταση r καθορίζει την ζώνη πλαστικότητας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



$$r_p = \frac{K_I^2}{\alpha \pi \sigma_{ys}^2}$$

$$\alpha = \begin{cases} 2 & \text{for plane stress} \\ 6 & \text{for plane strain} \end{cases} \quad (12)$$

Σχήμα 20. Διάγραμμα τάσεων σε σχέση με την απόσταση r και ζώνη πλαστικότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση αστοχίας συστημάτων

§4.1 Η έννοια της αστοχίας

Με τον όρο **αστοχία (failure)** εννοούμε οποιαδήποτε αλλαγή συμβεί σε ένα δομικό στοιχείο συστήματος ή διαδικασίας και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητάς του να εκτελέσει ορθά μία προδιαγεγραμμένη λειτουργία για την οποία έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Συνήθως, η αστοχία ενός συστήματος είναι αποτέλεσμα ενός συνόλου παραγόντων, οι οποίοι συνδυάζονται σε κατάλληλο χώρο και χρόνο, προκαλώντας την αστοχία. Μερικές φορές η απουσία ενός μόνο παράγοντα μπορεί να εμποδίσει την πρόκληση συγκεκριμένης αστοχίας (Bowles & Bonnell, 1995), (Affonso, 2006).

Ένας άλλος ορισμός της αστοχίας είναι «ότι αυτή συμβαίνει όταν μια κατασκευή ή ένα στοιχείο αυτής δεν μπορεί πλέον να αντέξει τις καταπονήσεις (τάσεις) που ασκούνται σε αυτή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της». Συνήθως, οι αστοχίες σχετίζονται με συγκεντρώσεις τάσεων (καταπονήσεων) σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής (Findlay & Harrison, 2002).

Σε ένα σύστημα μια αστοχία μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε στιγμή του κύκλου ζωής του και να το οδηγήσει σταδιακά ή ακαριαία σε βλάβη, καθιστώντας το μη ασφαλές για περαιτέρω χρήση. Έτσι, τα ενδιάμεσα στάδια της αστοχίας είναι: «**αρχική αστοχία**», «**αρχική βλάβη**», «**κατάσταση κινδύνου**», «**επιδείνωση**», «**τελική αστοχία**», «**βλάβη**», (Pusey, 1996).

Επιπλέον, ανάλογα τις επιπτώσεις που έχει στο σύστημα η αστοχία διακρίνεται στις παρακάτω διαβαθμίσεις (Bowles & Bonnell, 1995):

- **Καταστροφική αστοχία** (Catastrophic failure): είναι η αστοχία που μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή ή την απώλεια όλου του οπλικού συστήματος (αεροσκάφους, άρματος μάχης, βλήματος, πλοίου κ.α.).
- **Κρίσιμη αστοχία** (Critical failure): είναι η αστοχία που μπορεί να προκαλέσει σοβαρή απώλεια υγείας (τραυματισμό) και βλάβη στο κύριο σύστημα, έχοντας ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτέλεσης της αποστολής.
- **Οριακή αστοχία** (Marginal failure): είναι η αστοχία που μπορεί να προκαλέσει μικρή απώλεια υγείας (τραυματισμό) ή μικρή βλάβη στο κύριο σύστημα, έχοντας

ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση ή τη μη διαθεσιμότητα του οπλικού συστήματος ή την υποβάθμιση εκτέλεσης της αποστολής.

- **Ελάσσονα αστοχία** (Minor failure): είναι η αστοχία που δεν προκαλεί κάποια απώλεια υγείας ή βλάβη στο σύστημα ή το περιβάλλον του, αλλά απαιτεί την εκτέλεση εργασιών μη προγραμματισμένης συντήρησης ή επισκευής.

Όταν ένα δομικό στοιχείο συστήματος αστοχήσει, αυτό μπορεί να έχει επίπτωση στη λειτουργία ενός άλλου στοιχείου. Έτσι, έχουμε τις παρακάτω επιπλέον διαβαθμίσεις αστοχίας (Berk, 2009):

- **Πρωτεύουσα αστοχία**: είναι η αστοχία δομικού στοιχείου που δεν προκαλείται άμεσα ή έμμεσα από την αστοχία άλλου στοιχείου.
- **Δευτερεύουσα αστοχία**: είναι η αστοχία δομικού στοιχείου που προκαλείται άμεσα ή έμμεσα από την αστοχία άλλου στοιχείου.

Επιπλέον, η αστοχία ενός συστήματος μπορεί να είναι το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης διαφόρων δομικών του στοιχείων, χωρίς κάποιο από αυτά να έχει αστοχήσει. Η δεύτερη περίπτωση μπορεί να γίνει κατανοητή με τα παρακάτω παραδείγματα:

Κατά τη διάρκεια του Πολέμου του Κόλπου το 1990, ο στρατός των ΗΠΑ χρησιμοποίησε τα λεγόμενα «έξυπνα όπλα» προκειμένου να οδηγήσουν τον Σαντάμ Χουσεΐν έξω από το Κουβέιτ. Τα όπλα αυτά μπορούσαν να κατευθυνθούν με ακρίβεια στον στόχο κάνοντας χρήση λέιζερ κατάδειξης. Κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων ένα σύστημα λέιζερ «κλειδί» στον προσδιορισμό στόχου δεν κατάφερε ποτέ να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ακριβείας, με αποτέλεσμα όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του οπλικού συστήματος να μην μπορέσουν να λειτουργήσουν εξίσου αποδοτικά. Κανένα δομικό στοιχείο δεν αστόχησε, όμως το σύστημα δεν κατάφερε ποτέ να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις σχεδίασης και επομένως αστόχησε.

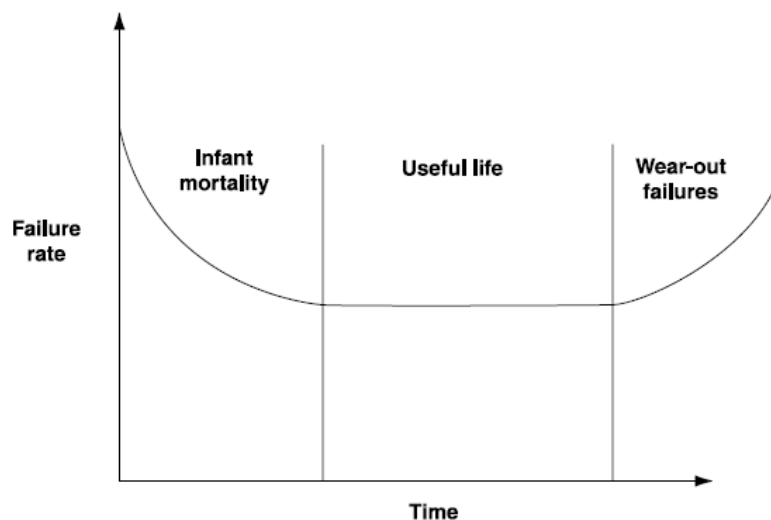
Ως δεύτερο παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί το μαχητικό ελικόπτερο Boeing AH-64 Apache το οποίο σχεδιάστηκε με ενισχυμένη θωράκιση (ατσάλι, ίνες άνθρακα, τιτάνιο) προκειμένου να επιβιώνει από απευθείας επιθέσεις εχθρικών όπλων υψηλής εκρηκτικότητας. Κατά τη διάρκεια όμως των επιχειρήσεων πάνω από το Ιράκ, ένα ελικόπτερο Apache προσβλήθηκε από ένα ZSU-23-4, αντιαεροπορικό οπλικό σύστημα ρωσικής κατασκευής, με αποτέλεσμα να επιστρέψει στη βάση του. Αν και τα συγκεκριμένα ελικόπτερα μπορούν να επιβιώσουν από τέτοιες επιθέσεις, η απόδοσή του στο πεδίο της μάχης ήταν σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις απαιτήσεις σχεδίασης, γεγονός που αποδεικνύει ότι το συγκεκριμένο οπλικό σύστημα αστόχησε ως προς τις αναμενόμενες απαιτήσεις επιβίωσης.

Όταν η αστοχία ενός δομικού στοιχείου έχει επίπτωση στην λειτουργία του κυρίως συστήματος, τότε έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες (Bowles & Bonnell, 1995):

- **Αστοχία συστήματος** (System failure): η αστοχία του στοιχείου έχει καταστροφική επίπτωση στη λειτουργία του συστήματος.
- **Αστοχία υποβάθμισης λειτουργίας** (Degraded operation failure): η αστοχία του στοιχείου έχει κάποια επίπτωση στη λειτουργία του συστήματος, παρόλο αυτά το σύστημα μπορεί να εκπληρώσει την αποστολή του.
- **Αστοχία κατάστασης συστήματος** (System status failure): η αστοχία στοιχείου προκαλεί ασάφεια ως προς την κατάσταση του συστήματος.
- **Αστοχία που δεν έχει άμεση επίπτωση** (No immediate effect failure): η αστοχία στοιχείου δεν έχει άμεσες επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος.

Επιπλέον, οι αστοχίες που προκαλούνται σε ένα σύστημα μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τον χρόνο που εμφανίζονται στον κύκλο ζωής του συστήματος. Έτσι, έχουμε τις παρακάτω αστοχίες (Δεσσαλέρμος, 2015):

- Τις **πρώιμες αστοχίες** (early failures - infant mortality)
- Τις **τυχαίες αστοχίες** (chance failures - useful life)
- Τις **αστοχίες λόγω φθοράς** (wear-out failures)



Σχήμα 21. Τύποι αστοχιών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός συστήματος (Lakshminarayanan, 2001)

Οι **πρώιμες αστοχίες** είναι οι αστοχίες που εμφανίζονται νωρίς στη ζωή ενός συστήματος/εξαρτήματος και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αποτέλεσμα είτε της κακής ποιότητας κατασκευής, είτε ελλειπών τεχνικών ελέγχου ποιότητας κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός εξαρτήματος από υλικό

χαμηλής ποιότητας, η κακή συναρμολόγηση που δεν έγινε αντιληπτή, η επιλογή λάθους υλικού κ.α. μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση πρώιμων αστοχιών. Η συχνότητά τους, όμως, είναι δυνατό να περιοριστεί με τη «Διαδικασία Εξάλειψης Σφαλμάτων» (Debugging or Burn-in Process) κατά την παραγωγή του συστήματος. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, το νέο σύστημα τίθεται σε κατάσταση λειτουργίας για έναν αριθμό ωρών κάτω από συνθήκες πραγματικής χρήσης. Τα χαμηλής ποιότητας υλικά αποτυγχάνουν από νωρίς κατά τη λειτουργία του συστήματος και αντικαθίστανται από άλλα καλύτερης ποιότητας. Παράλληλα, εάν εντοπιστούν σφάλματα σε συνδέσεις ή συναρμολογήσεις, τότε αυτά διορθώνονται.

Οι **τυχαίες αστοχίες** εμφανίζονται μετά την ολοκλήρωση της περιόδου των πρώιμων αστοχιών, όπου ξεκινάει η ωφέλιμη περίοδος (useful period) της ζωής του συστήματος/εξαρτήματος. Είναι αστοχίες που εκδηλώνονται σε τυχαίες χρονικές στιγμές, ακανόνιστα και αναπάντεχα και οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες, όπως ξαφνικές καταπονήσεις (stress) που ξεπερνούν τα όρια αντοχής (strength) του εξοπλισμού.

Οι **αστοχίες λόγω φθοράς** εμφανίζονται με την πάροδο της ωφέλιμης ζωής του συστήματος/εξαρτήματος και είναι αποτέλεσμα της γήρανσης του εξοπλισμού, και ιδιαίτερα αν εκτελείται ελλιπής ή καθόλου συντήρηση. Ωστόσο, οι αστοχίες αυτές μπορούν να προληφθούν με την αντικατάσταση των εξαρτημάτων που είναι προσβάσιμα και είναι γνωστό ότι υπόκεινται σε φθορά λόγω παρέλευσης του ωφέλιμου ορίου ζωής. Ο χρόνος αντικατάστασης θα πρέπει να είναι μικρότερος από τον μέσο χρόνο ζωής του εξαρτήματος. Όσον αφορά τα εξαρτήματα που δεν είναι προσβάσιμα, και ως εκ τούτου δεν είναι δυνατή η αντικατάστασή τους, θα πρέπει να έχουν μέσο χρόνο ζωής μεγαλύτερο από την αναμενόμενη ζωή του συστήματος. Όλα τα παραπάνω αποτελούν αντικείμενα μελέτης και προβληματισμού κατά τη φάση της σχεδίασης και κατασκευής του συστήματος.

Οι αστοχίες που είναι σοβαρές και έχουν δραματικές επιπτώσεις στη λειτουργία ενός συστήματος μπορεί να αποτελούν βασική αιτία για τερματισμό της παραγωγής του. Άλλες αστοχίες μπορεί να μην επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα, αλλά η συχνή εμφάνισή τους και το μεγάλο κόστος θεραπείας τους είναι ικανά να αναγκάσουν τον οργανισμό που το παράγει να σταματήσει την παραγωγή του.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι με την κατάλληλη σχεδίαση και εφαρμογή συστημάτων ελέγχου λειτουργίας των κρίσιμων υποσυστημάτων ενός οπλικού συστήματος (integrated system checks) μπορεί να εντοπιστούν έγκαιρα αστοχίες προτού αυτές εξελιχθούν σε καταστροφικές για το σύστημα.

§4.2 Δομικά στοιχεία οπλικού συστήματος που μπορεί να αστοχήσουν

Τα σύγχρονα οπλικά συστήματα αποτελούν πολυσύνθετα συστήματα τα οποία απαρτίζονται από διάφορα δομικά στοιχεία (hardware, software). Τα στοιχεία αυτά μπορεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους να αστοχήσουν, επηρεάζοντας την επιμέρους λειτουργία τους ή τη λειτουργία όλου του οπλικού συστήματος. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά των κυριότερων δομικών στοιχείων που μπορεί να αστοχήσουν.

4.2.1 Αστοχία υλικού μέρους (hardware)

Γενικά, κάθε οπλικό σύστημα αποτελεί συναρμολόγημα επιμέρους τμημάτων, κατασκευασμένων από μεταλλικά ή μη υλικά, τα οποία μπορεί να είναι:

- Σταθερά κατασκευαστικά τμήματα πάνω στα οποία συναρμολογούνται διάφορα δομικά στοιχεία.
- Μηχανικά - μηχανολογικά εξαρτήματα
- Ηλεκτρολογικά - ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα
- Ηλεκτρονικές συσκευές - εξαρτήματα
- Υδραυλικά συστήματα

4.2.1.1 Αστοχία μηχανικού και λοιπού υλικού

Ως μηχανική αστοχία νοείται κάθε αλλαγή στο σχήμα, το μέγεθος, την επιφάνεια ή τις ιδιότητες του συστήματος μηχανής που το καθιστά μη ικανό να εκτελέσει μια προδιαγεγραμμένη λειτουργία (Pusey, 1996).

Κάθε οπλικό σύστημα περιλαμβάνει έναν κύριο κορμό - κατασκευή (σασί) πάνω στον οποίο συναρμολογούνται όλα τα δομικά στοιχεία. Επιπλέον, υπάρχουν κυτία, περιβλήματα, σιέπαστρα κ.α. που χρησιμοποιούνται για την προστασία του διάφορου εξοπλισμού, προσωπικού ή την αποθήκευση υλικού. Όλα τα παραπάνω τμήματα είναι συνήθως κατασκευασμένα από μεταλλικά, πολυμερή και σύνθετα υλικά.

Επιπλέον κάθε οπλικό σύστημα αποτελείται από διάφορα μηχανικά - μηχανολογικά μέρη που συγκροτούν τα συστήματα εκκίνησης και μεταφοράς, ανάρτησης, μετάδοσης κίνησης, πυροδότησης όπλου, εκτόξευσης, προσγείωσης κ.α. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από στροφαλοφόρους άξονες, ρουλεμάν, γρανάζια, μηχανές εσωτερικής καύσης, τροχούς, ερπύστριες, έλικες, όργανα κ.α. τα οποία περιλαμβάνουν επιμέρους δομικά στοιχεία όπως αγωγοί, σύνδεσμοι, πείροι, τσιμούχες, κύλινδροι, δακτύλιοι, μονώσεις, κοχλίες κ.α. Εκτός από τα καθαρά μηχανικά μέρη, τα περισσότερα οπλικά συστήματα αποτελούνται και από υδραυλικά συστήματα, συστήματα ροής ελαίου και καυσίμου, συστήματα πυρόσβεσης κ.α., τα οποία περιλαμβάνουν κυλίνδρους, αγωγούς, συμπιεστές, βαλβίδες κ.λπ. Όλα τα προαναφερθέντα δομικά στοιχεία επιπλέον συνεργάζονται και συνδέονται με διάφορα ηλεκτρολογικά και ηλεκτρονικά στοιχεία σχηματίζοντας ένα συναρμολόγημα, το οπλικό σύστημα, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να εκτελέσει μια βασική λειτουργία.

Τέλος, αστοχία μπορεί να παρουσιαστεί σε οποιοδήποτε δομικό στοιχείο· από τον πιο μικρό πείρο και την πιο λεπτή τσιμούχα, έως την ολική εξωτερική μεταλλική επιστρωση του συστήματος, η οποία μπορεί να θέσει εκτός λειτουργία το όλο σύστημα ή βασικό του υποσύστημα (Lakshminarayanan, 2001).

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα απεικονίζονται τα συνήθη ποσοστά αστοχίας διαφόρων δομικών στοιχείων ενός συστήματος. Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (30%) καταλαμβάνουν οι συγκολλήσεις, όπου παρατηρούνται συνήθως μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων (Clifford, 1998).



Σχήμα 22. Συνήθη ποσοστά αστοχίας διαφόρων δομικών στοιχείων

4.2.1.2 Αστοχία ηλεκτρονικού - ηλεκτρολογικού υλικού

Όσον αφορά τα αίτια και τους τρόπους αστοχίας των ηλεκτρονικών - ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων ισχύουν σε γενικές γραμμές ότι και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία. Ωστόσο είναι δόκιμο να αναφερθούν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά, λόγω της χρήσης ηλεκτρικής ισχύος σε αυτά.

Μερικά από τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα οπλικά συστήματα είναι⁹:

- **Ολοκληρωμένα κυκλώματα** (integrated circuits): drivers, memory, microprocessors, amplifiers, data conversion, active filters κ.α.
- **Ημιαγωγοί** (semiconductors): transistors, diodes, rectifiers κ.α.
- **Ηλεκτρομηχανικά στοιχεία** (electromechanical): circuit breakers, electronic hardware, switches, motors & drives, piezo elements κ.α.
- **Οπτοηλεκτρονικά στοιχεία** (optoelectronics): LED displays, optical detectors & sensors, lamps & holders, infrared data communications κ.α.
- **Παθητικά στοιχεία** (passive components): thermistors, capacitors, resistors, inductors, encoders, potentiometers, varistors, transformers κ.α.
- **Συνδέσεις** (interconnects): για audio - video, memory cards, telecom - ethernet, circular, power entry modules, solar, RF, lighting, DC κ.α.
- **Καλώδια** (wires and cables): για power, data, communication κ.α.
- **Θερμικής διαχείρισης** (thermal management): thermistors, fans & blowers, thermoelectric modules, thermal cutoffs κ.α.
- **Προστασίας κυκλωμάτων** (circuit protection): sensors, circuit breakers, led protection devices, thermistors, gas discharge tubes, fuses κ.α.
- **Στοιχεία ισχύος** (power): batteries, transformers, power entry modules, DC converters - modulators, power management, adapters, power filters κ.α.

Οι αστοχίες που είναι δυνατόν να εμφανιστούν σε ένα ηλεκτρονικό ή ηλεκτρολογικό εξάρτημα κατά την πρώιμη φάση της ζωής του οφείλονται συνήθως σε σχεδιαστικά ή κατασκευαστικά λάθη, ακατάλληλη εγκατάσταση κ.α. Κατά την ωφέλιμη περίοδο της ζωής του μπορεί να προκληθούν τυχαίες αστοχίες εξαιτίας συγκέντρωσης τάσεων, ηλεκτρικής υπερφόρτισης (thermal damage, melt), ηλεκτροστατικών εκκενώσεων, πτώσεων τάσης,

⁹ <https://www.harrykrantz.com/products#electromechanical>

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υγρασίας, δονήσεων, χημικών ουσιών κ.α. Μετά την παρέλευση της ωφέλιμης περιόδου του υλικού είναι δυνατόν να προκληθούν αστοχίες λόγω κόπωσης, φθοράς, εξαιτίας θερμομηχανικών τάσεων ή διάβρωσης από υγρασία ή διάφορες χημικές ουσίες. Επιπλέον, πιθανοί μηχανισμοί αστοχιών είναι η ηλεκτρική διαρροή, η υποβάθμιση της μόνωσης, ο ιονισμός των μετάλλων προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος, η πρόκληση ρωγμών σε υλικό προστασίας και συνδέσμων καλωδίων λόγω επαναλαμβανόμενων καταπονήσεων κ.α.

Έτσι, οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας που παρατηρούνται σε ηλεκτρονικά - ηλεκτρικά δομικά στοιχεία και κυρίως σε ημιαγωγούς και ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι οι εξής (Lakshminarayanan, 1999):

- **Αστοχία του υλικού που περικλείει το ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) (encapsulating failure):** Μηχανική ή θερμική καταπόνηση, καθώς και διαφοροποιήσεις στους συντελεστές θερμικής διαστολής των διαφόρων μεταλλικών στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στην πρόκληση ρωγμών. Οι ρωγμές αποτελούν συνήθως σημεία εισόδου υγρασίας ή διαφόρων υγρών ουσιών, ικανών να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του εξαρτήματος οδηγώντας το σε αστοχία.
- **Αστοχία στην επιφάνεια διεπαφής του IC (die-attach failure):** Μη κατάλληλη σύνδεση μεταξύ του IC και του υποστρώματός του μειώνει τη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ τους και μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση στο IC. Η αύξηση θερμοκρασίας καταπονεί το υλικό, καθιστώντας το ευάλωτο σε ρωγμές.
- **Αστοχία στη σύνδεση καλωδίων (wire - bond failure):** Μπορεί να προκληθεί εξαιτίας θερμικών υπερφορτίσεων από αυξημένη τάση του ρεύματος, μηχανικών φορτίων που προκαλούνται από ακατάλληλη σύνδεση, ρωγμών στη διεπαφή μεταξύ της σύνδεσης των καλωδίων και του IC κ.α.
- **Αστοχία των στρωμάτων οξειδίου - μονωτές (oxide - layer faults):** Οι ηλεκτροστατικές εκκινώσεις και οι παροδικές υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται στα ηλεκτρονικά - ηλεκτρικά εξαρτήματα είναι δυνατό να προκαλέσουν την αστοχία των μονωτών αυτών (πρόκληση ρωγμών).
- **Αστοχία των σιλικονούχων στοιχείων (bulk - silicon defects):** λόγω ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων σε ατέλειες του υλικού που προκλήθηκαν στο στάδιο της κατασκευής.
- **Αστοχία μεταλλικών στοιχείων - αλουμινίου (aluminum - metal faults):** Φθορά, κόπωση, διάβρωση, αυξημένα φορτία (μηχανικά, θερμικά, ηλεκτρικά) και η «electromigration» του αλουμινίου στην κατεύθυνση της ροής του ρεύματος υψηλών ηλεκτρικών πεδίων είναι ορισμένοι από τους τρόπους αστοχίας.



Package Bulge



Package Hole

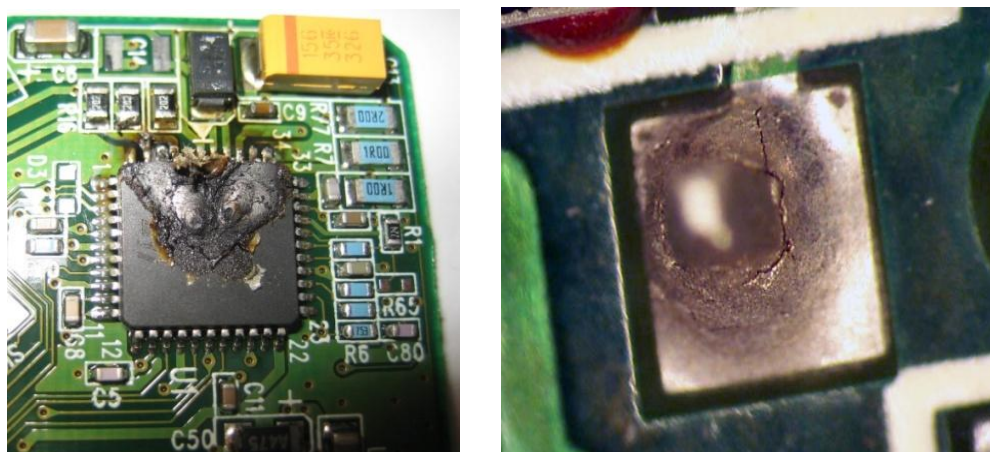


Package Burnt/Cracked

Σχήμα 23. Παραδείγματα αστοχιών σε περίβλημα IC

Στη συνέχεια, αναφέρονται εν συντομία τα σημαντικότερα αίτια - παράγοντες που οδηγούν συνήθως ένα ηλεκτρονικό - ηλεκτρολογικό δομικό συστατικό σε αστοχία (Jackson, 2005):

- **Θερμική καταπόνηση (Thermal Over-Stress)**
Όταν η θερμοκρασία των δομικών στοιχείων αυξηθεί πάνω από τα επιτρεπτά όρια (κρίσιμες τιμές) μπορεί να προκαλέσει λιώσιμο ή λύγισμα σε μεταλλικά, πολυμερή ή σύνθετα υλικά. Στα σημεία αυτά αναπτύσσονται μηχανικά φορτία ικανά να προκαλέσουν ρωγμές.
- **Ηλεκτρική καταπόνηση (Electrical Over-Stress - EOS)**
Υφίσταται όταν τα ηλεκτρονικά - ηλεκτρικά συστήματα λειτουργούν με τάσεις και εντάσεις εκτός ορίων και προδιαγραφών για σύντομο χρονικό διάστημα ($>1\text{ms}$) (τάση $<100\text{ V}$ και ένταση $>10\text{ A}$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να υφίσταται βλάβες λόγω αυξημένων θερμοκρασιών και να καταπονείται θερμικά, αναπτύσσοντας σχετικά φορτία ικανά να το οδηγήσουν σε αστοχία.
- **Ηλεκτροστατική εκκένωση (Electrostatic Discharge - ESD)**
Υφίσταται όταν τα ηλεκτρονικά - ηλεκτρικά συστήματα λειτουργούν με τάσεις και εντάσεις εκτός ορίων και προδιαγραφών για σύντομο χρονικό διάστημα ($<1\mu\text{s}$) (τάση $>500\text{ V}$ και ένταση $1\text{--}10\text{ A}$). Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις προκαλούν συνήθως θερμικές βλάβες στο υλικό, οι οποίες είτε είναι άμεσες και ορατές, είτε λανθάνουσες και όχι γρήγορα αντιληπτές.
- **Μηχανικά φορτία (Mechanic overloads):** στα δομικά στοιχεία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι δυνατόν να ασκούνται αυξημένα μηχανικά φορτία, ως αποτέλεσμα κατασκευαστικών ανωμαλιών του υλικού, μηχανικής καταπόνησης, θερμικής καταπόνησης κ.α. οδηγώντας πολλές φορές σε ρωγμές και τελική αστοχία του εξαρτήματος.



Σχήμα 24. Παραδείγματα αστοχιών IC λόγω EOS (λιώσιμο και ρωγμή)

- **Επίδραση χημικών ουσιών - ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**

Η ύπαρξη χημικών ουσιών (αλάτων, οξέων κ.α.) στο εσωτερικό ή το εξωτερικό των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ευνοεί τη δημιουργία διαβρωτικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, η ραδιενεργή ή γενικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επηρεάζει σημαντικά τα ηλεκτρικά πεδία των συστημάτων και μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία τους.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση αστοχιών ηλεκτρονικού εξοπλισμού ποικίλουν από απλές ηλεκτρικές μετρήσεις έως εξετάσεις δειγμάτων σε μικροσκόπιο. Ωστόσο, οι πληροφορίες θα πρέπει να συλλέγονται από τα εξαρτήματα που έχουν αστοχήσει χρησιμοποιώντας μη - καταστρεπτικές μεθόδους και στην εσχάτη να γίνεται χρήση καταστρεπτικών. Σημαντικός είναι ο οπτικός έλεγχος για παρουσία τμημάτων που έχουν λιώσει ή καεί, καθώς και ο έλεγχος για παρουσία οσμών καύσης. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφεται συνοπτικά τα βήματα της διαδικασίας ανάλυσης αστοχίας ενός ημιαγωγού (Lakshminarayanan, 2001), (Berk, 2009):

ΒΗΜΑΤΑ	ΜΕΘΟΔΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Εξωτερικός οπτικός έλεγχος (χρήση μικροσκοπίου μικρής μεγέθυνσης 10-100X αν απαιτείται)	Εξέταση του εξωτερικού των στοιχείων που έχουν αστοχήσει (ρωγμές, παραμορφώσεις, θερμικές βλάβες κ.α)
2	Ηλεκτρικές μετρήσεις και έλεγχοι (χρήση παλμογράφου κ.α.)	Έλεγχος λειτουργικότητας. Μέτρηση κρίσιμων παραμέτρων και σύγκριση με κανονικές τιμές για εξακρίβωση του τρόπου αστοχίας

3	IR ή X-ray έλεγχος εσωτερικού εξαρτήματος (ή με acoustic μικροσκόπιο κ.α.)	Μη - καταστρεπτικός έλεγχος των εσωτερικών συνδέσεων και της δομής για ανίχνευση ατελειών λόγω ESD και διάβρωσης.
4	Εσωτερικός έλεγχος με επέμβαση (decapsulation)	Η εσωτερική δομή εκτίθεται για έλεγχο (χρήση μηχανικών ή χημικών μεθόδων, χωρίς όμως εσωτερική αλλοίωση του στοιχείου)
5	Χρήση οπτικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου υψηλής μεγέθυνσης (2000X)	Έλεγχος με μεγέθυνση, για απόδειξη του τύπου αστοχίας (μικρορωγμές από EOS, διάβρωση)
6	Χρήση καταστρεπτικών μεθόδων	Επιλεκτική χάραξη στρωμάτων, αφαίρεση συνδέσμων, τεμαχισμός, έλεγχος εσωτερικών κυκλωμάτων.

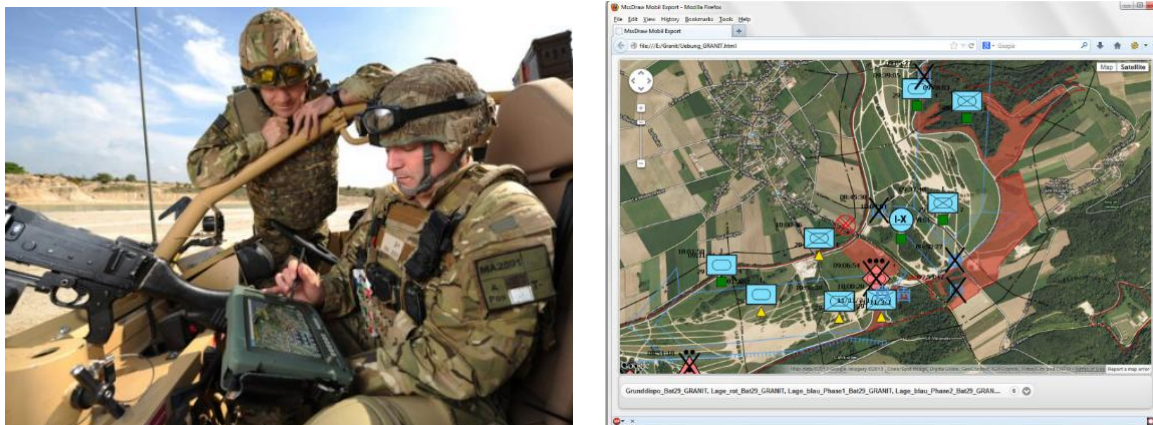
Πίνακας 1. Βασικά βήματα ανάλυσης αστοχίας ημιαγωγού - IC

4.2.2 Αστοχία λογισμικού μέρους (software)

Κάθε υπολογιστικό σύστημα αποτελείται από το υλικό (hardware) και το λογισμικό (software) μέρος. Για να μπορεί το υλικό μέρος να εκτελέσει και την πιο απλή επεξεργασία δεδομένων, χρειάζεται ένα σύνολο οδηγιών. Οι οδηγίες καθοδηγούν βήμα προς βήμα τον υπολογιστή και συντονίζουν τα διάφορα εξαρτήματά του, ώστε να πραγματοποιηθεί μια επιθυμητή εργασία - λειτουργία. Το σύνολο αυτών των εντολών ονομάζεται πρόγραμμα και το σύνολο των προγραμμάτων που χρησιμοποιείται από τον υπολογιστή, λογισμικό. Τα σύγχρονα οπλικά συστήματα απαρτίζονται από υπολογιστικά συστήματα που διαθέτουν λογισμικό, η αστοχία του οποίου μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία τους. Στην υποπαράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά των αιτιών και των τρόπων αστοχίας ενός λογισμικού.

Η χρήση υπολογιστικών συστημάτων στα σύγχρονα οπλικά συστήματα είναι επιβεβλημένη. Αποτελούν δομικά στοιχεία συστημάτων λήψης και απόφασης στο πεδίο της μάχης, πληροφοριακών συστημάτων, διαχείρισης πολεμικών αποθεμάτων, αεροχημάτων, οχημάτων, αρμάτων, πυροβόλων, αντιαεροπορικών όπλων, πλοίων κ.α. Σε όλες αυτές τις στρατιωτικές εφαρμογές ενσωματώνονται λογισμικά τα οποία εκτελούν, ελέγχουν,

καθοδηγούν και συντονίζουν λειτουργίες διαφόρων υποσυστημάτων και τεχνολογιών, προκειμένου το οπλικό σύστημα να μπορέσει να επιτελέσει την βασική του λειτουργία.



Σχήμα 25. Παραδείγματα χρήσης στρατιωτικών υπολογιστικών συστημάτων

Τα τελευταία χρόνια οι αστοχίες λογισμικού αποτελούν την κυριότερη αιτία μη διαθεσιμότητας σύγχρονων συστημάτων, μιας και η πλειονότητα αυτών διαθέτουν κάποιο είδος υπολογιστή. Βελτιώσεις στο υλικό μέρος (hardware) και τη συντήρηση αυτού έχουν συμβάλει σημαντικά στη μείωση του ποσοστού εμφάνισης αστοχιών λόγω hardware, που κυμαίνεται από 10% έως 50%, ενώ το αντίστοιχο λόγω software είναι μεταξύ 33% και 60%. Έτσι, προσπάθειες αύξησης της αξιοπιστίας ενός συστήματος πραγματοποιούνται και στον τομέα του προγραμματισμού, μέσω σύνταξης σωστού κώδικα και χρησιμοποίησης τεχνολογίας ανίχνευσης και επιδιόρθωσης σφαλμάτων λογισμικού (Sullivan & Chillarege, 1991), (Jackson, 2004).

Σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή είναι δυνατόν να υπάρχουν σφάλματα (errors) και ελαττώματα (defects) που μπορεί να εκδηλωθούν στο σύστημα και να προκαλέσουν την αστοχία (failure) αυτού. Όλα τα ελαττώματα δεν οδηγούν σε αστοχία, καθώς κάποια μπορεί να παραμένουν ανενεργά στον κώδικα και ποτέ να μην εντοπιστούν ή εκδηλωθούν. Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα σφάλματα και ελαττώματα¹⁰ που παρουσιάζονται συνήθως σε ένα λογισμικό:

¹⁰ <http://istqbexamcertification.com/what-is-a-failure-in-software-testing/>
<http://www.softwaretestinghelp.com/types-of-software-errors/>
<http://www.softwaretestingtimes.com/2010/04/types-of-software-errors-and-bugs-most.html>

- **Errors** είναι λάθη στη σύνταξη του κώδικα (γλώσσα προγραμματισμού) από τον προγραμματιστή, που οδηγούν σε λανθασμένη επεξεργασία δεδομένων και άρα λανθασμένα αποτελέσματα (field failures). Αυτά μπορεί να οφείλονται (causes) σε λανθασμένη κατανόηση των λειτουργικών απαιτήσεων από τον συντάκτη του κώδικα, σε εισαγωγή λανθασμένων παραμέτρων και τιμών κ.α.
- **Functionality errors (user interface errors):** λειτουργικό είναι το λάθος κατά το οποίο το πρόγραμμα ζητά από τον χειριστή να εκτελέσει μια ενέργεια η οποία είναι αδύνατη ή άσκοπη ή προκαλεί σύγχυση.
- **Communication errors:** είναι σφάλματα που συμβαίνουν στη διάδραση του χειριστή με το λογισμικό (γραφικά περιβάλλοντα εργασίας). Συγκεκριμένα, η μη παροχή πληροφοριών, εντολών και λειτουργιών ή ελλείψεις αυτών ή παραπλάνηση του χρήστη από αυτές κ.α.
- **Missing command errors:** όταν μια αναμενόμενη εντολή δεν υπάρχει.
- **Syntactic errors:** συντακτικά λάθη στις προτάσεις των μηνυμάτων, ικανές να οδηγήσουν σε παρερμηνεία.
- **Error handling errors:** σφάλματα ή ελλείψεις στις ενέργειες ή εντολές διαχείρισης σφαλμάτων, όπως ακατάλληλη προστασία από κατεστραμμένα δεδομένα, διαχείριση προβλημάτων hardware, μη ύπαρξη ελεγκτικών διαδικασιών κ.α.
- **Calculation errors:** υπολογιστικά λάθη που μπορεί να οφείλονται σε λανθασμένη φόρμουλα, μεταβλητές, συντακτικά λάθη, μη συμβατότητα δεδομένων και επεξεργασίας αυτών, λανθασμένη εκτέλεση εντολών κ.α.
- **Boundary related errors:** ύπαρξη καταστάσεων εκτός ορίων για «λούπες», χρόνο, μνήμη, χώρο κ.α. και κακή διαχείριση αυτών ή λανθασμένος καθορισμός.
- **Control flow errors:** σφάλματα στον έλεγχο ροής των εντολών και διαδικασιών που πρέπει να εκτελεστούν, όπως τερματισμό μιας εργασίας - λειτουργίας προτού ξεκινήσει η επόμενη, έναρξη μιας εργασίας προτού εκτελεστούν τα προαπαιτούμενα, λανθασμένη ή ετεροχρονισμένη αποστολή μηνυμάτων κ.α.
- **Load errors:** όπως μη διαθεσιμότητα απαιτούμενων πηγών - δεδομένων, μνήμη με χαμηλή περιεκτικότητα, εργασίες χαμηλής προτεραιότητας να μην αναστέλλονται, αδυναμία διαγραφής και επαναφοράς δεδομένων κ.α.
- **Initial and later states errors:** λανθασμένα στοιχεία εκκίνησης του υπολογιστή ή σφάλματα στον επανακαθορισμό των δεδομένων εκκίνησης ή εκκαθάρισης των παλιών κ.α.

- **Source, version and ID control errors:** σφάλματα ή δυσχέρειες στην αναβάθμιση του λογισμικού, εγκατάστασης άλλων πηγών ή αλλαγής ID κ.α.
- **Hardware errors:** ακαταλληλότητα υλικού και λειτουργίας αυτού.
- **Defects** είναι άχρηστα στοιχεία κώδικα - ελαττώματα (bugs) που εισάγονται κατά λάθος και μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία του συστήματος.
- **Failures** είναι τα λανθασμένα αποτελέσματα που εξάγονται κατά την επεξεργασία όλων των δεδομένων λόγω σφαλμάτων και ελαττωμάτων στον κώδικα. Ωστόσο, αστοχία σε ένα λογισμικό μπορεί να προκληθεί και από άλλους παράγοντες:
 - Περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ραδιενεργές εκπομπές, μόλυνση κ.α. μπορεί να προκαλέσουν σφάλματα στο hardware του υπολογιστή, ικανά να επηρεάσουν την εκτέλεση του λογισμικού.
 - Ανθρώπινο λάθος κατά την χρήση του λογισμικού, όπως η εισαγωγή λάθος δεδομένων ή η παρερμηνεία των αποτελεσμάτων.

§4.3 Αίτια - παράγοντες αστοχίας (failure causes - factors)

Πρωταρχικός σκοπός της ανάλυσης αστοχίας ενός συστήματος είναι ο προσδιορισμός των αιτιών που οδήγησαν σε αυτή. Τα αίτια μιας αστοχίας συνήθως αναγνωρίζονται και εξακριβώνονται μετά την εκδήλωση αυτής και μέσω μιας συστηματικής και λεπτομερούς διαδικασίας διερεύνησης (root cause). Ωστόσο, δόκιμο είναι να αναγνωρίζουμε τις διαφοροποιήσεις πριν το πρόβλημα παρουσιαστεί, προκειμένου να προλαμβάνουμε και να περιορίζουμε στο ελάχιστο δυνατό τις απώλειες εξοπλισμού, και πολύ δε περισσότερο υγείας.

Οι αστοχίες που εκδηλώνονται σε δομικά στοιχεία συστημάτων οφείλονται συνήθως σε ένα συνδυασμό αιτιών που δρουν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους. Τα κυριότερα αίτια αστοχιών είναι (Sachs, 2014):

- Φυσικά αίτια
- Ανθρώπινα λάθη, δηλαδή ενέργειες ή παραλήψεις που προκαλούν τα φυσικά αίτια.

- Τρόποι διοίκησης και διαχείρισης - νοοτροπία, που επιτρέπουν τα ανθρώπινα λάθη να συνεχίζουν να συμβαίνουν.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα βασικότερα αίτια - παράγοντες (φυσικά - ανθρώπινα), που είναι δυνατόν να οφείλονται για την εμφάνιση αστοχιών σε ένα σύστημα (Affonso, 2006), (Reddy, 2004), (Dennies, 2005):

- Μη κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος (design failures)
- Μη ορθός υπολογισμός των υπαρχόντων φορτίων - αβεβαιότητα στις φορτίσεις.
- Μη κατάλληλο υλικό - ποιότητα αυτού (poor material)
- Κατασκευαστικές ατέλειες (manufacturing - fabrication deficiencies)
- Ελαττώματα συγκόλλησης - συναρμολόγησης των τμημάτων ή εγκατάστασης αυτών (assembly/installation defects)
- Συνθήκες λειτουργίας του συστήματος (conditions)
- Έλλειψη συντήρησης ή ακατάλληλη - ανεπαρκής συντήρηση και κακές επισκευές βλαβών (maintenance - repairs)
- Ακατάλληλος έλεγχος - επιθεώρηση του συστήματος (inspection)
- Μη ορθός τρόπος χρήσης του συστήματος (use)
- Επαγγελματική ανικανότητα - αμέλεια
- **Μη κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος (design failures)**

Ένα σύστημα ή τμήμα αυτού μπορεί να αστοχήσει όταν υπάρχει λανθασμένος σχεδιασμός κατά την κατασκευή του. Η κακή σχεδίαση μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως την παρερμηνεία των λειτουργικών απαιτήσεων που έχουν καθοριστεί για το σύστημα, τον μη ορθό προσδιορισμό των οριακών συνθηκών λειτουργίας, καθώς και σε επιλογή ακατάλληλων τεχνικών υλοποίησης αυτής. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ο λανθασμένος υπολογισμός του συνολικού ασκούμενου φορτίου σε ευαίσθητα σημεία, η επιλογή ακατάλληλου υλικού, η μη πρόβλεψη σχεδιασμού αναγκιών για το σύστημα υποσυστημάτων κ.α. Ενδεικτικά επίσης μπορούμε να αναφέρουμε την παρουσία οπών σύνδεσης (notches, holes) σε ακατάλληλα σημεία, ικανών να δημιουργήσουν μεγάλες συγκεντρώσεις φορτίων. Τα σημεία αυτά είναι επιρρεπή στον σχηματισμό ρωγμών λόγω κόπωσης (fatigue cracks). Οι οπές αυτές μπορούν να αποφευχθούν και να αντικαθιστούν με άλλες τεχνικές σύνδεσης. Μεγάλη προσοχή ωστόσο θα πρέπει να δίδεται κατά την εξέταση των αιτιών αστοχιών ότι πρόκειται για αστοχία σχεδίασης.

Επιπλέον, ένα σύστημα θα πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιον τρόπο ώστε να υπάρχει δυνατότητα αντιμετώπισης απρόβλεπτων συνθηκών λειτουργίας. Για παράδειγμα, σχεδίαση

μηχανισμών για την αντιμετώπιση ενός ξένου σώματος που αλλοιώνει το υδραυλικό υγρό του συστήματος, σχεδίαση εφεδρικών κρίσιμων δομικών στοιχείων ή συστημάτων προειδοποίησης για ύπαρξη κινδύνων για το σύστημα, όπως βλάβη ή συνθήκες λειτουργίας πέρα των ορίων κ.α.

Τέλος, μετέπειτα διαφοροποιήσεις, αναβαθμίσεις ή τροποποιήσεις στη φυσική και λειτουργική δομή ενός συστήματος, όπως ενσωμάτωση νέων δομικών στοιχείων, αφαίρεση προϋπαρχόντων, εγκατάσταση νέου λογισμικού, εφαρμογή νέας τεχνολογίας κ.α. θα πρέπει να εξετάζονται λεπτομερώς και να σχεδιάζονται με ακρίβεια, διότι μπορούν να προκαλέσουν αστοχία στο σύστημα.

- **Μη ορθός υπολογισμός των υπαρχόντων φορτίων - αβεβαιότητα στις φορτίσεις.**

Ο λάθος υπολογισμός των ασκούμενων φορτίων που δύνανται να εφαρμοστούν σε ένα δομικό στοιχείο αποτελεί και αυτό με τη σειρά του ένα σχεδιαστικό σφάλμα ικανό να επιφέρει αστοχία. Αν και υπάρχουν σύγχρονα εργαλεία σχεδίασης (π.χ. CAD και μέθοδοι σχεδιασμού, όπως η «Damage Tolerance» και η «Safe-life Design», βλ. 2^ο Κεφάλαιο) αρκετές φορές είναι πιθανό να μην υπολογιστούν ορθά λόγω των μη αναμενόμενων συνθηκών λειτουργίας.

- **Μη κατάλληλο υλικό - ποιότητα αυτού (poor material)**

- **Επιλογή ακατάλληλου υλικού**

Η λάθος επιλογή υλικού για την κατασκευή ενός δομικού στοιχείου μπορεί να οδηγήσει όλο το σύστημα σε αστοχία. Η επιλογή του υλικού πραγματοποιείται στη φάση της σχεδίασης, όπου πρέπει να εξετάζονται όλες οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος (θερμοκρασία, υγρασία, ασκούμενα φορτία, διαβρωτικό περιβάλλον κ.α.), καθώς και η αντοχή του υλικού σε αυτές. Η μη κατάλληλη επιλογή υλικού μπορεί να θεωρηθεί και ως «αστοχία σχεδίασης» γιατί πραγματοποιείται στην φάση αυτής.. Ορισμένα κριτήρια επιλογής του υλικού για κατασκευή αναφέρονται στο 2^ο Κεφάλαιο.

- **Ατέλειες υλικού**

Πολλές φορές στα υλικά παρατηρούνται ατέλειες οι οποίες προκαλούνται κατά την κατασκευή ή την κατεργασία τους και είναι υπεύθυνες για αρκετές αστοχίες. Κατά τη χύτευση, τη σφυρηλάτηση και την πλαστικοποίηση του υλικού μπορεί να δημιουργηθούν πόροι, κενά, εγκλεισμοί ξένων στοιχείων κ.α. Έτσι, ελαττώματα στο εσωτερικό (σε

μικροσκοπικό - ατομικό επίπεδο) ή την εξωτερική επιφάνεια του υλικού μειώνουν την αντίστασή του σε αναπτυσσόμενες τάσεις, αποτελώντας αιτίες ρωγμών ή τοπικής διάβρωσης.

- **Κατασκευαστικές ατέλειες (manufacturing - fabrication deficiencies)**

Οι κατασκευαστικές ατέλειες προκαλούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας ενός συστήματος και είναι πολύ πιθανές όταν είναι ελλιπής ο έλεγχος ποιότητας παραγωγής των επιμέρους δομικών στοιχείων στις διάφορες φάσεις της παραγωγής. Συγκεκριμένα, αποτελούν ελαττώματα που προκαλούνται κατά την επεξεργασία - κατεργασία των υλικών και μπορεί να είναι εσωτερικά (υποεπιφανειακά) ή εξωτερικά (επιφανειακά), καθώς και μικροσκοπικά ή στη μικροδομή τους. Επιπλέον, ατέλειες προκαλούνται και στις συνδέσεις ή συγκολλήσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Αν και μερικές φορές είναι δύσκολο να τις διακρίνουμε από τις ατέλειες υλικού, ωστόσο η αναγνώρισή τους είναι σημαντική για την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών. Όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά, οι ατέλειες που προκαλούνται στο στάδιο της κατασκευής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Wilby & Neale, n.d.):

- Σε αυτές που προκαλούνται όταν το μέταλλο είναι στη μορφή τήγματος (melt defects) κατά τη θερμική κατεργασία του, όπως ασυνέχειες δομής (πόροι, οπές, κοιλότητες, εγκλεισμοί, προσμίξεις, διαχωρισμός μερών), ακατάλληλο σχήμα και διαστάσεις (συρρίκνωση, μεταλλικές προεξοχές, μη ολοκληρωμένη τήξη, γρήγορη πήξη), θερμικές ρωγμές κ.α.

- Και στις ατέλειες που προκαλούνται όταν το μέταλλο είναι σε στερεή μορφή και επιδέχεται περαιτέρω κατεργασία (μηχανική, ηλεκτρολυτική, χημική κ.α.) όπως ρωγμές, παραμένουσες τάσεις, επιφανειακά σημάδια, ασυνέχειες, εγκοπές, ακατάλληλη επικάλυψη και γενικά ανεπιθύμητες μεταλλουργικές αλλαγές στο υλικό.

Στα σημεία που υπάρχουν οι παραπάνω ατέλειες προκαλούνται συνήθως μεταβολές στο τασικό πεδίο και αναπτύσσονται ανεπιθύμητες τάσεις, οδηγώντας το υλικό σε κόπωση (fatigue) και τελικά σε αστοχία.

- **Ελαττώματα συγκόλλησης - συναρμολόγησης των τμημάτων ή εγκατάστασης αυτών (assembly/installation defects)**

Ορισμένα δομικά στοιχεία απαιτούνται να συνδεθούν ή να συγκολληθούν με κάποια άλλα. Εσφαλμένη συγκόλληση, σύνδεση ή ευθυγράμμιση είναι πιθανόν να προκαλέσει αστοχία στην κατασκευή, λόγω του γεγονότος ότι στα σημεία σύνδεσης παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, καθώς και φαινόμενα διάβρωσης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση

αστοχίας (case study) στην 6^η παράγραφο του 5^{ου} κεφαλαίου, όπου ένας τροχός αεροσκάφους αστόχησε λόγω κακής ευθυγράμμισης - σύνδεσης στο σύστημα των τροχών.

- **Συνθήκες λειτουργίας του συστήματος (conditions)**

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός δομικού στοιχείου συστήματος παίζουν καθοριστικό ρόλο στη φυσική και λειτουργική του κατάσταση. Όταν ένα στοιχείο λειτουργεί εκτός των προκαθορισμένων κατά τη σχεδίαση και κατασκευή ορίων λειτουργίας, μπορεί γρήγορα να οδηγηθεί σε φθορά, διάβρωση, κόπωση και τελικά θραύση και αστοχία. Η παρουσία υψηλών περιβαλλοντικών ή εσωτερικών θερμοκρασιών, η υγρασία, η σκόνη, η άμμος, τα άλατα, διάφορες διαβρωτικές χημικές ουσίες - ηλεκτρολύτες, η μηχανική καταπόνηση κ.α. είναι ορισμένες συνθήκες ικανές να καταστήσουν ένα δομικό στοιχείο μη ικανό να εκτελέσει τη λειτουργία του.

- **Έλλειψη συντήρησης ή ακατάλληλη - ανεπαρκής συντήρηση και κακές επισκευές βλαβών (maintenance - repairs)**

Η εκτέλεση περιοδικών προληπτικών εργασιών συντήρησης είναι σημαντική και καθοριστική για τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος, καθώς μπορούν να προβλεφθούν ή να περιοριστούν αρκετοί μηχανισμοί αστοχίας. Κατά τη διάρκεια αυτής, είναι δυνατόν να εντοπιστούν έγκαιρα περιστατικά διάβρωσης, έντονης φθοράς, κόπωσης, ρωγμών κ.α. και το τεχνικό προσωπικό να προβεί σε επιδιόρθωση αυτών προτού καταστούν καταστροφικά για το σύστημα. Επομένως, η μη εκτέλεση συντήρησης ή η ελλιπής πραγματοποίησή της είναι ικανή να οδηγήσει ένα σύστημα σε αστοχία. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζουν και οι επιδιορθώσεις ή αναβαθμίσεις κάποιων δομικών στοιχείων, που στην περίπτωση κακής επισκευής ή μη συμβατότητας του νέου εξαρτήματος μπορεί να προκαλέσει επιπρόσθετη και δευτερογενή αστοχία. Τέλος, οι τεχνικές, οι μέθοδοι και τα εργαλεία ελέγχου και επισκευής πρέπει να είναι τα κατάλληλα ανά περίπτωση για την εκτέλεση της συντήρησης.

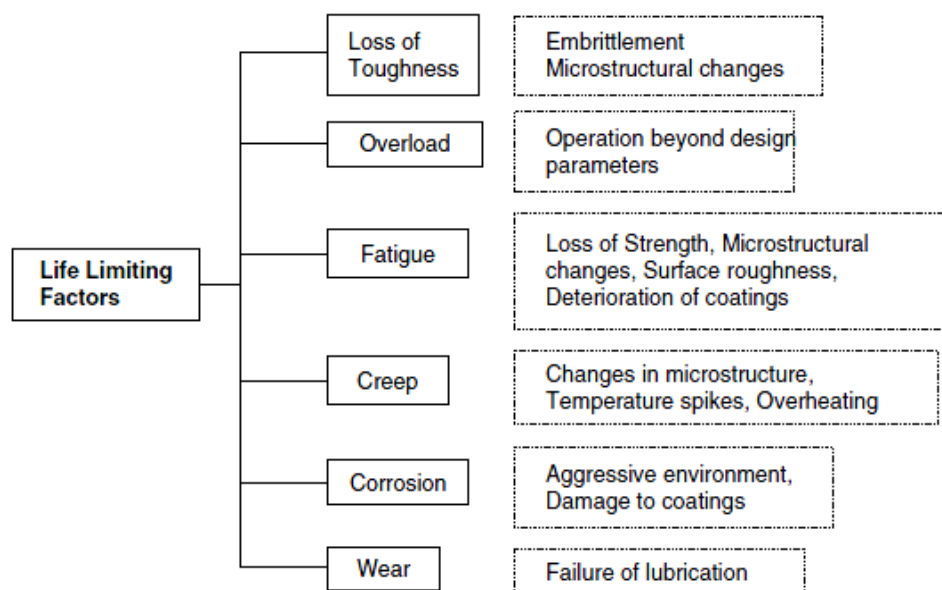
- **Ακατάλληλος έλεγχος - επιθεώρηση του συστήματος (inspection)**

Ο μη κατάλληλος έλεγχος και επιθεώρηση ενός συστήματος, είτε μέσω ανθρώπου είτε μέσω μηχανής δυσχεραίνει τον εντοπισμό σφαλμάτων και ανωμαλιών, ικανών να αποτελέσουν πιθανοί μηχανισμοί και τρόποι αστοχίας. Επιπλέον, η μη εκτέλεση καθημερινών ελέγχων κατά την ενεργοποίηση του συστήματος, καθώς και η έλλειψη περιοδικών επιθεωρήσεων, αυξάνει την πιθανότητα μη εντοπισμού κάποιας αστοχίας ή βλάβης, η οποία μπορεί να εξελιχθεί σε καταστροφική για το σύστημα.

- **Μη ορθός τρόπος χρήσης του συστήματος (use) - επαγγελματική ανικανότητα - αμέλεια**

Πολλές φορές η πρόκληση μιας αστοχίας μπορεί να οφείλεται καθαρά σε χειριστικό ανθρώπινο λάθος, που αν δεν είχε γίνει, το σύστημα δε θα παρουσίαζε κανένα πρόβλημα στη λειτουργία του. Έτσι, ο τρόπος χρήσης ενός συστήματος από τους χειριστές αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την κατάσταση λειτουργίας του και την πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας. Η μη ορθή χρήση μπορεί να οφείλεται σε αμέλεια ή ελλιπή επαγγελματική γνώση και η αστοχία μπορεί να επέλθει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κακού χειρισμού ή αδιαφορίας με το πρώτο σφάλμα χρήσης.

Παρακάτω, παρατίθεται ένα σχεδιάγραμμα με παράγοντες και αίτια (πλαίσια με διακεκομμένη γραμμή) που μπορεί να μειώσουν τη ζωή ενός συστήματος μέσω της πρόκλησης διαφόρων μηχανισμών και τρόπων αστοχίας (πλαίσια με συνεχόμενη γραμμή) (Reddy, 2004):



Σχήμα 26. Παράγοντες που μειώνουν τη ζωή ενός συστήματος

§4.4 Τρόποι και μηχανισμοί αστοχίας (failure modes and mechanisms)

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών τρόπων και μηχανισμών αστοχίας που είναι δυνατόν να παρατηρηθούν σε μεταλλικά και μη δομικά στοιχεία.

Σύμφωνα με τον Collins (1993), «Ως **τρόπος αστοχίας** (*failure mode*) ορίζεται κάθε φυσική διαδικασία που λαμβάνει χώρα και επιδρά στο υλικό, παράγοντας αστοχία». Είναι δηλαδή, το αποτέλεσμα και η επίπτωση που έχει στο σύστημα η επίδραση όλων των αιτιών και παραγόντων (*failure causes and factors*) που είναι ικανοί να προκαλέσουν αστοχία. Με άλλα λόγια, είναι ο τρόπος ή η μορφή με την οποία το υλικό μαρτυρά από μόνο του την αστοχία.

Με τον όρο **μηχανισμοί αστοχίας** (*failure mechanisms*) εννοούμε τις φυσικές, χημικές, ή μεταλλουργικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα και εμφανίζονται - εκδηλώνονται ως «*failure modes*» (Tam & Gordon, 2009).

Οι συνηθισμένοι τρόποι αστοχίας (*failure modes*) που παρατηρούνται κατά τη μελέτη και ανάλυση περιπτώσεων αστοχιών δομικών μεταλλικών στοιχείων συστημάτων είναι οι παρακάτω:

- Κόπωση (*fatigue*)
- Θραύση (*fracture*)
- Διάβρωση (*corrosion*)
- Φθορά (*wear*)
- Παραμόρφωση (*deformation - distortion*)

4.4.1 Κόπωση (*fatigue*)

Η κόπωση αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο αστοχίας των μεταλλικών κατασκευών με ποσοστό εμφάνισης που φτάνει το 90% (Makhlouf & Aliofkhazraei, 2016).

Ο ορισμός της κόπωσης σύμφωνα με τους Fuchs & Stevens (1980) είναι ο εξής: «Μία τοπική (*localized*) και με διάρκεια (*progressive*) διαδικασία που προκαλεί μόνιμες δομικές αλλαγές σε ένα υλικό. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει εξαιτίας συνθηκών που προκαλούν τάσεις και καταπονήσεις σε μία ή περισσότερες τοποθεσίες και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών (*cracks*) και τη τελική θραύση (*complete rupture*) του δομικού στοιχείου μετά από έναν επαρκή αριθμό κύκλων φόρτισης»

Όπως αναφέρει ο Affonso (2006) τέσσερις λέξεις κλειδιά πρέπει να σημειωθούν:

- **Progressive** (με διάρκεια), δηλαδή απαιτείται μια συγκεκριμένη περίοδο χρόνου για να αναπτυχθεί - εξελιχθεί η διαδικασία, αν και η τελική θραύση συμβαίνει ξαφνικά χωρίς καμία προειδοποίηση.
- **Localized** (τοπική), καθώς η ρωγμή ξεκινάει από ένα μοναδικό σημείο του δομικού στοιχείου, όταν οι συνθήκες το επιτρέψουν.
- **Complete rupture** (τελική θραύση), όπου είναι η συνέπεια της ρωγμής (crack) όταν αυτή φτάσει σε ένα συγκεκριμένο κρίσιμο μέγεθος. Αυτό το κρίσιμο μέγεθος είναι που προκαλεί τη μη ελεγχόμενη ανάπτυξη της ρωγμής, οδηγώντας τελικά το στοιχείο σε θραύση.

Η κόπωση, δηλαδή, συμβαίνει όταν στο υλικό επιδράσουν τοπικά επαναλαμβανόμενες - κυκλικές τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του υλικού με την πάροδο του χρόνου και την αστοχία του δομικού στοιχείου σε φορτία πολύ χαμηλότερα από εκείνα που σχεδιάστηκε να αντέχει. Συγκεκριμένα, η εναλλαγή των καταπονήσεων που υφίσταται το δομικό στοιχείο δημιουργεί ραβδώσεις στους «κρυσταλλικούς κόκκους» του μετάλλου, οι οποίες στη συνέχεια δημιουργούν τον πυρήνα μιας ρωγμής (μικρορωγμή). Οι μικρορωγμές συνήθως εξελίσσονται σε μακρορωγμές, όπου η εναλλασσόμενη φόρτιση αυξάνει το μήκος τους με την πάροδο του χρόνου και σε συνδυασμό με τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση, οδηγούν τελικά σε αστοχία (Γριμπά, 2010). Ο μηχανισμός της κόπωσης περιλαμβάνει τρία στάδια (Affonso, 2006), (Findlay & Harrison, 2002):

- **1° στάδιο «Initiation of fatigue crack»:** Δημιουργία - έναρξη της ρωγμής σε συγκεκριμένο σημείο. Η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιείται συνήθως σε σημεία που υπάρχουν κατασκευαστικές ατέλειες ή ανωμαλίες του υλικού (πχ ασυνέχειες) και οφείλεται στη συγκέντρωση επαναλαμβανόμενων φορτίων. Το στάδιο αυτό δημιουργίας της πρώτης μικρορωγμής, όπως ο Affonso (2006) αναφέρει, μπορεί να απαιτεί μέχρι και το 90% των κύκλων άσκησης τάσεων για την ολοκλήρωσή του. Οι ρωγμές αυτές δεν είναι συνήθως ορατές με γυμνό μάτι.
- **2° στάδιο «propagation of fatigue crack»:** Διάδοση της ρωγμής λόγω άσκησης κυκλικών εφελκυστικών τάσεων. Στο στάδιο αυτό έχουμε την εμφάνιση μακρορωγμών, εύκολα αναγνωρίσιμων στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου με γυμνό μάτι.
- **3° στάδιο «final catastrophic rupture»:** Τελική απότομη αστοχία - θραύση του υλικού, όπου η αναπτυσσόμενη ρωγμή έχει φτάσει σε τέτοιο κρίσιμο μέγεθος που το υλικό δεν μπορεί πλέον να αντέξει το ασκούμενο φορτίο και τελικά αστοχεί.

Οι αστοχίες λόγω κόπωσης συνήθως αφήνουν χαρακτηριστικά σημάδια στην επιφάνεια θραύσης του δομικού στοιχείου, απ' όπου ο αναλυτής αστοχιών μπορεί να αντλήσει σημαντικές πληροφορίες. Τα πιο γνωστά είναι τα λεγόμενα «beach marks», τα οποία

μπορούν να παρατηρηθούν συνήθως μακροσκοπικά και η μορφή τους μοιάζει με τα σχήματα που αφήνουν τα κύματα στην άμμο. Τα «beach marks» μαρτυρούν τις «προοδευτικές» θέσεις του αναπτυσσόμενου ορίου ρωγμής και είναι το πρώτο αποδεικτικό στοιχείο ότι ο τρόπος ανάπτυξης της ρωγμής είναι η κόπωση. Οι ρωγμές τείνουν να είναι πιο ομαλές κοντά στο σημείο εκκίνησης και σιγά-σιγά γίνονται πιο τραχείς στην επιφάνεια διάδοσης (Berk, 2009).



Σχήμα 27. Μηχανισμός της κόπωσης σχηματικά δεξιά και παράδειγμα θραύσης λόγω κόπωσης αριστερά

Στο σχήμα 27 παρατηρούμε ότι στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής οι ραβδώσεις είναι πιο κοντά μεταξύ τους, ενώ βαθμιαία καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο και απλώνονται εξαιτίας του επαναλαμβανόμενου φορτίου και της μείωσης της αντοχής του υλικού. Μετρώντας τον χώρο που καταλαμβάνει η κάθε ράβδωση στις διάφορες αποστάσεις από το σημείο εκκίνησης μπορούμε να εκτιμήσουμε τον συνολικό αριθμό των κύκλων που οδήγησε σε αστοχία. Αν προσδιορισθεί η αιτία που προκάλεσε την άσκηση επαναληπτικών φορτίων, τότε ο αριθμός των κύκλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για την ανάπτυξη της ρωγμής.

Ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής εξαρτάται από τη φύση του υλικού, τις υπάρχουσες ατέλειες στο υλικό, το μέγεθος και το είδος των επιβαλλόμενων φορτίων και τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες μέσα στις οποίες λειτουργεί το δομικό στοιχείο, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, ύπαρξη χημικού περιβάλλοντος κ.α. Η διάδοση των ρωγμών λόγω κόπωσης μπορεί να προβλεφθεί στο στάδιο της κατασκευής, αρκεί να είναι γνωστός ο συντελεστής έντασης των τάσεων, καθώς και οι δύο σταθερές (ιδιότητες) του υλικού C και n , οι οποίες μας δίνουν τον ρυθμό διάδοσης των ρωγμών σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N (Γριμπά, 2010):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (13)$$

όπου ΔK είναι το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων που αντιστοιχεί στο εύρος της εφαρμοζόμενης φόρτισης. Η παραπάνω σχέση είναι γραμμική σε διπλή λογαριθμική κλίμακα.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή ενός δομικού στοιχείου στην κόπωση είναι οι παρακάτω (Affonso, 2006):

- Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που ασκούνται στο υλικό και η συχνότητα άσκησης.
- Η ύπαρξη ατελειών στη μικροδομή του υλικού, όπως κενά, εγκλωβισμοί ξένων σωμάτων κ.α. και γενικά ασυνέχειες στη δομή των υλικών που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του. Στα σημεία αυτά αναπτύσσονται συνήθως εναπομένουσες τάσεις (residual stresses), γεγονός που ευνοεί την ανάπτυξη μικρορωγμών όταν ασκούνται επιπλέον επαναλαμβανόμενα φορτία.
- Η ύπαρξη ατελειών στην επιφάνεια του υλικού, όπως εγκοπές, εξοχές, κοιλώματα, φθορά κ.α. μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη τάσεων στα σημεία αυτά.
- Η ύπαρξη σημείων σύνδεσης όπως ήλοι, ίνες, κ.α. όπου αναπτύσσονται εναπομένουσες τάσεις.
- Η άσκηση εξωτερικών φορτίων από άλλες επιφάνειες.
- Το είδος της λειτουργίας που επιτελεί το δομικό στοιχείο π.χ. αν εκτελεί περιστροφική κίνηση που προκαλεί δονήσεις στο υλικό.
- Περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία, υγρασία, ύπαρξη χημικών ουσιών κ.α. που ευνοούν την ανάπτυξη διάβρωσης. Η διάβρωση και η αύξηση της θερμοκρασίας είναι υπεύθυνες συνήθως για την ανάπτυξη παραμενουσών και εφελκυστικών τάσεων στο υλικό.

Ο όρος «**Πολυκυκλική Κόπωση**» (**High Cycle Fatigue - HCF**) χρησιμοποιείται στην περίπτωση κόπωσης όπου απαιτούνται περισσότεροι από 1.000 (έως και 10.000) κύκλοι εφαρμογής τάσεων μέχρι την τελική θραύση του υλικού. Στην περίπτωση αυτή, οι μέσες εφαρμοζόμενες τάσεις είναι συνήθως πολύ μικρότερες από τη τιμές εκείνες που απαιτούνται για την κόπωση του υλικού και απαιτείται περισσότερος χρόνος για να εκινήσει η ρωγμή. Επομένως, μακροσκοπικές πλαστικές παραμορφώσεις μπορούν να βρεθούν μόνο στην περιοχή της τελικής θραύσης. Αυτό το είδος κόπωσης συναντάται στα περισσότερα μηχανικά δομικά στοιχεία (Affonso, 2006).

Ο όρος «**Ολιγοκυκλική Κόπωση**» (**Low Cycle Fatigue - LCF**) χρησιμοποιείται για το είδος της κόπωσης όπου απαιτούνται λιγότεροι από 1000 κύκλοι τάσεων για να προκληθεί

θραύση στο υλικό. Σε αυτή την κατηγορία κόπωσης απαιτείται περισσότερος χρόνος για την επέκταση - διάδοση των ρωγμών και οι ασκούμενες τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που απαιτούνται για να αστοχήσει το υλικό. Μακροσκοπικές πλαστικές παραμορφώσεις μπορούν να εντοπιστούν σε οποιοδήποτε σημείο του δομικού στοιχείου. Υλικά με υψηλή ψαθυρότητα εμφανίζουν καλύτερη αντοχή σε LCF, από ότι αυτά με υψηλή αντοχή στη θραύση (Findlay & Harrison, 2002).

Θερμική κόπωση (thermal fatigue): Όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται κυκλικά έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση στο υλικό ενός εναλλασσόμενου πεδίου εσωτερικών τάσεων, λόγω των περιορισμών στην ελεύθερη διαστολή - συστολή του. Το μέγεθος των εσωτερικών αυτών τάσεων που αναπτύσσονται εξαρτάται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (Ψυλλάκη, 2013).

Κόπωση λόγω διάβρωσης (corrosion fatigue): Όταν στο περιβάλλον λειτουργίας του δομικού στοιχείου υπάρχουν διάφοροι διαβρωτικοί παράγοντες, αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της αστοχίας λόγω κόπωσης, δεδομένου ότι τα σημεία τοπικής επιφανειακής διάβρωσης αποτελούν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και για τον λόγο αυτό σημεία ενδεχόμενης έναρξης ρωγμών (Ψυλλάκη, 2013).

Οι ρωγμές λόγω κόπωσης αποτελούν τον κυριότερο τρόπο αστοχίας των δομικών στοιχείων πολλών κατασκευών και κυρίως των αεροσκαφών, παρόλο που ο μηχανισμός αυτός αστοχίας έχει μελετηθεί και κατανοηθεί για πολλά μέταλλα και κράματα. Κατάλληλη επιλογή υλικών και βελτιωμένες τεχνικές σχεδίασης λαμβάνονται υπόψη, αλλά η πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών λόγω κόπωσης δεν έχει εξλειφθεί εντελώς. Έτσι, πολλά δομικά στοιχεία αεροσκαφών κατασκευάζονται με μειωμένο «safe life», ώστε να περιορίσουν τα περιστατικά αστοχίας (McEvily, 2013).

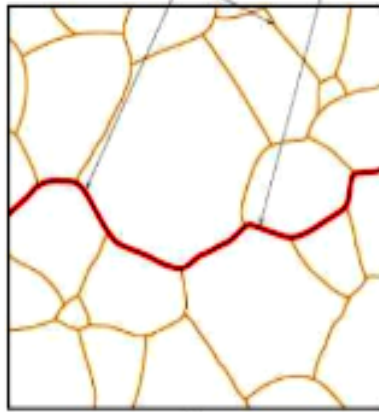
4.4.2 Θραύση (fracture)

Με τον όρο **θραύση** εννοούμε τον διαχωρισμό ενός αντικειμένου σε δύο ή περισσότερα τμήματα λόγω άσκησης σταθερής ή δυναμικής φόρτισης, τα αποτελέσματα της οποίας πιθανώς να επιταχύνονται από την επίδραση χημικών παραγόντων ή/και θερμικών φορτίων (Ψυλλάκη, 2013).

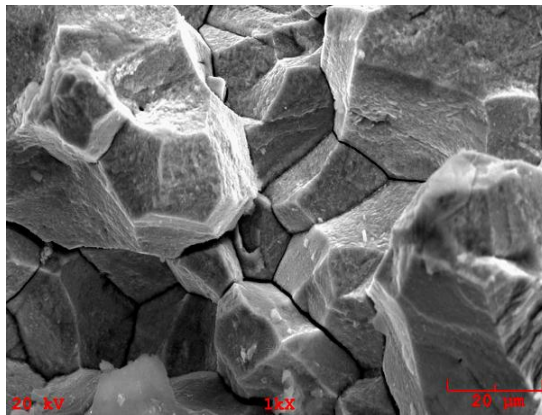
Ο τρόπος θραύσης εξαρτάται από τη μικροδομή του υλικού, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τη χημική σύνθεση και τη θερμομηχανική κατεργασία που έχει υποστεί. Για ένα πολυκρυσταλλικό υλικό, όπως τα μέταλλα, υπάρχουν δύο είδη τρόπου θραύσης (Reddy, 2004):

- Ενδοκρυσταλλικά, κατά μήκος, δηλαδή, των κρυσταλλικών κόκκων (**transgranular mode**).
- Περικρυσταλλικά, κατά μήκος, δηλαδή, των ορίων των κρυσταλλικών κόκκων (**intergranular mode**).

Οι θραύσεις που συμβαίνουν κάτω από την άσκηση κυκλικών φορτίων (**fatigue**) είναι συνήθως ενδοκρυσταλλικές, ενώ αυτές που προκαλούνται από μακροπρόθεσμο **ερπυσμό** (αύξηση θερμοκρασίας) είναι συνήθως περικρυσταλλικές. Επιπλέον, άλλοι τύποι θραύσεων, όπως λόγω ρωγμών από συνδυασμό διάβρωσης και μηχανικής καταπόνησης (**Stress Corrosion Cracking - SCC**) και **hydrogen - induced failures** μπορεί να πραγματοποιούνται και με τους δύο μηχανισμούς (intergranular - transgranular), ανάλογα το υλικό και τις συνθήκες περιβάλλοντος.

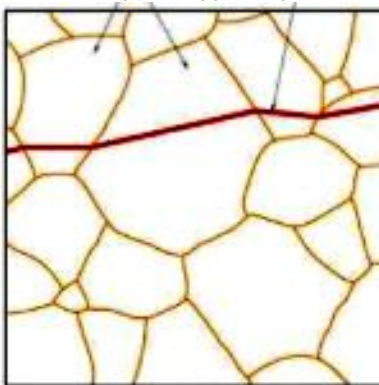


(α)

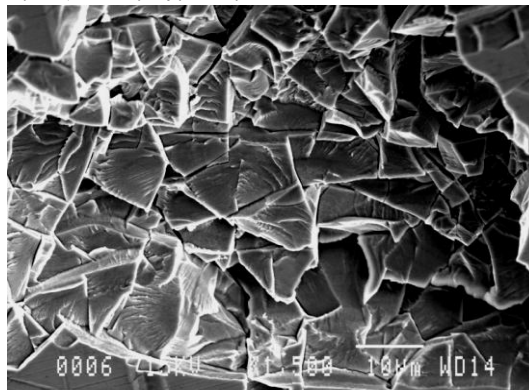


(β)

Σχήμα 28. Intergranular mode of fracture: (α) Σχηματική απεικόνιση θραύσης (β) Ψηφιακή απεικόνιση θραύσης χάλυβα από SEM



(α)



(β)

Σχήμα 29. Transgranular mode of fracture: (α) Σχηματική απεικόνιση (β) Ψηφιακή απεικόνιση θραύσης χάλυβα από SEM

- **Περιοκρυσταλλική θραύση (intergranular fracture)**

Η περιοκρυσταλλική θραύση σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να προκληθεί από φαινόμενα που εξαρτώνται από τον χρόνο, όπως ο «ερπυσμός» (creep), η επιταχυνόμενη τάση (stress rupture), οι θερμικές καταπονήσεις (thermal stresses) κ.α ή από φαινόμενα μη εξαρτώμενα του χρόνου, όπως η προσβολή των ορίων των κρυσταλλικών κόκκων από υγρά μέταλλα ή χημικές ουσίες π.χ. χλωριούχο νάτριο. Επιπλέον, μια περιοκρυσταλλική θραύση μπορεί να προκληθεί σε θερμοκρασίες δωματίου εξαιτίας ευθραυστότητας (embrittlement) των ορίων των κόκκων, διάβρωσης σε συνδυασμό με μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking) ή ανάπτυξης υψηλών παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων (residual tensile stresses), ως αποτέλεσμα ελαττωμάτων που προκαλούνται κατά τη θερμική ή μηχανική κατεργασία του υλικού στο στάδιο της κατασκευής.

- **Ενδοκρυσταλλική θραύση (transgranular fracture)**

Τα χαρακτηριστικά της ενδοκρυσταλλικής θραύσης ποικίλουν ανάλογα το ασκούμενο πεδίο τάσεων, τη φύση του υλικού και την επίδραση του περιβάλλοντος. Η ενδοκρυσταλλική θραύση διακρίνεται σε:

- Ψαθυρό τρόπο θραύσης (**brittle**)
- Όλκιμο (ελατό) τρόπο θραύσης (**ductile**)
- Θραύση λόγω κόπωσης (**fatigue**)
- Θραύση λόγω διάβρωσης σε συνδυασμό με μηχανική καταπόνηση (**SCC** - Stress Corrosion Cracking)

- **Ψαθυρή θραύση (brittle fracture)**

Η ψαθυρή θραύση αποτελεί έναν τρόπο αστοχίας λόγω άσκησης εφελκυστικών δυνάμεων (tensile stresses). Χαρακτηρίζεται από απότομη θραύση του δομικού στοιχείου χωρίς προηγούμενη αξιόλογη μακροσκοπική πλαστική παραμόρφωση και η επιφάνεια της θραύσης είναι σχεδόν επίπεδη. Ωστόσο, σε μικροσκοπική κλίμακα μπορεί να παρατηρηθεί μερική τοπική πλαστική παραμόρφωση και ανάλογα με το ποσοστό της διακρίνονται τρεις τύποι ψαθυρής θραύσης (Ψυλλάκη, 2013):

- Ψαθυρή θραύση τύπου I: Η θραύση ξεκινά από προϋπάρχουσες ρωγμές ή ατέλειες, με διαστάσεις μεγαλύτερες του μεγέθους κόκκων του υλικού. Η τοπική πλαστική παραμόρφωση είναι μηδενική και πρόκειται για το χαρακτηριστικό τύπο θραύσης γυαλιών και κεραμικών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Ψαθυρή θραύση τύπου II: Η θραύση επέρχεται μετά από πλαστική παραμόρφωση μικρής κλίμακας σε μικροσκοπικό επίπεδο και παρατηρείται σε

υλικά χωρίς προϋπάρχουσες μικρορωγμές ή με ρωγμές με μήκος μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή. Εκτός από τη διάδοση της ρωγμής, ενεργοποιείται ταυτόχρονη ολίσθηση σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση επιβολής της τάσης.

- Ψαθυρή θραύση τύπου III: Πρόκειται για οριακό τύπο ψαθυρής θραύσης, αφού συνοδεύεται και από πλαστική παραμόρφωση, η οποία ωστόσο προκαλεί ελάττωση της διατομής του υλικού σε ποσοστό μικρότερο του 10%.

Ορισμένοι φυσικοί ή μεταλλουργικοί παράγοντες που ευνοούν την πρόκληση ψαθυρής θραύσης, εφόσον ασκηθούν αντίστοιχα εφελκυστικά φορτία είναι οι εξής (Findlay & Harrison, 2002):

- Μικροδομή: δομή από μεγάλους κόκκους παράγει συνήθως ψαθυρά υλικά, όπως η υπερβολική σκληρότητα υλικού λόγω μη ορθής θερμικής κατεργασίας.
- Περιβάλλον: χημικά περιβάλλοντα συμβάλλουν στην ψαθυροποίηση του υλικού, κυρίως σε συνδυασμό με αυξημένη άσκηση φορτίων.
- Χαμηλή θερμοκρασία: Αν και οι περισσότεροι χάλυβες είναι ψαθυροί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η ψαθυρότητά τους αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας κάτω από μια συγκεκριμένη και καθορισμένη τιμή. Το ίδιο ισχύει και για άλλα κράματα ή μέταλλα.
- Συγκέντρωση φορτίων: κυρίως σε σημεία που υπάρχουν εγχοπές, συνδέσεις, ατέλειες κ.α.

- **Όλκιμη θραύση (ductile fracture)**

Στην όλκιμη θραύση προηγείται σημαντική πλαστική παραμόρφωση του υλικού κοντά στην επιφάνεια θραύσης. Η παραμόρφωση αυτή, που λαμβάνει χώρα στην πλειοψηφία των μεταλλικών υλικών, εκδηλώνεται με τη δημιουργία «λαιμού», ενώ η ρωγμάτωση και η τελική θραύση επέρχεται με συνένωση μικροκενών.

4.4.3 Διάβρωση (corrosion)

Με τον όρο **διάβρωση** ενός μετάλλου εννοούμε το σύνολο των πολύπλοκων χημικών ή ηλεκτροχημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό υπό την επίδραση του άμεσου περιβάλλοντος. Με τη διάβρωση προκαλείται αλλοίωση στο υλικό, με αποτέλεσμα τη χειροτέρευση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του. Έτσι, η διάβρωση οδηγεί συνήθως σε αστοχία (θραύση) όταν το υλικό έχει καταστραφεί σε τέτοιο βαθμό που δεν μπορεί πλέον να αντέξει τα ασκούμενα φορτία ή έχει μετατραπεί σε τέτοια ευάλωτη μορφή που να είναι

επιρρεπές σε οποιονδήποτε άλλον μηχανισμό αστοχίας (πχ. fatigue). Ο όρος **οξείδωση** χρησιμοποιείται όταν η επιφάνεια των μετάλλων έρθει σε επαφή με αέριο υψηλής θερμοκρασίας (oxidation). Επιπλέον για τα ηλεκτρονικά - ηλεκτρικά συστήματα, η διάβρωση αυξάνει την ηλεκτρική τους αντίσταση, γεγονός που τα οδηγεί συνήθως σε αστοχία (Reddy, 2004), (Berk, 2009), (Ψυλλάκη, 2013).

Αναλόγως, τα **πολυμερή** ενδέχεται να υποστούν **φυσική αποσύνθεση**, δηλαδή καταστροφή του μακρομοριακού τους πλέγματος, **ατμοσφαιρική αποσύνθεση**, λόγω της επίδρασης του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ή του όζοντος, **φωτοαποδόμηση**, υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, **θερμική αποσύνθεση** ή/και **βιοαποδόμηση**, λόγω της δράσης ενζύμων και μικροοργανισμών. Αντιθέτως, τα **κεραμικά** υλικά που αποτελούν στην πλειοψηφία τους ισχυρές ετεροπολικές ενώσεις μετάλλων με αμέταλλα είναι σχεδόν απρόσβλητα από τις συνήθεις χημικές δράσεις για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (Ψυλλάκη, 2013).

Οι αποκτούμενες γνώσεις για τον τρόπο λειτουργίας και τα είδη της διάβρωσης, καθώς και η επιλογή του καταλληλότερου υλικού που εμφανίζει σημαντικό βαθμό αντοχής στη διάβρωση για συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργίας, αποτελούν την αρχή για τον περιορισμό αυτού του τρόπου αστοχίας. Επιπλέον, ήδη από το στάδιο της κατασκευής το μέταλλο πρέπει να προστατεύεται από τις βλαβερές επιδράσεις του περιβάλλοντος που το περιβάλλει. Η επιβαλλόμενη προστασία επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, όπως με την εισαγωγή συγκεκριμένων στοιχείων στη βάση του μετάλλου, τη δημιουργία κραμάτων ανθεκτικών στη διάβρωση, την προσθήκη επιφανείας επικάλυψης με χημικό ή μεταλλικό τρόπο ή με βαφή κ.α. Όταν η εφαρμοζόμενη προστασία αστοχήσει, τότε μια σειρά από διαφορετικές μορφές διάβρωσης μπορεί να αναπτυχθεί.

Ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση είναι οι εξής:

- Η δραστηριότητα του μετάλλου
- Η θερμοκρασία του μετάλλου
- Η ανομοιογένεια της επιφάνειας του υλικού
- Η δημιουργία παθητικών στρωμάτων στην επιφάνεια του υλικού
- Η οξύτητα του περιβάλλοντος του μετάλλου
- Η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος
- Οι συγκεντρώσεις οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον του μετάλλου
- Η θερμοκρασία, η υγρασία, οι καιρικές συνθήκες και οι ρύποι της ατμόσφαιρας
- Η ταχύτητα ροής του ρευστού (αέρας ή υγρό) που περιβάλλει το μέταλλο.

Το είδος της διάβρωσης εξαρτάται κυρίως από τη φύση του μετάλλου, την κατεργασία που έχει υποστεί, το σχήμα και το μέγεθός του, το είδος της λειτουργίας που επιτελεί, τις

περιβαλλοντικές συνθήκες κ.α. Οι βασικότερες μορφές διάβρωσης που παρατηρούνται σε δομικά στοιχεία οπλικών συστημάτων είναι οι παρακάτω:

- Ομοιόμορφη/Εκτεταμένη Διάβρωση (Uniform or General Corrosion)
- Γαλβανική ή Ηλεκτροχημική Διάβρωση (Galvanic Corrosion)
- Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion)
- Διάβρωση Χαραγών ή Ρωγμών (Crevice Corrosion)
- Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)
- Επιλεκτική Διάβρωση (Selective Leaching Corrosion)
- Διάβρωση εκ τριβής (Erosion Corrosion - Fretting Corrosion)
- Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση - Διάβρωση Κόπωσης (Stress Corrosion - Corrosion Fatigue)
- Διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας (High - Temperature Corrosion)
- Διάβρωση προκαλούμενη από μικροοργανισμούς (Microbiologically - Influenced Corrosion (MIC))

Η διάβρωση εμφανίζεται με διάφορες μορφές και μπορεί να προκληθεί από διάφορες αιτίες και παράγοντες. Μπορεί να είναι εξωτερική (εκτεταμένη ή τοπική), εσωτερική ή σε διεπαφές - ενώσεις ή να είναι αποτέλεσμα εξωτερικών παραγόντων (μηχανικών, θερμικών, χημικών, ηλεκτροχημικών, φυσικών κ.α.) (Multiple, 2011), (Findlay & Harrison, 2002), (Ψυλλάκη, 2013).

- **Ομοιόμορφη/Εκτεταμένη Διάβρωση (Uniform/General Corrosion)**

Η ομοιόμορφη διάβρωση προκαλείται όταν μια χημική ή ηλεκτροχημική δράση εξαπλωθεί ομοιόμορφα στο σύνολο ή στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας (ταχύτητα διάβρωσης ίδια), με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός ομοιόμορφου, περίπου ισόπαχου, στρώματος προϊόντος διάβρωσης στην επιφάνεια του μετάλλου.



Σχήμα 30. Παράδειγμα ομοιόμορφης διάβρωσης

- **Γαλβανική ή Ηλεκτροχημική Διάβρωση (Galvanic Corrosion)**

Η γαλβανική ή ηλεκτροχημική διάβρωση αποτελεί μια από τις δραστικότερες μορφές διάβρωσης και παρατηρείται όταν δύο διαφορετικής φύσεως μέταλλα ή κράματα έρχονται σε επαφή ενώ εμβαπτίζονται σε ένα αγωγίμο υγρό, τον ηλεκτρολύτη (διαβρωτικό ή αγωγίμο περιβάλλον). Τότε, το λιγότερο ευγενές (χημικά ενεργό) υλικό, η άνοδος, υφίσταται έντονη διάβρωση, ενώ το περισσότερο ευγενές (χημικά αδρανές) υλικό, η κάθοδος, παραμένει σχετικά αλώβητο.

Η διάβρωση αυτή μπορεί να αναγνωρισθεί μόνο από την έντονη αλλοίωση που υπάρχει στο σημείο επαφής των δύο διαφορετικών μετάλλων, ενώ στην υπόλοιπη επιφάνειά τους δεν παρατηρείται καμία μεταβολή. Γι' αυτό, πολλές φορές εντοπίζεται μόνο σε περιπτώσεις αποσυναρμολόγησης και επιθεώρησης διαφόρων στοιχείων ή αφού αστοχήσει το υλικό.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη φύση της γαλβανικής διάβρωσης είναι: η διαφορά στην «ευγένεια» των δύο μετάλλων, η αναλογία της κοινής επιφάνειας μεταξύ τους και η αγωγιμότητα του περιβάλλοντος. Όσο πιο κοντά βρίσκονται τα δύο μέταλλα αναφορικά με την ευγένειά τους, τόσο πιο μικρή είναι η πιθανότητα εκδήλωσης γαλβανικού φαινομένου, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της ανόδου, τόσο εντονότερη είναι η διάβρωση.

Η γαλβανική διάβρωση είναι αποτέλεσμα κακής σχεδίασης και λανθασμένης επιλογής υλικού. Για παράδειγμα, οι ανοξείδωτοι χάλυβες θεωρούνται ευγενέστεροι έναντι των άλλων μετάλλων και επομένως αποτελούν την κάθοδο στις περισσότερες γαλβανικές ενώσεις, προκαλώντας εντονότερη διάβρωση σε υποδεέστερα μέταλλα όπως ο κοινός χάλυβας, ο χαλκός, ο σίδηρος και ο ορείχαλκος.



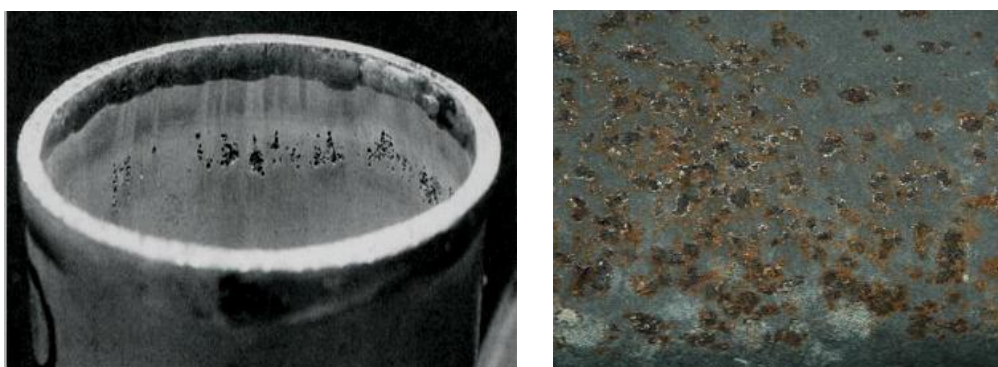
Σχήμα 31. Παράδειγμα γαλβανικής διάβρωσης

- **Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion)**

Αποτελεί μια μορφή τοπικής διάβρωσης περιορισμένης έκτασης (μικρές διακριτές περιοχές), σε αντίθεση με την εκτεταμένη διάβρωση. Συμβαίνει όταν συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας του μετάλλου, όπως μικρές οπές - κοιλότητες, γίνουν ανοδικά, ενώ το

υπόλοιπο μέρος αυτής καθοδικό, προκαλώντας μια τοπική γαλβανική αντίδραση. Η αλλοίωση της μικρής αυτής περιοχής διατρυπά το μέταλλο σχηματίζοντας εσοχές γεμάτες σε οξείδια (διακόρευση), που μπορούν να προκαλέσουν στο υλικό αστοχία. Η υγρασία ή η συνεχής επαφή με επιθετικό υγρό περιβάλλον (πχ NaCl), καθώς και κάποιες μικροεκδορές της επιφάνειας μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση με βελονισμούς. Μερικές φορές η διάβρωση αυτή οδηγεί σε διάβρωση χαραγών ή ρωγμών (crevice corrosion).

Αυτό το είδος διάβρωσης είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευτεί κατά τη διάρκεια μιας επιθεώρησης ρουτίνας, λόγω του ότι είναι σχετικά μικρή και μπορεί να καλύπτεται από προϊόντα διάβρωσης τύπου σκόνης. Συνήθως, εμφανίζεται σαν «νέφος» πολλών μικρών σκουρόχρωμων στιγμάτων στην επιφάνεια, όπως στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 32. Διάβρωση με βελονισμούς στο εσωτερικό αγωγού από ανοξείδωτο χάλυβα

- **Διάβρωση Χαραγών ή Ρωγμών (Crevice Corrosion)**

Όμοια με τη διάβρωση με βελονισμούς, η διάβρωση χαραγών ή ρωγμών συμβαίνει σε συγκεκριμένη περιοχή και όχι σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου. Είναι γνωστή και ως διάβρωση κενών ή διακένων ή σχισμών ή διαχωριστικών επιφανειών (crack ή cranny corrosion), διότι παρατηρείται συνήθως σε υπάρχουσες σχισμές, κοιλότητες, συγκολλήσεις επιφανειών, συνδέσμους, καλυπτόμενες επιφάνειες και επαφές μετάλλων με μη μεταλλικά υλικά, όπως ροδέλες στεγανοποίησης, τσιμούχες, σφιγκτήρες, πριτσίνια κ.α.

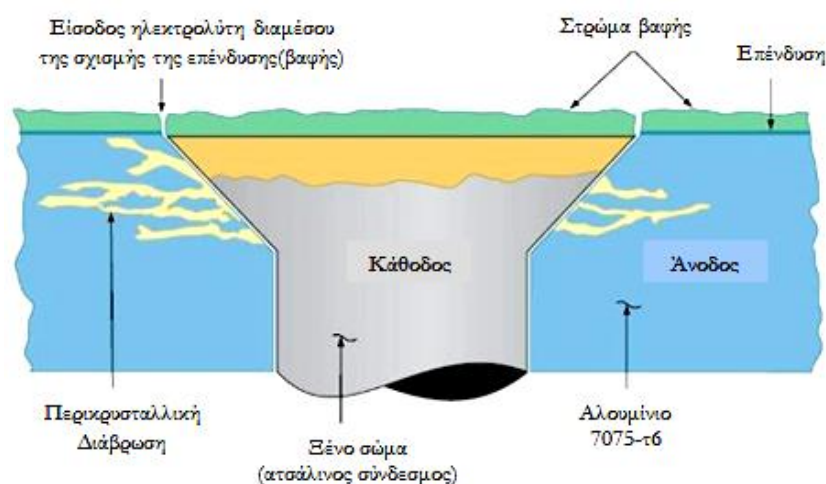


Σχήμα 33. Παραδείγματα διάβρωσης χαραγών ή ρωγμών σε αγωγό και μεταλλικό δακτύλιο

- **Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)**

Αυτό το είδος της διάβρωσης οφείλεται σε χημική ή ηλεκτροχημική επίθεση στα διαχωριστικά όρια των κρυσταλλικών κόκκων ενός μετάλλου (κυρίως κράματος), τα οποία βρίσκονται σε ασταθέστερη κατάσταση απ' ό,τι οι κόκκοι. Αυτό συμβαίνει συνήθως στα σημεία που υπάρχει ανομοιογένεια στο εσωτερικό του κράματος, η οποία προκαλείται κυρίως κατά τη διαδικασία παραγωγής των κραμάτων (μη κατάλληλη θέρμανση - ψύξη του υλικού) ή από την παρουσία ξένων υλικών στο κυρίως σώμα.

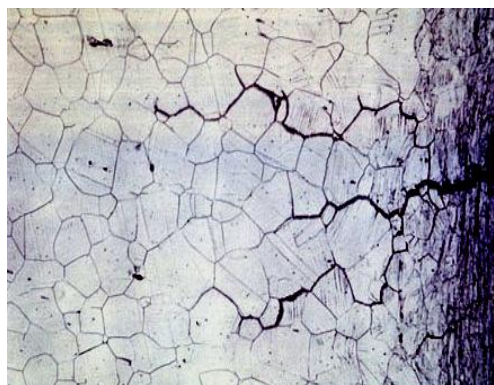
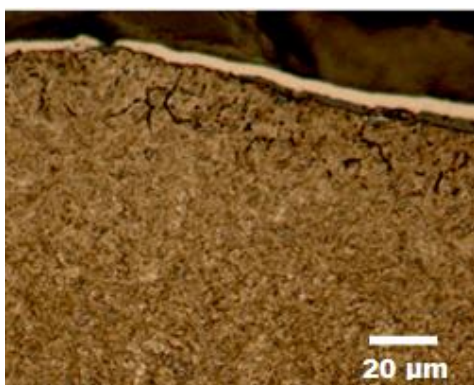
Συγκεκριμένα, το ξένο σώμα ή το σημείο όπου υπάρχει η ανομοιογένεια λειτουργεί ως άνοδος ή κάθοδος στην παρουσία ηλεκτρολύτη. Όταν λειτουργεί ως άνοδος διαβρώνεται αυτό, ενώ όταν λειτουργεί ως κάθοδος η διάβρωση εξαπλώνεται στις διαχωριστικές επιφάνειες των κρυστάλλων, που διαβρώνονται συνήθως πιο εύκολα απ' ό,τι το κυρίως μέρος του μετάλλου (κρυσταλλικοί κόκκοι).



Σχήμα 34. Περικρυσταλλική διάβρωση σε αλουμίνιο

Τα κράματα αλουμινίου και μερικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι συνήθως πιο επιρρεπή στην περικρυσταλλική διάβρωση. Το πόσο ευαίσθητο είναι ένα κράμα αλουμινίου εξαρτάται από την ποιότητα της κρυσταλλικής δομής του, που με τη σειρά της διαμορφώνεται κατά τη μεταλλουργική και θερμική κατεργασία του υλικού. Κατάλληλες διεργασίες προστατεύουν το μέταλλο σε αυτού του είδους τη διάβρωση, που πλήττει συνήθως κράματα Al - Mg - Cu.

Τέλος, η διάβρωση αυτού του είδους δε φαίνεται εκ πρώτης όψεως και γι' αυτό είναι και επικίνδυνη. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις σοβαρής περικρυσταλλικής διάβρωσης είναι πιθανό η επιφάνεια του μετάλλου να υποστεί αποφλοιώση, λόγω της στατικής πίεσης που ασκεί η διάβρωση.



Σχήμα 35. Παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης σε ανοξείδωτο χάλυβα

- **Επιλεκτική Διάβρωση (Selective Leaching Corrosion)**

Η επιλεκτική διάβρωση παρατηρείται σε υλικά (κράματα) που αποτελούνται από διαφορετικά στοιχεία, καθώς λόγω της διαφορετικής γαλβανικής συμπεριφοράς τους αυτά διαβρώνονται κατ'επιλογή διαφορετικό τρόπο. Το λιγότερο ευγενές μέταλλο (στοιχείο) διαβρώνεται μέσω ενός μικροσκοπικής κλίμακας γαλβανικού διαβρωτικού μηχανισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επιλεκτική απομάκρυνση του ψευδάργυρου Zn (dezincification) από κράματα 30% Zn - 70% Cu (ορείχαλκος). Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός πορώδους και λεπτού υλικού με βάση τον χαλκό και η αλλαγή του χρώματος του ορείχαλκου από κιτρινωπό σε κοκκινωπό (χαλκός) (σχήμα 36).



(α) Ορείχαλκος



(β) Χυτοσίδηρος

Σχήμα 36. Παράδειγμα επιλεκτικής διάβρωσης

- **Διάβρωση εκ τριβής (Erosion Corrosion - Fretting Corrosion)**

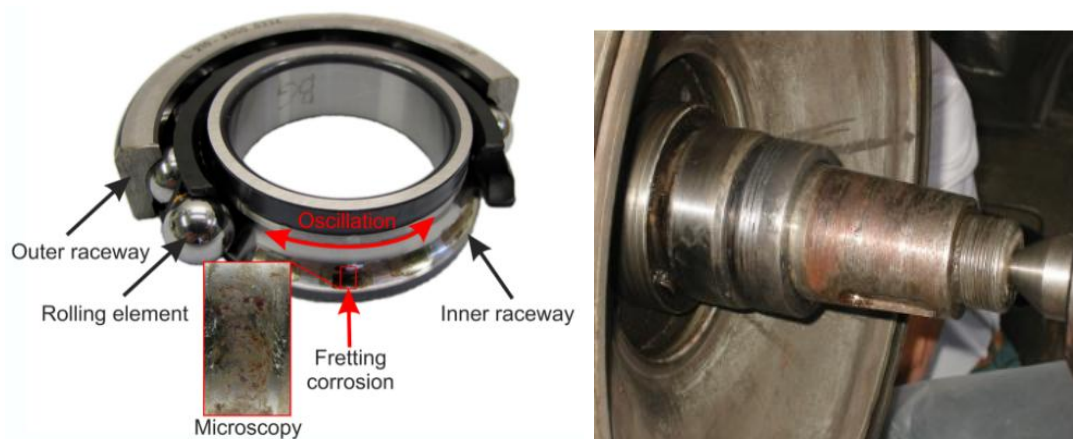
Η διάβρωση εκ τριβής αποτελεί ένα είδος αποδόμησης μιας μεταλλικής επιφάνειας εξαιτίας μηχανικής δράσης, συνήθως υπό την επίδραση υγρών ή αερίων. Η γρήγορη ροή (ταχύτητα) υγρών ή αερίων σωματιδίων (φυσάλιδες, σταγονίδια κ.α.) προκαλεί τριβή στις

εξωτερικές επιφάνειες των μετάλλων, με αποτέλεσμα να καταστρέφονται και να αφήνουν τις εσωτερικές επιφάνειες εκτεθειμένες σε διάβρωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάβρωση αυτή είναι συνηθέστερη σε μεταλλικές επιφάνειες συστημάτων που επιχειρούν εντός θαλασσινού νερού (προπέλες πλοίων, αμφίβια οχήματα κ.α.).



Σχήμα 37. Παραδείγματα διάβρωσης εκ τριβής

Η «**fretting corrosion**» αποτελεί ένα είδος αποδόμησης μεταλλικής επιφάνειας εξαιτίας της επαφής δύο μεταλλικών επιφανειών οι οποίες βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους (επαναλαμβανόμενη φθορά) ή υπάρχει σχετική δόνηση. Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή προϊόντων τριβής (τύπου σκόνη - μικρά κομμάτια), τα οποία εγκλωβίζονται στην επιφάνεια μεταξύ των δύο μετάλλων, οδηγώντας σε τοπική διάβρωση (οπές). Η διάβρωση αυτή παρατηρείται σε εξαρτήματα που περιλαμβάνουν κάποιο είδος κίνησης, όπως ρουλεμάν, στροφεία, σύνδεσμοι κ.α.



Σχήμα 38. Παραδείγματα διάβρωσης εκ τριβής μεταλλικών επιφανειών

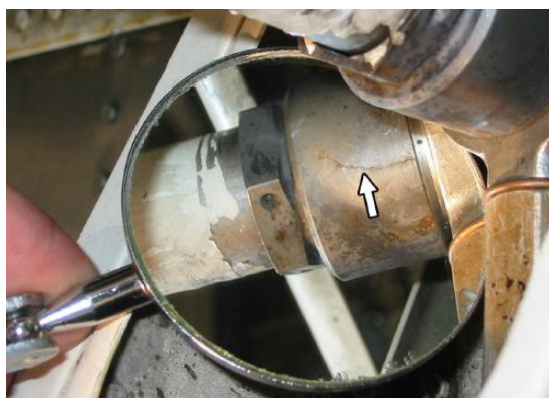
- **Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση - Διάβρωση Κόπωσης (Stress Corrosion - Corrosion Fatigue)**

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση ή δυναμοδιάβρωση είναι το αποτέλεσμα συνδυασμένης επίδρασης εφελκυστικών τάσεων (μηχανικής δράσης) και διαβρωτικού περιβάλλοντος (παρουσία χημικών ουσιών και υψηλές θερμοκρασίες), που οδηγεί συνήθως σε πρόκληση και διάδοση ρωγμών. Τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία ενός συστήματος (εξωτερικές) ή εναπομένουσες τάσεις (εσωτερικές) που δημιουργήθηκαν στο στάδιο της κατεργασίας του μετάλλου (διαμόρφωση, συγκόλληση κ.λπ.) ενδέχεται να είναι τόσο υψηλές, ώστε να προκαλέσουν το φαινόμενο της δυναμοδιάβρωσης. Επίσης, υλικό που είναι εκτεθειμένο στην άσκηση κυκλικού φορτίου, υπάρχει πιθανότητα να αποτύχει σε φορτία αρικτά χαμηλότερα από το όριο θραύσης του, ιδιαίτερα όταν λειτουργεί σε διαβρωτικό περιβάλλον (**corrosion fatigue**). Αξίζει να σημειωθεί ότι η δυναμοδιάβρωση αποτελεί έναν ύπουλο τρόπο αστοχίας, αφού μπορεί να συμβεί και χωρίς άσκηση υψηλών φορτίων.

Οι αστοχίες λόγω διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση χαρακτηρίζονται από έλλειψη πλαστικής παραμόρφωσης, παρουσία πολλών δευτερευουσών ρωγμών και προϊόντων διάβρωσης. Ρωγμές λόγω δυναμοδιάβρωσης παρατηρούνται σε πολλά μεταλλικά στοιχεία, ωστόσο είναι χαρακτηριστικό του αλουμινίου, του χαλκού, του ανοξείδωτου χάλυβα και των υψηλής αντοχής κραμάτων χάλυβα. Στους ανοξείδωτους χάλυβες η επίδραση της δυναμοδιάβρωσης λαμβάνει τη μορφή ψιλών διακλαδωμένων ρωγμών και συχνά κάνει την εμφάνισή της αιφνίδια και με γοργό ρυθμό εξάπλωσης.



(α) Φυσίγγιο



(β) Μεταλλική επιφάνεια εξαρτήματος

Σχήμα 39. Παράδειγμα διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση

Ψαθυροποίηση από Υδρογόνο (Hydrogen Embrittlement)

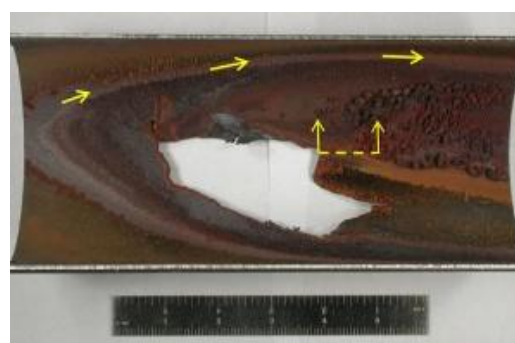
Αποτελεί έναν μηχανισμό αστοχίας που οφείλεται στην αποθήκευση ή απόρριψη ατομικού υδρογόνου στα μέταλλα, συνήθως σε συνδυασμό με την άσκηση εφελκυστικών ή

εναπομενουσών τάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περικρυσταλλικών ή ενδοκρυσταλλικών ρωγμών και την εμφάνιση διάβρωσης σε αυτές. Πηγές ατομικού υδρογόνου είναι: τα διαλύματα χημικού καθαρισμού της επιφάνειας, τα διαλύματα ηλεκτρολυτικής εναπόθεσης, η ύπαρξη ατμόσφαιρας υπέρθερμων ατμών κ.λπ. Η πιθανότητα ψαθυροποίησης από υδρογόνο μειώνεται με τη θέρμανση του υλικού, οπότε το υδρογόνο απομακρύνεται (εκροφάται) διαμέσου της επιφάνειάς του. Η αστοχία αυτή παρατηρείται σε υψηλής αντοχής χάλυβες (>1100 Mpa).

- **Διάβρωση υψηλής θερμοκρασίας (High - Temperature Corrosion)**

Οι καύσεις υγρών ή υγραερίων που πραγματοποιούνται σε διάφορα δομικά στοιχεία, όπως μηχανές εσωτερικής καύσης, τουρμπίνες κ.α. δημιουργούν θερμές αέριες μάζες οι οποίες με τη σειρά τους πυροδοτούν αντιδράσεις ανάμεσα στα κραματικά στοιχεία και τα στοιχεία που συγκροτούν τα αέρια. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πρόκληση στρωμάτων από ενώσεις στοιχείων που είναι λιγότερο προστατευμένα στην υψηλή θερμοκρασία (χαμηλό σημείο τήξης) και τη διάβρωση.

Η διάβρωση αυτή εμφανίζεται με ποικίλους τρόπους ανάλογα το εύρος των θερμοκρασιών, τον χρόνο έκθεσης του μετάλλου, το μίγμα των αερίων κ.α. (π.χ. οξείδωση, διάβρωση λόγω σουλφιδίων ή αλογόνων, ενανθράκωση, εναζώτωση κ.α.).

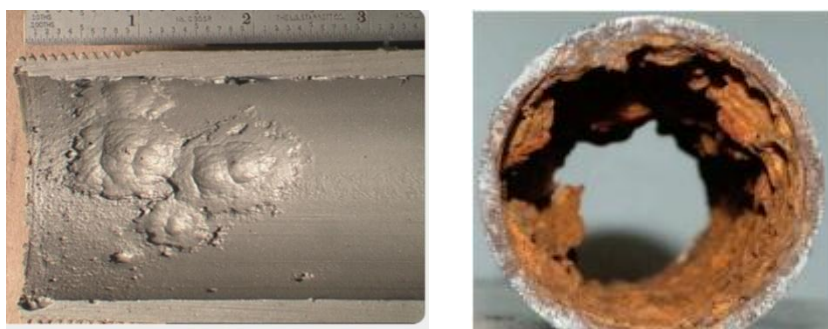


(α) Σύγκριση με αρχική μορφή αγωγού (β) Εσωτερική επιφάνεια αγωγού
Σχήμα 40. Παράδειγμα διάβρωσης αγωγών αλουμινίου σε υψηλή θερμοκρασία

- **Διάβρωση προκαλούμενη από μικροοργανισμούς (Microbiologically - Influenced Corrosion - MIC)**

Η MIC δεν αποτελεί έναν νέο μηχανισμό διάβρωσης, αλλά αναφέρεται στην καταστροφική επίδραση ορισμένων μικροοργανισμών σε μεταλλικά (ή και μη μεταλλικά) υλικά. Προκαλείται από διάφορα είδη βακτηρίων τα οποία τρέφονται από θρεπτικά συστατικά που πιθανώς υπάρχουν στις επιφάνειες των υλικών με παρουσία νερού, χώματος

κ.α. Για την εμφάνιση αυτού του είδους της διάβρωσης απαιτείται δηλαδή ο συνδυασμός τεσσάρων περιβαλλοντικών συνθηκών: ύπαρξη μεταλλικού ή μη υλικού ως «τόπο φιλοξενίας» των βακτηρίων, ύπαρξη θρεπτικών συστατικών, νερού και οξυγόνου (έστω και λίγου). Οι βιολογικές δραστηριότητες των βακτηρίων και τα προϊόντα αυτών μεταβάλλουν την τοπική χημεία (παραγωγή οξέων) των μετάλλων και προκαλούν διάβρωση. Παρατηρείται συνήθως σε συστήματα ψύξης νερού, δεξαμενές υγρών, σιάφη κ.α. Για παράδειγμα, τα «iron-oxidizing» βακτήρια μπορούν να διαβρώσουν μια δεξαμενή πάχους 5 mm από 316 ανοξείδωτο χάλυβα μέσα σε έναν μήνα (Beech et al., 2000)¹¹.



Σχήμα 41. Παράδειγμα MIC διάβρωσης σε αγωγούς

4.4.4 Φθορά (wear)

Ως **φθορά** ορίζεται η ανεπιθύμητη αφαίρεση υλικού (αποδόμηση) από τις στερεές επιφάνειες εξαιτίας μηχανικών δράσεων. Αν και δεν αποτελεί τόσο σοβαρό πρόβλημα όσο οι θραύσεις, ωστόσο η φθορά είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρείται συχνά στο τελευταίο τέταρτο της ζωής ενός εξαρτήματος - δομικού στοιχείου. Το είδος και το μέγεθος της «καταστροφής» εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού, όσο και από τις τιμές των παραμέτρων που ενεργούν σε αυτό (φορτίο, ταχύτητα κ.α) (Affonso, 2006), (Καναβάρης, 2014), (Findlay & Harrison, 2002), (Ψυλλάκη, 2013).

Αξίζει να αναφερθεί ότι, όταν η αποδόμηση ενός υλικού είναι ομοιόμορφη και προοδευτική, τότε οι αστοχίες φθοράς μπορεί να προβλεφτούν. Όταν όμως η φθορά «πυροδοτεί» και ενεργοποιεί άλλους μηχανισμούς αστοχίας π.χ. διάβρωση, τότε μπορεί να έχει καταστροφικά για το σύστημα αποτελέσματα. Επιπλέον, η επιφανειακή καταπόνηση του

¹¹http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/microbiologically_influenced_biological_microbial_corrosion.htm

υλικού λόγω φαινομένων τριβής οδηγεί πάντοτε σε μεταβολή των διαστάσεων ή της μάζας του και γι' αυτό στο στάδιο του σχεδιασμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, προκειμένου να επιβραδυνθεί ή αν όχι να εκμηδενιστεί η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής. Σε πολλές περιπτώσεις, η φθορά αυτή μπορεί να περιοριστεί με σωστή λίπανση, με χρήση φίλτρων, με μηχανική κατεργασία ή ορθότερο σχεδιασμό.

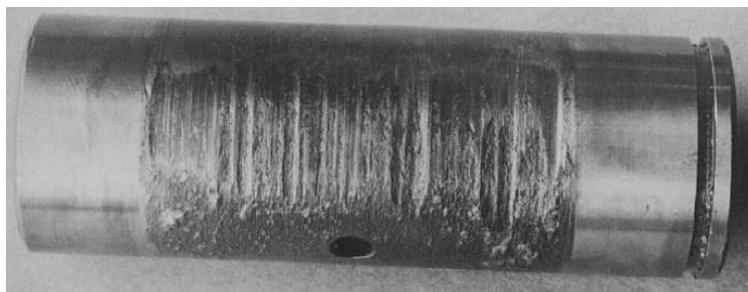
Υπάρχουν πολλά είδη φθοράς, τα κυριότερα των οποίων είναι τα εξής:

- Φθορά Τριβής (Abrasive Wear)
- Φθορά Πρόσφυσης (Adhesive Wear)
- Μηχανική Φθορά (Erosion Wear)
- Φθορά Επαφής (Fretting Wear)
- Άλλα είδη

- **Φθορά Τριβής (Abrasive Wear)**

Προκαλείται είτε όταν μια τραχεία και σκληρή επιφάνεια ολισθαίνει επί μαλακότερης, δημιουργώντας μια σειρά από αύλακες/αμυχές πάνω σε αυτήν (κοπή) είτε όταν τραχύ ψήγματα παγιδεύονται μεταξύ των επιφανειών κατά τη διάρκεια της κίνησης. Έτσι, η φθορά τριβής διακρίνεται εύκολα από τους αύλακες στην επιφάνεια του υλικού, οι οποίοι προκαλούνται κατά τη φορά της κίνησης των επιφανειών. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατηγορίας φθοράς είναι η παραγωγή θερμότητας λόγω της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών. Ορισμένα μέτρα περιορισμού της φθοράς λόγω τριβής είναι τα εξής:

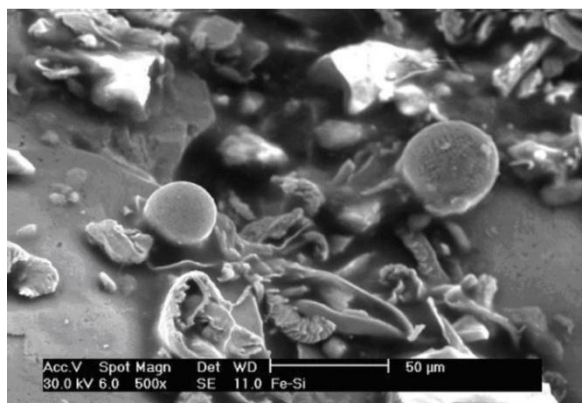
- Αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας. Ιδιαίτερη όμως προσοχή, καθώς η αύξηση της σκληρότητας αυξάνει ταυτόχρονα την πιθανότητα ψαθυρής θραύσης.
- Απομάκρυνση ξένων μορίων.
- Αντικατάσταση φθαρμένων μερών. Ένας πρακτικός τρόπος αντιμετώπισης της φθοράς είναι η σχεδίαση δομικών στοιχείων που να μπορούν να αντικαθίστανται εύκολα όταν φθαρούν.



Σχήμα 42. Φθορά τριβής σε χαλύβδινη επιφάνεια εξαρτήματος

- **Φθορά Πρόσφυσης (Adhesive Wear)**

Είναι η μορφή της φθοράς γνωστή και ως «sliding wear», που επέρχεται όταν δύο λείες συμπαγείς επιφάνειες ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη κάτω από την άσκηση συγκεκριμένου φυσιολογικού φορτίου. Η ολίσθηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τμήματα από την μια επιφάνεια να αποκολλούνται και να προσφύονται (συγκολλούνται) πάνω στην επιφάνεια του άλλου δομικού στοιχείου, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο δεσμούς πρόσφυσης (μοριακούς) στα σημεία επαφής¹².



Σχήμα 43. Ψήγματα χαλκού προσκολλημένα σε χαλύβδινη επιφάνεια λόγω φθοράς πρόσφυσης - απεικόνιση μέσω SEM

Η επίδραση της φθοράς λόγω πρόσφυσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί στην περίπτωση που οι συζυγείς επιφάνειες είναι κατασκευασμένες από υλικά που παρουσιάζουν αυξημένη μηχανική αντοχή, ολκιμότητα και δυσθραυστότητα. Έτσι, με κατάλληλη επιλογή υλικών και ορθή διαστασιολόγηση, συνεχής λίπανση της διεπιφάνειας και επιφανειακή ενίσχυση μέσω επικαλύψεων καλύτερης αντιτριβικής συμπεριφοράς, μπορεί να περιορισθεί το φαινόμενο της φθοράς λόγω πρόσφυσης.

- **Μηχανική Φθορά (Erosion Wear)**

Η μηχανική φθορά υφίσταται όταν στερεά ή ρευστά σωματίδια προσκρούουν με υψηλή ταχύτητα πάνω σε μια στερεή επιφάνεια. Υπάρχουν δύο είδη μηχανικής φθοράς: η «**cavitation erosion**» και η «**solid particle erosion**». Η cavitation erosion προκαλείται από πρόσκρουση ρευστών σωματιδίων ή υδρατμών στην επιφάνεια των εξαρτημάτων προκαλώντας τους πλαστική παραμόρφωση και απομάκρυνση υλικού. Όμοια, η solid

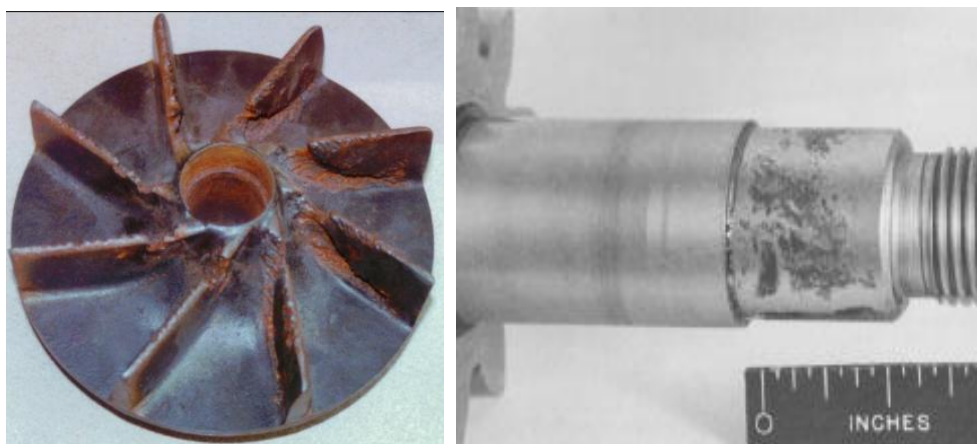
¹² <http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>

particle erosion προκαλεί απομάκρυνση υλικού από τις επιφάνειες λόγω πρόσκρουσης στερεών σωματιδίων με μεγάλη ταχύτητα, σχηματίζοντας πλαστικές παραμορφώσεις που έχουν τη μορφή κρατήρων.

Αυτό το είδος φθοράς παρατηρείται συνήθως σε εξαρτήματα που υπάρχει σχετική κίνηση μορίων ρευστού σε μεταλλική επιφάνεια όπως υδραντλίες, προπέλες, ανεμιστήρες, πτερύγια κ.α.

- **Φθορά Επαφής (Fretting Wear)**

Η φθορά fretting είναι παρόμοια με την adhesive wear από την άποψη ότι στις συνεργαζόμενες επιφάνειες συμβαίνουν μικροσυγκολλήσεις. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι φθορά adhesive συμβαίνει μεταξύ ολισθαίνοντων επιφανειών, ενώ η fretting μεταξύ σχετικά στατικών μεταξύ τους επιφανειών. Παρόλα αυτά, όταν μικρές κινήσεις ή δονήσεις λαμβάνουν χώρα είναι ικανές να προκαλέσουν μικροσυγκολλήσεις και στις δύο επιφάνειες. Η φθορά αυτή παρατηρείται συχνά σε σφιχτές συναρμογές ή σε σταθερές συνδέσεις μέσω μπουλονιών, καρφιών κ.α. Επίσης, αποτελεί σοβαρό πρόβλημα σε άξονες, όπου μπορεί να προκληθεί ρωγμή λόγω κόπωσης στις επιφάνειες επαφής.



Σχήμα 44. (α) Παράδειγμα υδραντλίας με φθορά τριβής
(β) Φθορά επαφής σε άξονα χάλυβα στη επιφάνεια σύνδεσής του.

4.4.5 Παραμόρφωση (deformation - distortion)

Με τον όρο **παραμόρφωση** (deformation) ορίζεται η μόνιμη πλαστική καταπόνηση που προκαλείται όταν ασκούμενα φορτία υπερβούν το όριο ελαστικότητας του υλικού.

Οι αστοχίες παραμόρφωσης ή στρέβλωσης μπορούν εύκολα να αναγνωρισθούν λόγω της μεταβολής του μεγέθους ή του σχήματος του εξαρτήματος. Οι αστοχίες αυτές είναι σημαντικές, διότι μπορούν να οδηγήσουν σε άλλου είδους αστοχίες όπως θραύση (Βλέπε Κεφάλαιο 3). Επιπλέον, η διόρθωσή τους είναι κάτι πολύ δύσκολο, καθώς περιλαμβάνει ενέργειες που απαιτούν λεπτομερή σχεδιασμό, ανάλυση της δομής και γνώση της τεχνολογίας των υλικών (Καναβάρης, 2014), (Berk, 2009).

Τα βασικά είδη παραμορφώσεων είναι τα εξής:

- Ως προς την κατάσταση:
 - Μόνιμη
 - Προσωρινή
- Ως προς το σχήμα του:
 - Τάνυση (stretching)
 - Κάμψη (buckling)
 - Λυγισμό (bending)
 - Στρέψη (twisting)
- Ως προς τις διαστάσεις του στοιχείου:
 - Διαστολή
 - Συστολή



Σχήμα 45. (α) Παραμόρφωση πιστολιού (β) Παραμόρφωση κάμψης σε γρανάτζι

- **Προσωρινή παραμόρφωση**

Τα μέταλλα υπό την επίδραση σχετικά χαμηλών τάσεων υπόκεινται παραμόρφωση, η οποία είναι συχνά παροδική και μεταβατική (ελαστική). Τα περισσότερα δομικά στοιχεία είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν στην ελαστική περιοχή και όταν αποφορτίζονται να επιστρέφουν στο αρχικό τους μέγεθος και σχήμα.

- **Μόνιμη παραμόρφωση**

Η μόνιμη παραμόρφωση (πλαστική) επέρχεται όταν στο δομικό στοιχείο ασκηθούν φορτία μεγαλύτερα του ορίου διαρροής (yield stress). Ανάλογα αν οι ασκούμενες δυνάμεις είναι εφελκυστικές, καμπτικές, διατμητικές ή στρεπτικές προκαλείται και η αντίστοιχη παραμόρφωση.

Τέλος, είναι δόκιμο να παρατεθούν κάποια ποσοστά εμφάνισης ορισμένων μηχανισμών αστοχίας, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από περιπτώσεις ανάλυσης αστοχιών σε κατασκευές και αεροσκάφη του οργανισμού QinetiQ, που συνεργάζεται με το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου και άλλους κρατικούς φορείς (Aliya, n.d.).

Μηχανισμοί αστοχίας (failure mechanisms)	Ποσοστό αστοχίας (%)	
	Γενικά σε μηχανικά δομικά στοιχεία	Σε δομικά στοιχεία αεροσκάφους
Διάβρωση (corrosion)	29	16
Κόπωση (fatigue)	25	55
Ψαθυρή θραύση (brittle fracture)	16	-
Υπαρξη πολλών φορτίων (overload)	11	14
Διάβρωση λόγω υψηλής θερμοκρασίας (high temperature corrosion)	7	2
Διάβρωση με κόπωση (corrosion fatigue)	6	7
Ερπυσμός (creep)	3	-
Φθορά/τριβή/μηχανική (wear/abrasion/erosion)	3	6

Πίνακας 2. Ποσοστά εμφάνισης μηχανισμών αστοχίας

Από τα παραπάνω στοιχεία διαπιστώνουμε ότι η κόπωση (fatigue) αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο και μηχανισμό αστοχίας σε αεροσκάφη (55%), ενώ και σε άλλα μηχανικά δομικά στοιχεία καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση (25%). Η διάβρωση λόγω υψηλής θερμοκρασίας (high temperature corrosion) εμφανίζεται μόνο σε ποσοστό 2%, ενώ δεν παρατηρούνται οι τρόποι αστοχίας της ψαθυρής θραύσης (brittle fracture) και του ερπυσμού (creep) στα αεροσκάφη. Η διάβρωση (corrosion) στα αεροσκάφη αποτελεί τρόπος αστοχίας με μικρότερο ποσοστό (16%) επειδή συνήθως εντοπίζεται πιο εύκολα και μπορεί να επιδιορθωθεί κατά τη διάρκεια της προγραμματισμένης συντήρησης του αεροσκάφους.

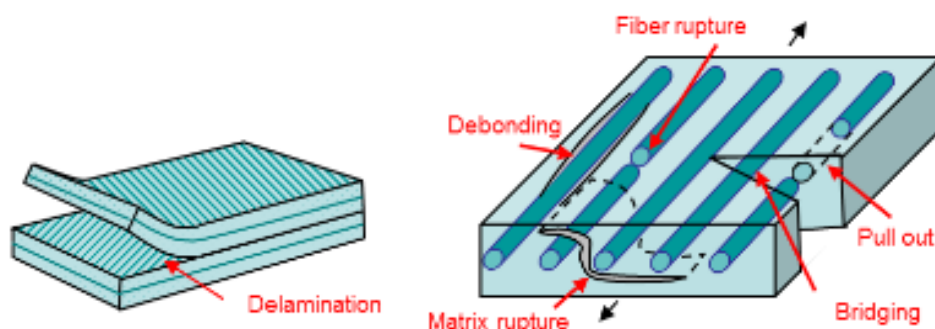
4.4.6 Τρόποι αστοχίας σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά λόγω της διαφορετικότητάς τους σε σχέση με τα άλλα υλικά (μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά) παρουσιάζουν κάποιους επιπλέον τρόπους αστοχίας, οι κυριότεροι των οποίων θα περιγραφούν εν συντομία στην υποπαράγραφο αυτή (Σταμούλης 4, n.d.), (Προκοπάκης, 2017), (Καλογέρη, 2016), (Fink, Bogetti, Klinger, & Gillespie, 2000).

Ο τρόπος με τον οποίο ένα σύνθετο υλικό συνήθως αστοχεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η σύνθεση της μήτρας και των ενισχυτικών υλικών, η φύση της σύνδεσής τους, η κατεύθυνση των ινών, η αλληλουχία των στρωμάτων, η ύπαρξη κενών, το είδος των ασκούμενων φορτίων κ.α. Ως βασικό αίτιο αστοχίας θεωρείται η πρόκληση ελαττωμάτων κατά την κατασκευή, όπως η δημιουργία κενών ή φυσαλίδων αέρα, ο σχηματισμός περιοχών με περίσσεια ή αυξημένη ρητίνη, η μη ευθυγράμμιση ινών, η ύπαρξη περιοχών με ατελή εμποτισμό ινών, η μικρορηγματώση της μήτρας ή της ενίσχυσης κ.α. Επιπλέον, κατά τη χρήση των σύνθετων υλικών επιδρούν και άλλοι μηχανισμοί αστοχίας όπως η διάβρωση, η κόπωση, η φθορά, η πρόκληση ρωγμών από υπερφόρτωση κ.α.

Οι κυριότεροι πιθανοί τρόποι αστοχίας των σύνθετων υλικών είναι οι παρακάτω:

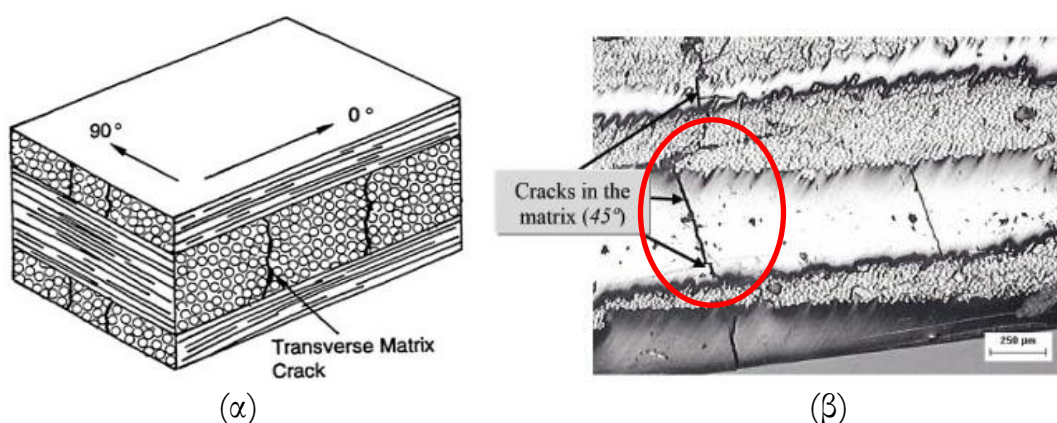
- Πρόκληση ρωγμών στην μήτρα
- Πρόκληση ρωγμών ή παραμόρφωση (λύγισμα) των ινών
- Αποκόλληση - διαχωρισμός των ινών και της μήτρας
- Παραμόρφωση των κόκκων ενίσχυσης
- Πρόκληση ρωγμών στρώματος
- Αποστρωματοποίηση των πολυστρωματικών υλικών (αστοχία στους δεσμούς)



Σχήμα 46. Κυριότεροι τρόποι αστοχίας σύνθετων υλικών

- **Πρόκληση ρωγμών στη μήτρα (matrix cracking)**

Η πρόκληση μικρορωγμών στη μήτρα αποτελεί έναν από τους πιο συνήθεις τρόπους αστοχίας και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Κύρια αίτια αποτελούν συνήθως τα σφάλματα κατασκευής, που οδηγούν στην ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με άσκηση μηχανικών ή θερμικών κυκλικών ή στατικών φορτίσεων μπορεί προκαλέσει μικρορωγμές¹³. Οι μικρορωγμές αυτές, στη συνέχεια είναι πιθανό να εξαπλωθούν και στις ίνες, προκαλώντας τη θραύση αυτών ή να αποτελέσουν οδοί για την είσοδο διαβρωτικών υγρών μέσα στο υλικό.



Σχήμα 47. (α) Σχηματική απεικόνιση ρωγμών σε μήτρα σύνθετου υλικού
(β) Απεικόνιση ρωγμών σε μήτρα σύνθετου υλικού μέσω SEM

- **Πρόκληση ρωγμών ή παραμόρφωση (λύγισμα) των ινών (fiber cracking - deformation)**

Όταν ένα σύνθετο υλικό έχει υποστεί κάποιου είδους ρωγμή, οι ίνες μπορεί να είναι ανέπαφες (Σχήμα 48). Καθώς όμως ανοίγει το εύρος της ρωγμής, οι ίνες βγαίνουν από την μήτρα και είναι πιθανόν να αποκολληθούν από αυτή και να σπάσουν ανάλογα την καταπόνηση που δέχονται.

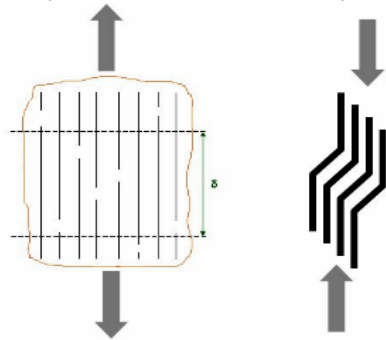


Σχήμα 48. (1) Ανέπαφη ίνα
(2) Ίνα εκτός μήτρας
(3) Αποκόλληση ίνας
(4) Θραύση ίνας

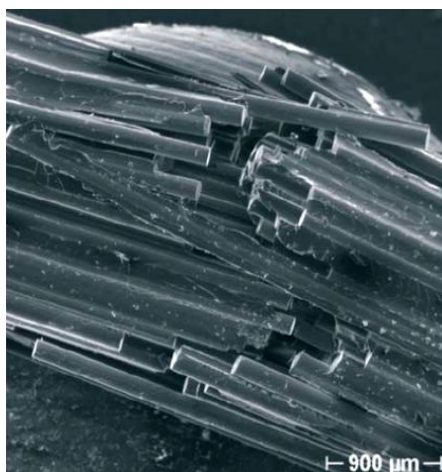
¹³ <https://www.nap.edu/read/9251/chapter/6#23>

<http://docplayer.gr/4776370-Syntheta-ylika-haraktirismos-kai-idiotites.html>

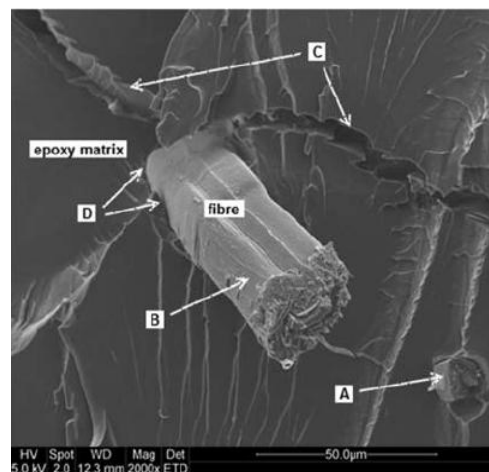
Επιπλέον, οι ίνες είναι δυνατόν να υποστούν παραμόρφωση λόγω άσκησης εφελκυστικών ή καμπικών τάσεων, ικανή να προκαλέσει τη θράυση αυτών.



Σχήμα 49. Παραμόρφωση και θράυση ινών λόγω άσκησης εφελκυστικών και καμπικών τάσεων



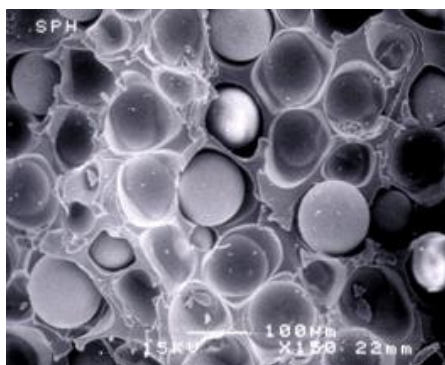
(α)



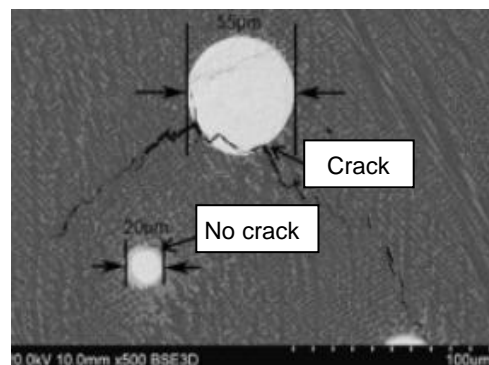
(β)

Σχήμα 50. (α) Απεικόνιση ρωγμών σε ίνες σύνθετου υλικού μέσω SEM
(β) Απεικόνιση αστοχίας σύνθετου μέσω SEM, όπου (Α): θράυση ίνας, (Β) ίνα εκτός μήτρας, (C) θράυση μήτρας και (D) αποκόλληση ίνας

- Παραμόρφωση των κόκκων ενίσχυσης



(α)



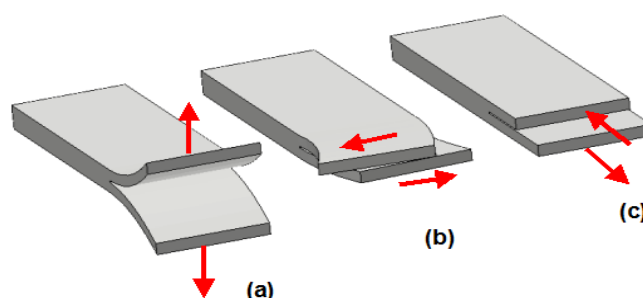
(β)

Σχήμα 51. (α) Παραμόρφωση, (β) Ρωγμή κόκκων ενίσχυσης σύνθετου υλικού

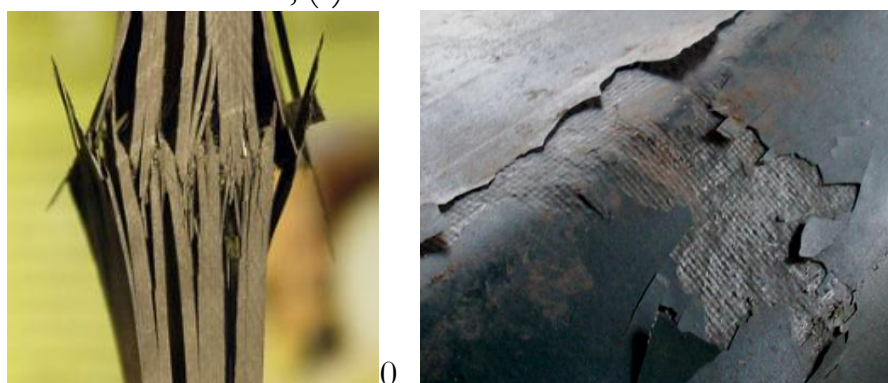
- **Αποστρωματοποίηση - αποφλοΐωση των πολυστρωματικών υλικών (αποκόλληση)**

Η αποκόλληση των πολυστρωματικών υλικών αποτελεί την πιο καταστρεπτική κατάσταση για ένα σύνθετο υλικό λόγω της μεγάλης υποβάθμισης των ιδιοτήτων του. Ο διεπιφανειακός διαχωρισμός που προκαλείται από την αποκόλληση οδηγεί συνήθως σε πρόωρο λυγισμό, διείσδυση υγρασίας, δυσκαμψία, κραδασμούς κ.α.

Η αποστρωματοποίηση οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος. Οι τάσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβιβαστούν από το ένα υλικό στο άλλο (στρώμα), γεγονός που προκαλεί την αποκόλληση του στρώματος με ψαθυρό τρόπο. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι εσωτερική, μεταξύ δύο στρώσεων σύνθετου υλικού ή εξωτερική, μεταξύ στρώματος σύνθετου υλικού και εξωτερικής επιφάνειας. Στην πρώτη περίπτωση, η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της ρητίνης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να μεταβιβασθεί ανά μονάδα διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της εξισωτικής στρώσης με το δομικό στοιχείο.



Σχήμα 52. Delamination Modes (a) Mode I: Normal delamination, (b) Mode II: Shear delamination, (c) Mode III: Shear delamination¹⁴



Σχήμα 53. Παραδείγματα αποστρωματοποίησης σύνθετου υλικού

¹⁴ https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/adyn_comp/adyn_comp_delamination_test.htm

§4.5 Ορισμός της ανάλυσης αστοχιών συστημάτων και ο σκοπός αυτής

Η **ανάλυση αστοχιών συστημάτων** (failure analysis - investigation) αποτελεί μια πολυσύνθετη διαδικασία που έχει ως πρωταρχικό σκοπό τη διευκρίνιση των αιτιών και των παραγόντων που οδήγησαν ένα σύστημα ή τμήμα αυτού σε μια μη αναμενόμενη απώλεια της λειτουργίας του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συστηματικής και προσεκτικής εξέτασης και της πιο μικρής λεπτομέρειας, προκειμένου να εξακριβωθεί το αίτιο της αστοχίας (Aliya, n.d.).

Κάθε ανάλυση είναι μοναδική, μιας και η αστοχία κάθε συστήματος θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μοναδική, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Όσο πιο λεπτομερής και εμπεριστατωμένη είναι η ανάλυση αστοχίας, τόσο πιο κατανοητοί θα είναι οι παράγοντες και τα αίτια που την προκάλεσαν. Επιπλέον, όντας ως μια πολυδιάστατη διαδικασία απαιτεί τη συνεργασία ειδικών με γνώσεις σε διάφορους τομείς.

Επιπλέον, με την εύρεση των αιτιών μιας αστοχίας εξακριβώνεται αν αυτή αποτελεί μεμονωμένο συμβάν ή σύμπτωμα με γενικευμένο χαρακτήρα. Έτσι, εάν έχει γενικευμένο χαρακτήρα, λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα μπορεί να εξασφαλιστεί η μη εμφάνισή της στο μέλλον προς όφελος χρόνου, χρήματος, καθώς και πρόληψης ατυχημάτων. Το χρηματικό όφελος που εξασφαλίζεται από τη μείωση των μελλοντικών αστοχιών και την αποκατάσταση αυτών δικαιολογεί τη διενέργεια αυτής, καλύπτοντας πλήρως το κόστος εκτέλεσής της. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σε περιπτώσεις δικαστικών διερευνήσεων για την απόδειξη ενοχής ή όχι ενός οργανισμού ή ατόμου στην πρόκληση της αστοχίας, κυρίως όταν αυτή συνοδεύεται με απώλεια ζωής ή υγείας. Υπάρχουν και άλλοι αντικειμενικοί σκοποί για τους οποίους μπορεί να εκτελεστεί η ανάλυση αστοχίας συστήματος, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Affonso, 2006):

A/A	Αντικειμενικός Σκοπός	Επικρατούσες Συνθήκες	Κατάσταση Συστήματος
1	Πρόληψη ώστε να μην ξανασυμβεί στο μέλλον	Οτιδήποτε	Έχει υποστεί αστοχία/βλάβη
2	Ανάπτυξη νέου συστήματος	Νέες απαιτήσεις	Σε εξέλιξη- πρωτοτυπία
3	Βελτίωση συστήματος	Κόστος εγγύησης- επισκευής	Σε εξέλιξη
4	Ζητήματα ευθύνης	Επισκευές λόγω οικονομικής/φυσικής ζημιάς ή τραυματισμού/απώλειας υγείας	Έχει υποστεί αστοχία/βλάβη

Πίνακας 3. Αντικειμενικοί σκοποί ανάλυσης αστοχιών

Εκτός από τους αντικειμενικούς σκοπούς, μια ολοκληρωμένη και ακριβής ανάλυση αστοχίας δίνει οδηγίες στον σχεδιαστή, τον μηχανικό και τον χειριστή να εκτελέσουν τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες προκειμένου να θεραπευτεί το πρόβλημα - αστοχία. Επιπλέον, με την ανάλυση αστοχίας ο αναλυτής αποκτά γνώσεις σε τεχνικό, επαγγελματικό και ατομικό επίπεδο, συμβάλλοντας έτσι στην ολοκλήρωσή του. Τα «lessons learned» που εξάγονται κατά την ολοκλήρωση μιας ανάλυσης αστοχίας αποτελούν άλλο ένα κίνητρο εκτέλεσής της.

§4.6 Προσόντα ενός καλού αναλυτή αστοχιών

Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του συστήματος η ανάλυση αστοχίας αυτού μπορεί να διεξαχθεί από ένα άτομο ή ομάδα, αποτελούμενη από ειδικούς στη σχεδίαση, την κατασκευή, την παραγωγή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την επιστήμη των υλικών.

Ο αναλυτής αστοχιών πρέπει να είναι «προικισμένος» με συγκεκριμένα προσόντα, προκειμένου να διεξάγει μια επιτυχημένη ανάλυση αστοχιών, καθώς αυτή αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία. Πρέπει να διαθέτει μια γενική και συνολική γνώση του τομέα που μελετά, κατάλληλη γνώση σχετικών πεδίων, ικανότητα συλλογής πληροφοριών - δεδομένων, οργάνωσης και φιλτραρίσματος αυτών, δεξιότητα επισήμανσης και των πιο μικρών λεπτομερειών, απόλυτη ειλικρίνεια και υπερηφάνεια και πάνω απ' όλα κοινή λογική. Όσον αφορά τα επαγγελματικά προσόντα, πέρα από τη γνώση, πρέπει να έχει και εμπειρία στο σχετικό αντικείμενο και να ενδιαφέρεται για τις τελευταίες επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα του (Reddy, 2004).

Όταν του ανατεθεί η ανάλυση αστοχίας ενός συστήματος ή δομικού στοιχείου θα πρέπει να κατανοήσει πλήρως τη λειτουργία αυτού μέσω διαφόρων πηγών, όπως τεχνικών εγχειριδίων, αναφορών, ακόμα και με συζήτηση με τους χειριστές και του τεχνικούς του συστήματος που αστόχησε. Είναι σημαντικό να γνωρίζει όσο το δυνατόν περισσότερα για το σύστημα, όπως την αρχιτεκτονική και λειτουργική δομή του, τις συνθήκες και το περιβάλλον λειτουργίας του, τα ασκούμενα φορτία, τον τρόπο χρήσης κ.α. Επιπλέον, ως ένας «ιατροδικαστής» θα πρέπει να εξετάζει με κριτική σκέψη όλες τις πληροφορίες που διαθέτει και να απορρίπτει αυτές που δεν είναι σχετικές με την αστοχία που μελετά.

Τέλος, κάνοντας χρήση της σοφίας του και της κοινής λογικής και δρώντας ηθικά και με υπερηφάνεια, θα είναι σε θέση να καταλήξει σε ένα εμπεριστατωμένο αποτέλεσμα εξεύρεσης του αίτιου της αστοχίας που δεν θα εκθέσει αυτόν ή τον οργανισμό για τον οποίο εργάζεται.

§4.7 Διαδικασία ανάλυσης αστοχίας συστημάτων

Η ανάλυση αστοχιών μπορεί να προσεγγιστεί με ποικίλους τρόπους ανάλογα το σύστημα ή το τμήμα αυτού που έχει αστοχήσει, την επιδιωκόμενη εις βάθος προσέγγιση και τον σκοπό αυτής. Υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες ανάλυσης αστοχιών. Κάποιες από αυτές πραγματοποιούνται στο στάδιο της σχεδίασης του συστήματος προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία του και να προβλεφθούν μελλοντικές αστοχίες, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο πρόκλησης ατυχημάτων στο προσωπικό, απώλειας υλικού, πιθανής μόλυνσης του περιβάλλοντος, καθώς και το κόστος των επισκευών. Άλλες, διεξάγονται αφού το σύστημα τεθεί σε λειτουργία και αστοχήσει, με σκοπό την εξεύρεση των αιτιών και των παραγόντων που οδήγησαν σε αυτή και ενδεχομένως την πρόταση ενεργειών θεραπείας - επισκευής. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή επικεντρώνεται στη δεύτερη κατηγορία ανάλυσης αστοχιών, αναπτύσσοντας μια γενική μεθοδολογία και αναλύοντας ενδεικτικά στο 5^ο Κεφάλαιο ορισμένες περιπτώσεις αστοχιών (case studies) που έχουν παρατηρηθεί ή μπορεί να εμφανιστούν σε οπλικά συστήματα.

4.7.1 Μέθοδοι ανάλυσης αστοχιών συστήματος

Στην υποπαράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε μεθόδους ανάλυσης αστοχιών, που ως εργαλείο μπορούν να βοηθήσουν και να οργανώσουν το έργο της ομάδας ανάλυσης. Ωστόσο, η διαδικασία της ανάλυσης αστοχιών προσαρμόζεται ανάλογα με τη φύση της αστοχίας και την επικρατούσα κατάσταση (Reddy, 2004), (Ψυλλάκη, 2013), (Berk, 2009), (Pepi, 2008), (Dennies, 2005), (Aliya, n.d.), (Αποστόλου, 2017).

Η ομάδα ανάλυσης αστοχιών είναι σκόπιμο να μην ακολουθεί μια μόνο «πετυχημένη συνταγή ανάλυσης», ως καθιερωμένη διαδικασία, αλλά να την προσαρμόζει ανάλογα το είδος της αστοχίας και το σύστημα που την εκδήλωσε. Η προσαρμογή αυτή είναι αναγκαία, ιδιαίτερα όταν ο μελετητής εργάζεται σε ανεξάρτητο εργαστήριο και έχει να αντιμετωπίσει αστοχίες μεγάλης ποικιλίας, τόσο σε είδος όσο και σε υλικό. Επιπλέον, η ομάδα ανάλυσης ακολουθώντας συνεχώς μια «συνταγή» με επαναλαμβανόμενα βήματα, μπορεί εύκολα να οδηγηθεί σε ρουτίνα και κατά συνέπεια σε απροσεξία. Παρόλο αυτά, η εκτέλεση συγκεκριμένων βημάτων - σταδίων ενδείκνυται για αναλυτές που έχουν μικρή εμπειρία.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχιών που θα ακολουθηθεί είναι τόσο σημαντική, όσο και η γνώση χρήσης αυτής. Όποια μεθοδολογία και να επιλεγεί, θα πρέπει να καθοριστεί ο τρόπος αστοχίας (failure mode), τα αίτια της αστοχίας (causes of

failure), οι ανωμαλίες του υλικού, καθώς και η μη φυσιολογική λειτουργική κατάσταση του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου μέσω διαφόρων ερευνητικών τεχνικών. Ωστόσο, η ομάδα ανάλυσης δεν θα πρέπει να καταλήγει σε βεβαιωμένα αποτελέσματα σχετικά με τα αίτια της αστοχίας προτού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανάλυσης.

Επιπλέον, όλες οι αστοχίες δεν απαιτούνται να υποβάλλονται σε περιεκτική και εμπεριστατωμένη μελέτη, ενώ μερικές φορές είναι αδύνατο να συγκεντρωθούν όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα κενά στις απαιτούμενες πληροφορίες συμπληρώνονται με ασφαλείς και δικαιολογημένες υποθέσεις. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι η ακρίβεια της ανάλυσης αστοχιών βασίζεται στην ποσότητα και την ποιότητα των πληροφοριών που έχει συγκεντρωθεί και εκτιμηθεί.

Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης εφαρμόζονται βασικές θεωρίες της Φυσικής, της Χημείας και της Μηχανικής, οπότε οποιαδήποτε καινούργια θεωρία (π.χ. νόμος Φυσικής) εξαχθεί κατά την ανάλυση αστοχίας, αποτελεί ένδειξη ότι κάτι έχει γίνει λάθος στη διαδικασία και ότι θα πρέπει να αξιολογηθούν ξανά τα δεδομένα.

Τέλος, προς αποφυγή αμφισβήτησης, είναι δόκιμο να χρησιμοποιούνται σύγχρονες εργαστηριακές τεχνικές για την υποστήριξη των ευρημάτων, ενώ ένας «καλός» αναλυτής θα πρέπει να επιλέγει τον ορθό τύπο ελέγχων και εξετάσεων ανά περίπτωση και να είναι ανοιχτός σε νέες ιδέες και απόψεις. Σημαντικό είναι επίσης και η ορθή αλληλουχία των ελέγχων που θα πραγματοποιηθούν. Δύο ενδεικνύομενες μέθοδοι ανάλυσης αστοχίας δομικών στοιχείων συστημάτων είναι οι παρακάτω:

- **Απλή μέθοδος ανάλυσης, γνωστή και ως «The Five WHYS»**

Η «The Five WHYS» διαδικασία ανάλυσης αστοχιών αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1950 και δεν είναι τίποτε περισσότερο από μια απλή και λογική σειρά ερωτημάτων και σκέψεων. Βασίζεται δηλαδή, στη δημιουργία ερωτήματος προς εύρεση του αιτίου που προκάλεσε ένα γεγονός, ακολούθως του αιτίου που προκάλεσε το προηγούμενο αίτιο του γεγονότος κ.ο.κ. Έτσι, μέσω μιας σειράς συνεχόμενων ερωτημάτων (πέντε συνήθως) υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εύρεσης του αρχικού αιτίου της αστοχίας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι είναι απλή και μπορεί να γίνει μόνο από τον μηχανικό που θα εκτελέσει την επισκευή, ενώ τα κύρια μειονεκτήματά της είναι ότι δεν είναι κατάλληλη για πολύπλοκα συστήματα, ο μηχανικός δεν καταλήγει γρήγορα σε μια απάντηση και βασίζεται μόνο στις γνώσεις του.

- **Αναλυτική «σε βάθος» μέθοδος (In-Depth Analysis Method)**

Όταν η αστοχία ενός συστήματος έχει σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία του, την ασφάλεια του προσωπικού και την προστασία του περιβάλλοντος πρέπει να ακολουθείται μια

πιο τυπική και λεπτομερής διαδικασία. Η «σε βάθος» διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στάδια:

- Συγκρότηση της ομάδας που θα εκτελέσει την ανάλυση.
- Συλλογή, οργάνωση και ανάλυση όλων των δεδομένων.
- Χρησιμοποίηση κατάλληλων εγχειριδίων χρήσης και συντήρησης του συστήματος, τεχνικών εγχειριδίων, αναφορών και αναλύσεων που αφορούν τη σχεδίαση και το υλικό του συστήματος (hardware - software), προκειμένου όλα αυτά να βοηθήσουν στη διαδικασία εξεύρεσης του αίτιου (root cause).
- Πραγματοποίηση διαφόρων εργαστηριακών τεχνικών ελέγχου.
- Καταγραφή όλων των πιθανών αιτιών που προκάλεσαν την αστοχία χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως «brainstorming», διαγράμματα ροής, τεχνική «five-whys», «fault-tree analysis» κ.α.
- Αντιστοίχιση κάθε πιθανού αίτιου (cause) αστοχίας με τον αντίστοιχο τρόπο αστοχίας (failure mode) - εύρεση του επικρατέστερου συνδυασμού.
- Καθορισμός των πιθανών ενδιάμεσων και μακροπρόθεσμων διορθωτικών ενεργειών και επιλογή των καταλληλότερων εξ αυτών.
- Επιβεβαίωση ότι οι διορθωτικές ενέργειες εφαρμόζονται σε όλους τους σχετικούς τομείς (προμηθευτές, απόθεμα, κέντρα επισκευών, παραγωγή σε εξέλιξη, συστήματα σε χρήση).
- Επαναληπτική εξέταση μετά την εφαρμογή των διορθωτικών αλλαγών, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους.
- Ενσωμάτωση των ευρημάτων σε τελική αναφορά (δημιουργία οδηγιών σχεδίασης και παραγωγής, καθώς και εγγράφων επίλυσης προβλημάτων και επισκευής).
- **Συγκρότηση της ομάδας που θα εκτελέσει την ανάλυση**

Είναι σκόπιμο να συγκροτηθεί μια ομάδα από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό, αποτελούμενη από μηχανικούς σχεδίασης και παραγωγής, μηχανικούς αναλυτές υλικών, τεχνικούς συντήρησης, προσωπικό υπηρετήσης και χρήσης του συστήματος, νομικούς (όταν τίθενται ζητήματα ασφαλείας, απωλειών υγείας και περιβάλλοντος) κ.α., που θα επωμιστεί το έργο εκτέλεσης της όλης διαδικασίας της ανάλυσης. Έτσι, όταν προσωπικό από διάφορα τμήματα και ειδικότητες συνεργαστούν, μια πιο πλήρης και ισορροπημένη εκτίμηση των γεγονότων και αιτιών της αστοχίας θα επιτευχθεί.

- **Συλλογή όλων των δεδομένων**

Η ομάδα που διεξάγει την ανάλυση πρέπει να γνωρίζει το πρωτόκολλο χρήσης του συστήματος, όπου έχουν καταγραφεί συστηματικά όλα τα στοιχεία από τις φάσεις της «ζωής»

του· σχεδίαση, κατασκευή, εγκατάσταση, έλεγχος, λειτουργία και συντήρηση. Πρέπει δηλαδή, πρώτα από όλα να συγκεντρώσει δεδομένα σχετικά με τη δομή του συστήματος, καθώς είναι αδύνατο να αναλύσει κάτι το οποίο δε γνωρίζει. Επιπλέον, πρέπει να συλλέξει πληροφορίες σχετικά με το ιστορικό λειτουργίας του, όπως συχνότητα και περιγραφή εργασιών συντήρησης, λίπανσης και ψύξης, πιθανά προβλήματα κατά τη λειτουργία του, συχνότητα και χρονικό διάστημα χρήσης εκτός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας, ασυνήθεις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος κ.λπ.

Στη συνέχεια, είναι σημαντικό να γίνει καταγραφή όλων των συνθηκών λειτουργίας τη στιγμή της αστοχίας, προκειμένου να προσδιοριστεί πιθανή μηχανική υπερφόρτιση της κατασκευής (εκτός των προδιαγεγραμμένων ορίων ασφαλούς λειτουργίας) ή/και μη συνήθης παρουσία χημικών παραγόντων ή θερμικών φορτίων.

Οι πληροφορίες που πρέπει να συγκεντρωθούν ανάλογα την περίπτωση περιλαμβάνουν:

- Δεδομένα σχεδίασης του συστήματος και των δομικών του στοιχείων, όπως διαστάσεις, φορτία, καταπονήσεις, φυσικές συχνότητες, επιλογή υλικών, συνθήκες λειτουργίας κ.α.
- Περιγραφές σχετικά με το στάδιο κατασκευής του συστήματος (manufacturing reports) περιλαμβάνοντας μηχανικές ιδιότητες, χημικές αναλύσεις, είδος θερμικής ή μηχανικής κατεργασίας, τύπος συνδεσμολογίας, χρησιμοποιούμενη διαδικασία κατασκευής, μηχανική λειτουργία, έλεγχος απόδοσης και άλλες αναφορές επιθεώρησης.
- Περιγραφή του συστήματος και του τρόπου λειτουργίας, καθώς και πώς αλληλεπιδρούν τα υποσυστήματα μεταξύ τους (φυσική και λειτουργική αρχιτεκτονική αυτού).
- Περιγραφές που αφορούν την αρχική εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας του συστήματος.
- Περιγραφές - αναφορές λειτουργίας (operation reports), περιλαμβάνοντας πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον λειτουργίας, τα πραγματικά φορτία που ασκούνται στο σύστημα, θερμοκρασίες, πιέσεις, υγρασία, ρύποι, άλατα, σκόνη, ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, χημικές επιδράσεις κ.α. Προσεκτική εξέταση και μελέτη των αναφορών λειτουργίας και των αποθηκευμένων δεδομένων στον υπολογιστή του συστήματος μπορεί να αποκαλύψει τη μη κανονικότητα της λειτουργίας του συστήματος.
- Αρχεία σχετικά με τη συντήρηση και τις επισκευές - τροποποιήσεις του συστήματος, καθώς και προηγούμενες αναλύσεις αστοχιών.
- Δεδομένα σχετικά με την απόδοση - εικόνα (performance) του συστήματος.
- Πληροφορίες από το προσωπικό χειρισμού και συντήρησης.

- Φωτογραφικό υλικό από τα διάφορα δομικά στοιχεία του συστήματος πριν και μετά την αστοχία.
- Συλλογή δειγμάτων, κυρίως από τα στοιχεία που σχετίζονται άμεσα με την αστοχία και παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση αυτής. Αν και αρχικά θα πραγματοποιηθεί ένας οπτικός έλεγχος σε όλα τα δομικά στοιχεία και το σύστημα σαν σύνολο, στη συνέχεια η ομάδα θα πρέπει να επικεντρωθεί στα επίμαχα σημεία όπου εκδηλώθηκε η αστοχία.

- **Οργάνωση και ανάλυση των δεδομένων**

Η ομάδα που εκτελεί την ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε εργαλείο επιθυμεί προκειμένου να οργανώσει τα δεδομένα της και να είναι άμεσα διαθέσιμα προς χρήση. Στη συνέχεια γίνεται εξέταση όλων των δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί, προκειμένου να εξακριβωθεί αν συνδέονται άμεσα με την αστοχία. Τα δεδομένα αφορούν εξοπλισμό - υλικό, ανθρώπους, διαδικασίες, θέματα διοίκησης και οτιδήποτε άλλο μπορεί να σχετίζεται με την αστοχία.

- **Επιθεώρηση και Έλεγχος (Αυτοψία)**

Τα δομικά στοιχεία που έχουν εμφανίσει την αστοχία θα πρέπει να υποβληθούν σε σχολαστικό οπτικό έλεγχο προτού πραγματοποιηθεί η αποσυναρμολόγηση και ο καθαρισμός αυτών. Τα μέρη του συστήματος που έχουν αστοχήσει θα πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν ένα «θύμα» σε σιγή εγγλήματος, όπου απομονώνονται και ελέγχονται μόνο από ειδικούς. Οποιαδήποτε αλλαγή και μη προβλεπόμενη παρέμβαση σε αυτά μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σημαντικών στοιχείων - πληροφοριών.

Όσον αφορά τη διατήρηση των αποδεικτικών στοιχείων, ακόμα και η μετακίνηση των θραυσμάτων από ένα σύστημα που υπέστη έκρηξη, μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σημαντικών πληροφοριών, καθώς η θέση των θραυσμάτων μπορεί να δώσει αξιόπιστες πληροφορίες. Επιπλέον, το πλύσιμο των τμημάτων που αστόχησαν μπορεί κάποιες φορές να έχει αρνητικά αποτελέσματα, καθώς είναι δυνατόν να απομακρυνθούν συστατικά και στοιχεία που δημιουργήθηκαν ή συνέβαλλαν στην εκδήλωση της αστοχίας. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που είναι επιβεβλημένο το πλύσιμο και η καθάριση της επιφάνειας του τμήματος που αστόχησε προκειμένου να διεκπεραιωθούν κάποιοι περαιτέρω τεχνικοί έλεγχοι.

- **Οπτικός έλεγχος και φωτογράφιση (μακροσκοπικός)**

Κατά τον οπτικό έλεγχο εξετάζεται μακροσκοπικά η ομοιογένεια, η ακεραιότητα και η ποιότητα του υλικού. Αποτυπώνεται φωτογραφικά το δομικό στοιχείο και εξετάζονται οπτικά τα πιθανώς κερματισμένα τεμάχιά του, χωρίς να προηγηθεί καθαρισμός αυτών, προκειμένου

να εντοπιστούν σημαντικές μεταβολές της μορφολογίας, της υφής ή/και του χρωματισμού του αντικειμένου γύρω από την περιοχή της αστοχίας. Εξετάζοντας τις επιφάνειες θραύσης (σχηματιζόμενα μοτίβα) είναι δυνατόν να προσδιορισθούν μακροσκοπικά το είδος της θραύσης (όλκιμη, ψαθυρή, κόπωση), το σημείο εκκίνησης της ρωγμής, η διεύθυνση εξάπλωσης της ρωγμής, περιοχές συγκέντρωσης τάσεων κ.α. Επιπλέον, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις επιφάνειες που έχουν παρατηρηθεί ρωγμές, διάβρωση, φθορά, αλλαγή στο χρώμα ή οποιαδήποτε άλλη ανωμαλία. Από τον έλεγχο αυτό υπάρχει περίπτωση να καθοριστεί ο τρόπος αστοχίας. Τονίζεται ότι είναι σημαντικό να διατηρούνται οι περιοχές του συστήματος που έχουν αστοχήσει στην αρχική τους μορφή και να μην προκαλείται αλλοίωση σε αυτές κατά τη μεταφορά ή καθαρισμό αυτών, γιατί σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σημαντικών πληροφοριών.

- **Μη καταστρεπτικός έλεγχος (Non Destructive Testing)**

Ο τύπος της εξέτασης - ελέγχου πρέπει να καθορίζεται μετά την ολοκλήρωση του οπτικού ελέγχου του συστήματος που αστόχησε. Με τις τεχνικές αυτές προσδιορίζονται επιφανειακές ή υποεπιφανειακές ατέλειες μικροδομής (πόροι, ρωγμές, εγκλείσματα), το είδος και η θέση των οποίων υποδεικνύουν σε έναν έμπειρο αναλυτή αστοχιών πιθανές πηγές έναρξης ή επιτάχυνσής της αστοχίας. Πρόκειται για τεχνικές που είτε εφαρμόζονται επιτόπου με χρήση φορητών συσκευών, είτε σε εργαστηριακό περιβάλλον με χρήση συσκευών υψηλότερης ακρίβειας και ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιείται μια πιο ολοκληρωμένη και εμπεριστατωμένη αξιολόγηση της αστοχίας, αποκαλύπτοντας άλλες ρωγμές ή ανωμαλίες υλικού. Οι τεχνικές αυτές αναλύονται στην επόμενη υποπαράγραφο.

- **Καταστρεπτικός Έλεγχος (Destructive Testing)**

Συμπληρωματικά, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές εργαστηριακού ελέγχου προκειμένου να προσδιοριστούν πιθανές αποκλίσεις του υλικού από τις προδιαγραφές που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό. Οι τεχνικές αυτές απαιτούν την απομάκρυνση (θυσία) υλικού, αν αυτό δεν έχει θραυσματοποιηθεί, και εφαρμόζονται στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης, αφού πρώτα έχει γίνει μια πλήρης καταγραφή της εικόνας του αντικειμένου που αστόχησε και των επιφανειών θραύσης. Θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή των δειγμάτων και να μην αλλοιώνονται τα στοιχεία που υπάρχουν σε αυτά. Σημαντικό είναι η χρήση γαντιών και κατάλληλων υλικών συσκευασίας κατά τη μεταφορά και τον έλεγχο των δοκιμών στο εργαστήριο, προκειμένου να μην προκληθεί περαιτέρω ζημιά. Όταν απαιτείται καθαρισμός των επιφανειών, πρέπει αυτός να γίνεται προσεκτικά χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως καθαρισμός με αέρα, με ήπια καθαριστικά ή με υπέρηχους. Επιπλέον, όταν απαιτείται τεμαχισμός του δομικού στοιχείου για περαιτέρω εξέταση π.χ. ηλεκτρονικό μικροσκόπιο,

έλεγχος δυσθραυστότητας κ.α. αυτός θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Τέλος, μπορεί να απαιτηθεί η εξέταση και το «άνοιγμα» εσωτερικών ρωγμών ή δευτερευουσών ή άλλων που δεν έχουν οδηγήσει σε θραύση προς έλεγχο του μηχανισμού αυτών. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν μηχανικό έλεγχο, μικροσκοπικό έλεγχο - μεταλλογραφία - θραυστογραφία και χημική ανάλυση:

- **Μηχανικός έλεγχος**

Γίνεται έλεγχος και σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων του δομικού στοιχείου που αστόχησε με τις τιμές των ιδιοτήτων που προβλέπεται να έχει. Με τον έλεγχο αυτόν μπορεί να αποκαλυφθούν ζητήματα όσον αφορά το υλικό, όπως χρήση ακατάλληλου υλικού ή ακατάλληλη θερμική ή μηχανική κατεργασία.

- **Μικροσκοπικός έλεγχος (μεταλλογραφία - θραυστογραφία)**

Ο μικροσκοπικός έλεγχος του δομικού στοιχείου που αστόχησε παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη μικροδομή του υλικού και πιθανών ανωμαλιών αυτής. Η μικροδομή είναι αποτέλεσμα της σύνθεσης του υλικού και της θερμικής κατεργασίας και επεξεργασίας που έχει υποστεί, καθορίζοντας τις μηχανικές ιδιότητές του. Οι μικροσκοπικές ανωμαλίες (προσμίξεις, κενά, μικρορωγμές) δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, γι' αυτό απαιτείται η χρήση μικροσκοπικών οργάνων. Ο έλεγχος αυτός σε συνδυασμό με τη μεταλλογραφία και τη θραυστογραφία αποτελούν αξιόπιστες τεχνικές προς εύρεση του αίτιου αστοχίας.

- **Χημική Ανάλυση**

Πραγματοποιώντας χημική ανάλυση του υλικού από το οποίο αποτελείται το δομικό στοιχείο που αστόχησε ή των καταλοίπων που έχουν βρεθεί στις επιφάνειες αστοχίας (προϊόντα διάβρωσης, θραύσης κ.α.) μπορεί να παρασχεθούν σημαντικά στοιχεία που να αποδεικνύουν το αίτιο του προβλήματος. Τα ευρήματα της εργαστηριακής ανάλυσης συγκρίνονται με βιβλιογραφικά δεδομένα ή/και δεδομένα εργαστηριακής ανάλυσης αντίστοιχου «πρότυπου υλικού», προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο πιθανές αποκλίσεις που αφορούν τη χημική σύσταση και τη μικροδομή του υλικού. Τα ανωτέρω συγκρίνονται επιπλέον με τα σχετικά στοιχεία που περιέχονται στους φακέλους σχεδιασμού και κατασκευής του αντικειμένου.

- **Μέθοδοι Προσομοίωσης**

Κάθε φυσικό πρόβλημα υπολογιστικής μηχανικής μπορεί να προσομοιωθεί με ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο, κάτω από συγκεκριμένες παραδοχές και απλοποιήσεις. Έτσι, η εξέλιξη των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό ενός υλικού κατά τη λειτουργία του σε περιβάλλον δεδομένων μηχανικών και θερμικών φορτίσεων είναι δυνατό

να αναπαραχθεί με τη χρήση υπολογιστικών κωδίκων (ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, FEA - Finite Element Analysis) λαμβάνοντας υπόψη τη συγκεκριμένη γεωμετρία και μικροδομή του υλικού. Μια τέτοια ανάλυση μπορεί να συνεισφέρει σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό του χρόνου και της θέσης έναρξης μιας ρωγμής.

- **Προσδιορισμός των τρόπων αστοχίας και των πιθανών αιτιών**

Αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν τον καθορισμό των επιδιορθωτικών ενεργειών. Ο καθορισμός των τρόπων αστοχίας πρέπει να προηγείται του προσδιορισμού των πιθανών αιτιών. Οι τρόποι αστοχίας σχετίζονται με το σύστημα, τα δομικά του στοιχεία και τις συνθήκες λειτουργίας, ενώ τα αίτια αστοχιών σχετίζονται με τους ανθρώπους και τις διαδικασίες κατασκευής και λειτουργίας.

Είναι σημαντικό να εξεταστεί εάν η υποτιθέμενη σειρά των γεγονότων που πιθανόν να οδήγησαν στην αστοχία συμβαδίζει με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι αλληλεπιδράσεις των δομικών στοιχείων του συστήματος με το περιβάλλον. Επιπλέον, οι επιφάνειες όπου έχει παρατηρηθεί η αστοχία παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο αστοχίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις καταστροφικής αστοχίας υλικού, τα «αποτυπώματα» του κύριου αίτιου που οδήγησε σε αυτήν μπορούν να ανιχνευθούν στα κερματισμένα τεμάχια της κατασκευής. Για παράδειγμα, το σχήμα της ρωγμής ή τα «σημάδια» σε μια φθαρμένη περιοχή ή η επιφάνεια θραύσης μπορούν να δώσουν πολλές αποδείξεις για την αιτία του προβλήματος. Τέλος, η ομάδα ανάλυσης εξετάζοντας όλους τους πιθανούς τρόπους αστοχίας πρέπει να καταλήξει στον πιο πιθανό και να μελετήσει τα αίτια πρόκλησης αυτού, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως «brainstorming», διαγράμματα ροής, τεχνική, «fault-tree analysis» κ.α. (Kladis et al, 2007), (Kladis et al, 2008), (Kladis et al, 2009), (Lee et al, 1985).

- **Ανάλυση αστοχίας χωρίς το δομικό στοιχείο που αστόχησε**

Σε ορισμένες περιπτώσεις το δομικό στοιχείο ή το σύστημα που αστόχησε δεν είναι διαθέσιμο, όπως κατά την απώλεια ενός αεροσκάφους, την πρόωρη πυροδότηση βλήματος ή πυραύλου που δε βρήκε τον στόχο, αστοχία συστημάτων που βρίσκονται σε απόσταση κ.α. Αυτό δε σημαίνει όμως, ότι η ανάλυση αστοχίας δεν μπορεί να εκτελεστεί. Εξετάζοντας άλλα πανομοιότυπα συστήματα που βρίσκονται σε παραγωγή, απόθεμα ή χρήση, προσδιορίζοντας το πρόβλημα, συγκεντρώνοντας όλη τη διαθέσιμη πληροφορία που αφορά τη σχεδίαση, την παραγωγή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τις συνθήκες λειτουργίας, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προσδιοριστούν κάποιοι υποθετικοί τρόποι αστοχίας και να εντοπιστούν τα αίτια που την προκάλεσαν. Έτσι, η περίπτωση αυτή της μη ύπαρξης του υλικού που αστόχησε δεν είναι τόσο δύσκολη όσο φαίνεται και μπορεί να αντιμετωπιστεί (Berk, 2009).

4.7.2 Μη καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου (Non - Destructive Testing – NDT)

Οι Μη Καταστρεπτικές Τεχνικές Ελέγχου είναι χρήσιμες κατά την ανάλυση αστοχίας ενός δομικού στοιχείου, διότι είναι τεχνικές που επιτρέπουν την «ενδοσκοπική» μελέτη του αντικειμένου χωρίς να προκαλούν αλλοίωση στα χαρακτηριστικά του (γεωμετρία ή ιδιότητες του υλικού). Μέσω της χρήσης σύγχρονου διαθέσιμου εξοπλισμού και της εφαρμογής προηγμένων μεθόδων, ένας αναλυτής αστοχιών μπορεί να εντοπίσει επιφανειακές ή υποεπιφανειακές ρωγμές ή διάβρωση ή ελαττώματα, όπως ασυνέχειες δομής, εγκλείσματα, αποκολλήσεις, που διαφορετικά με γυμνό μάτι δε θα μπορούσε.

Οι κυριότερες Μη Καταστρεπτικές Τεχνικές Ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση αστοχιών οπλικών συστημάτων είναι οι εξής (Lazarevic & Petrovic, 2015), (Richard, 2017), (Ψυλλάκη, 2013):

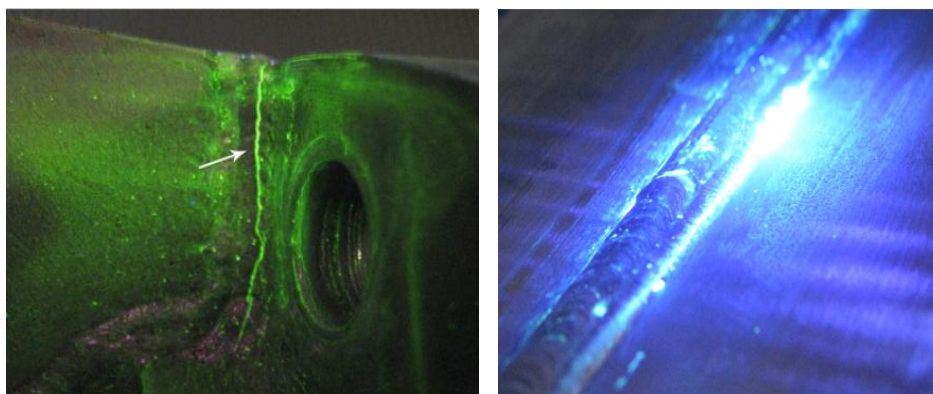
- Οπτικός έλεγχος - μακροσκοπικός (Visual Testing - VT)
 - Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Liquid - Penetrant Testing - LPT)
 - Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particle Testing - MT)
 - Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic Testing - UT)
 - Έλεγχος με ραδιογραφία ακτίνων X ή γ (Radiography Testing - RT)
 - Έλεγχος με δινροεύματα (Eddy Current Testing - ECT)
 - Θερμογραφικός έλεγχος (Thermographic Testing)
-
- **Οπτικός έλεγχος - μακροσκοπικός (Visual Testing - VT)**

Ο οπτικός έλεγχος είναι από τους πιο παλιούς και διαδεδομένους μακροσκοπικούς τρόπους εξέτασης ενός υλικού που έχει εμφανίσει αστοχία. Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε εξωτερική επιφάνεια υλικού είτε με γυμνό μάτι, είτε με χρήση οργάνων χαμηλής μεγέθυνσης (έως 100 φορές), όπως μεγεθυντικών φακών ή οπτικών μικροσκοπίων. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές μηχανές υψηλής ευκρίνειας, βιντεοκάμερες, καθώς και ενδοσκόπια (borescopes ή fiber-optic scopes) για εσωτερικές επιφάνειες που δεν είναι ορατές. Η οπτική μακροσκοπική εξέταση αποτελεί συνήθως τον πρωταρχικό έλεγχο που πραγματοποιείται σε ένα δομικό στοιχείο στον χώρο που αστόχησε.

- **Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Liquid - Penetrant Testing - LPT)**

Μια από τις πιο συνηθισμένες NDT είναι ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά. Η τεχνική αυτή είναι παλιά και χαμηλού κόστους, καθώς εκμεταλλεύεται την ικανότητα κάποιων υγρών

(φωσφοριζόντων ή χρωματικών) υψηλής επιφανειακής τάσης να διεισδύουν σε επιφανειακές ασυνέχειες (πόρους, κοιλότητες, μικρορωγμές) μέσω τριχοειδών φαινομένων. Μπορεί να εφαρμοστεί για τον εντοπισμό ρωγμών, σχισμών, πόρων, επικαλύψεων, ραφών και γενικά επιφανειακών ελαττωμάτων σε δομικά στοιχεία. Συνήθως χρησιμοποιείται για την έλεγχο εξαρτημάτων που έχουν υποστεί κόπωση ή ρωγμάτωση λόγω καταπόνησης και διάβρωσης.



Σχήμα 54. Παραδείγματα LPT με χρήση φωσφοριζόντων διεισδυτικών υγρών

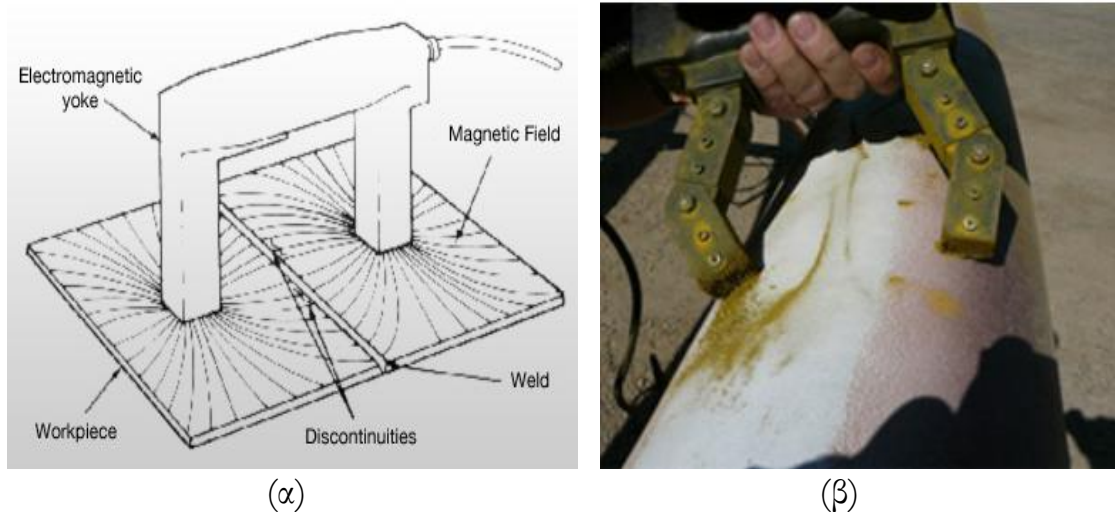
Κατά την τεχνική αυτή, αρχικά καθαρίζεται η εξεταζόμενη επιφάνεια από τυχόν έλαια, γράσο, νερό, χημικές ουσίες ή οποιαδήποτε ακαθαρσία υπάρχει σε αυτή. Αφού η επιφάνεια καθαριστεί, τότε καλύπτεται με λεπτό στρώμα υγρού για χρονικό διάστημα τέτοιο ώστε να ολοκληρωθεί η διείσδυσή του. Στη συνέχεια, η περίσσεια του υγρού απομακρύνεται από την επιφάνεια με έκπλυση. Μετά, η εξεταζόμενη επιφάνεια καλύπτεται με κατάλληλη σκόνη, τον «εμφανιστή» (developer), ο οποίος ενεργώντας ως σφουγγάρι προκαλεί εκρόφηση του υγρού που είχε διεισδύσει στην επιφανειακή ατέλεια. Το εκροφούμενο υγρό αφήνει στην επιφάνεια ίχνος διαφορετικού χρώματος από τον εμφανιστή ή ανιχνεύεται μέσω UV φωτός, υποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη και την ένταση της επιφανειακής ατέλειας.

- **Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particle Testing - MT)¹⁵**

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών ή υποεπιφανειακών ασυνεχειών (ρωγμές, πόροι, μη μεταλλικά εγκλείσματα) μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά και κυρίως σε χάλυβες. Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια συνίσταται στην επικάλυψη της επιφάνειας με σκόνη σιδήρου σε λεπτό διαμερισμό, πχ τύπου σπρέι, και την ταυτόχρονη εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Τα σωματίδια της σκόνης προσανατολίζονται σύμφωνα με τις

¹⁵ <http://www.borunsteel.com/Inspection-and-Testing.html>

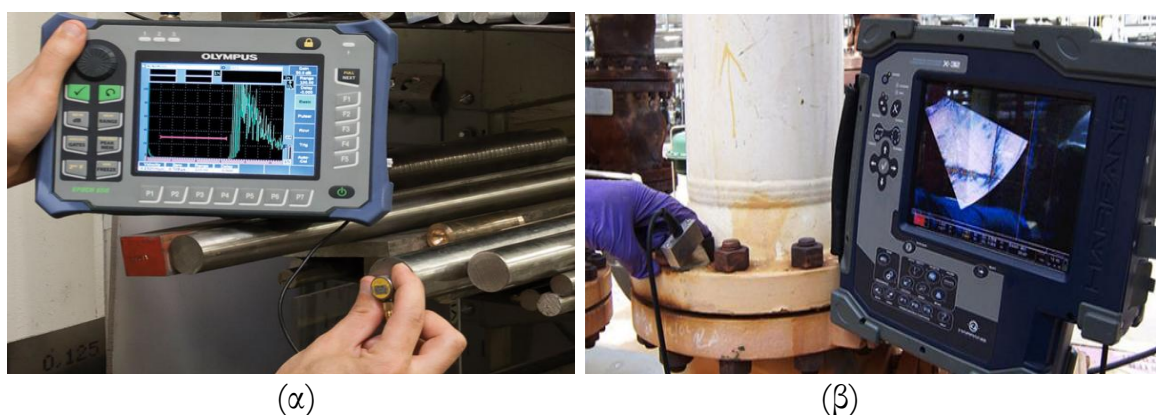
μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Επιφανειακές ατέλειες του υλικού ή υποεπιφανειακές μικρού βάθους προκαλούν «διαρροή» των μαγνητικών γραμμών δημιουργώντας τοπικά μαγνητικά δίπολα, τα οποία έλκουν τα μαγνητικά σωματίδια. Με την τεχνική αυτή μπορούν να ανιχνευτούν ρωγμές πάχους 0,1 μm .



Σχήμα 55. (α) Βασική αρχή της τεχνικής MT (β) Εντοπισμός επιφανειακής ρωγμής

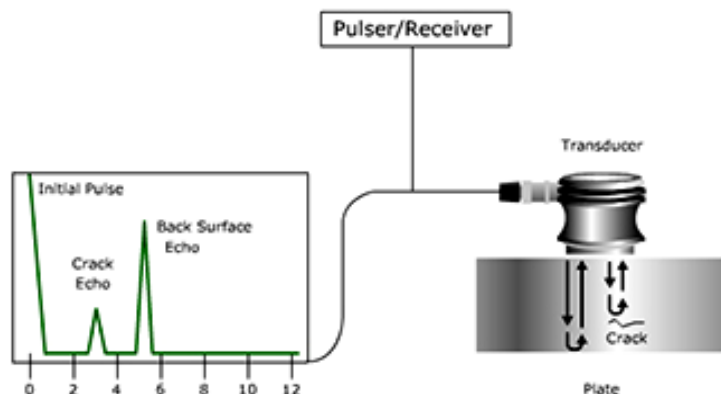
- Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic Testing - UT)

Η μη καταστρεπτική αυτή τεχνική στηρίζεται στη διάδοση των ακουστικών κυμάτων υπερηχητικών συχνοτήτων (>20 KHz) εντός υλικών, γνωστή και ως ακουστική εμπέδηση. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον ταχύ και αξιόπιστο εντοπισμό εσωτερικών δομικών ατελειών, όπως πόρων και εγκλεισμάτων, καθώς και ρωγμών ή αστοχιών εσωτερικών διεπιφανειών διαφόρων υλικών μεταλλικών και μη.



Σχήμα 56. (α) Παράδειγμα ελέγχου σε μεταλλικό υλικό
(β) Οπτική απεικόνιση εσωτερικής ατέλειας με χρήση UT.

Για τον έλεγχο των μεταλλικών υλικών χρησιμοποιούνται κύματα συχνοτήτων 0,1 - 5 MHz που δημιουργούνται από μια διάταξη πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (χαλαζία, τιτανικού βαρίου ή θειϊκού λιθίου). Ο έλεγχος πραγματοποιείται με τη διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων που παράγονται από το όργανο διαμέσου του εξεταζόμενου υλικού, με ταχύτητα που εξαρτάται από την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας του τελευταίου.



Σχήμα 57. Απεικόνιση της τεχνικής ελέγχου με υπερήχους

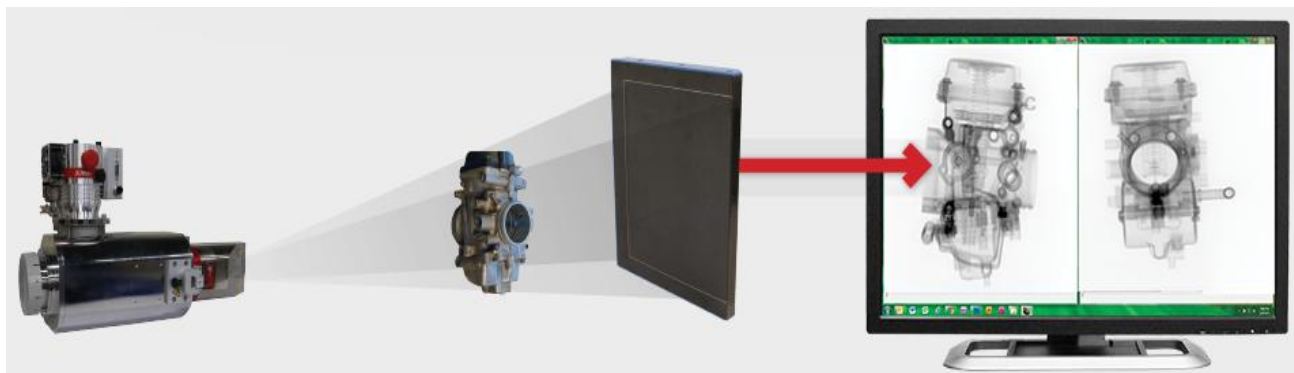
Αφού τα κύματα διασχίσουν όλο το υλικό, ένα μέρος αυτών ανακλάται προς την επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του εκτός του υλικού. Με τη χρήση κατάλληλων παλμογράφων - δειτών γίνεται καταγραφή της χρονικής εξέλιξης της πορείας του ανακλώμενου και του διερχόμενου μέρους των υπερηχητικών κυμάτων. Και στις δυο περιπτώσεις, η ύπαρξη επιμηγιών ασυνεχειών, κάθετων στη διεύθυνση διάδοσης των ηχητικών κυμάτων, καταγράφεται και απεικονίζεται σε οθόνη ως μη ομαλή πολλαπλή ανάκλαση του κύματος. Η ύπαρξη πόρων ή εγκλεισμάτων γίνεται αντιληπτή κυρίως από τη διαφοροποίηση της τιμής της ταχύτητας διάδοσης του κύματος.

Τέλος, πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι ακουστικά κύματα υπερηχητικών συχνοτήτων μπορούν να δημιουργηθούν και να διαδοθούν από απόσταση σε υποεπιφανειακή περιοχή του εξεταζόμενου υλικού με τη χρήση πηγών παλμικού laser, με διάρκεια παλμού της τάξης των ns. Η χρήση της τεχνολογίας αυτής είναι αρκετά βοηθητική, αφού η πηγή διέγερσης είναι σε απόσταση από το εξεταζόμενο αντικείμενο, επιτρέποντας έτσι μετρήσεις σε θερμοκρασίες υψηλότερες του περιβάλλοντος.

- **Έλεγχος με ραδιογραφία ακτίνων X ή γ (Radiography Testing - RT)**

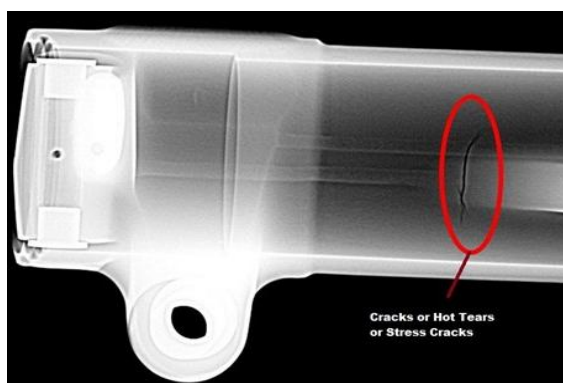
Στην περίπτωση των ελέγχων με ραδιογραφία σε υλικά που έχουν αστοχήσει γίνεται χρήση μιας πηγής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνων X ή γ). Οι ακτίνες αυτές εμφανίζουν υψηλή διεισδυτική ικανότητα, λόγω του μικρού μήκους κύματός τους, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό τους απορροφάται από το υλικό. Αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την

πυκνότητα του υλικού, το πάχος του και φυσικά το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας. Οι ακτίνες γ έχουν μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από τις ακτίνες X, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για ραδιογραφία αντικειμένων μεγάλου πάχους, αλλά εμφανίζουν μικρότερη ευαισθησία.

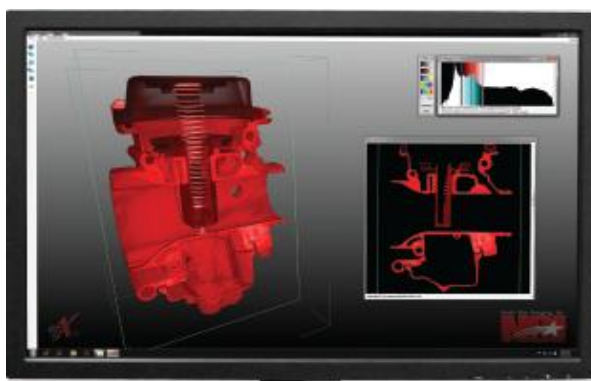


Σχήμα 58. 2D Digital Radiography Testing

Κατά τη διαδικασία ελέγχου, η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού διέρχεται από τη μάζα του και αποτυπώνεται σε μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Οι περιοχές του υλικού με τη μεγαλύτερη πυκνότητα απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας και κατά συνέπεια η εξερχόμενη ακτινοβολία στο πίσω μέρος του υλικού σκιάζει λιγότερο το φιλμ, σε σχέση με τις περιοχές μικρότερης πυκνότητας, όπως είναι οι πόροι και οι ρωγμές. Όταν στην εξεταζόμενη μάζα υπάρχουν εγκλείσματα που είναι εν γένει μεγαλύτερης πυκνότητας, οι αντίστοιχες περιοχές της στο φιλμ καταγράφονται ως φωτεινότερα σημεία. Έτσι, από την πυκνότητα της αποτύπωσης στο φωτογραφικό φιλμ γίνεται τελικά δυνατός ο εντοπισμός της θέσης, αλλά και του είδους του ελαττώματος. Εκτός του φωτογραφικού φιλμ, μπορεί να γίνει και ψηφιακή απεικόνιση (2D ή 3D) με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού - λογισμικού, παρέχοντας μεγαλύτερη ανάλυση των δεδομένων.



(α)



(β)

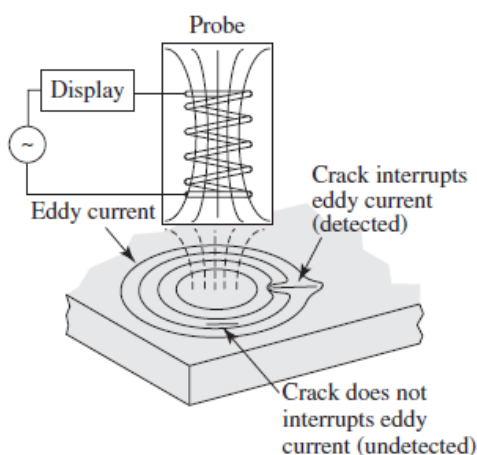
Σχήμα 59. α. Ανίχνευση ρωγμής σε μεταλλικό εξάρτημα μέσω RT
β. 3D απεικόνιση μεταλλικού εξαρτήματος

Ο ραδιογραφικός έλεγχος χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον έλεγχο των ελαττωμάτων χυτών αντικειμένων, σφυρήλατων και συγκολλημένων κατασκευών.

- **Έλεγχος με δινορεύματα (Eddy Current Testing - ECT)**

Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος μεταλλικών υλικών (μαγνητικών) με δινορεύματα στηρίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της ύλης. Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για την ανίχνευση επιφανειακών ή υπό-επιφανειακών ελαττωμάτων περιλαμβάνοντας ρωγμές, διάβρωση και θερμικές φθορές, ενώ μπορεί να καταγράψει ψηφιακές αναφορές αποτελεσμάτων.

Σε γενικές γραμμές, η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τοποθέτηση του προς εξέταση ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού μέσα σε ένα πηνίο (ή κοντά σε αυτό), στο οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργώντας έτσι στο εσωτερικό του πηνίου ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο επάγει στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού ρεύμα ίδιας συχνότητας με αυτή της μεταβολής του πεδίου. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί δευτερογενές μαγνητικό πεδίο το οποίο αλληλεπιδρά με το αρχικό μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Η ύπαρξη οποιασδήποτε ρωγμής ή αλλαγής στην πυκνότητα ή τη μικροδομή του εξεταζόμενου υλικού προκαλεί παραμορφώσεις στο μαγνητικό πεδίο, οι οποίες καταγράφονται και απεικονίζονται από ένα όργανο.



(α)



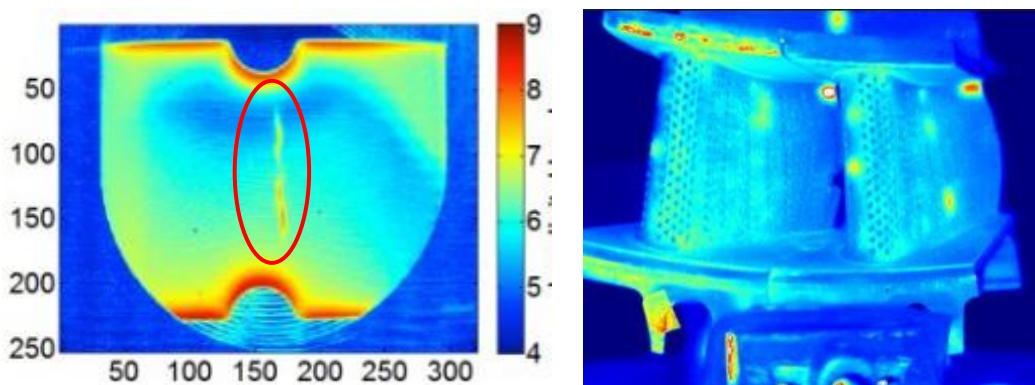
(β)

Σχήμα 60. Τεχνική ελέγχου με δινορεύματα (β) Ενδεικτικός εξοπλισμός

- **Θερμογραφικός έλεγχος (Thermographic Testing)**

Οι θερμογραφικές μη καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου περιλαμβάνουν μετρήσεις και απεικονίσεις των θερμοκρασιών ενός δομικού στοιχείου συστήματος. Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται είτε με απλά όργανα, όπως τα thermocouples, με τα οποία μπορεί να

μετρηθεί η θερμοκρασία συγκεκριμένων σημείων ενός εξαρτήματος, είτε με πιο σύνθετα συστήματα που παράγουν θερμικές απεικονίσεις από την εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας των εξαρτημάτων. Τα συστήματα αυτά παράγουν θερμικά το εσωτερικό ελάττωμα μέσω διαφοροποίησης της απεικόνισης σε σχέση με την υπόλοιπη θερμική απεικόνιση.



Σχήμα 61. Θερμογραφική απεικόνιση ρωγμών σε εξαρτήματα

Τέλος, στο Παράρτημα Θ' παρατίθεται πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων μη καταστρεπτικών μεθόδων, ως εργαλείο - κριτήριο επιλογής της καταλληλότερης ανά περίπτωση τεχνικής ελέγχου. Βασικά κριτήρια αποτελούν κυρίως το ίδιο το δομικό στοιχείο που αστόχησε (ιδιότητες υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο, σχήμα, μέγεθος, επιφάνειες, συνδέσεις κ.α.), ο χώρος που αστόχησε και οι συνθήκες που επικρατούν, η προσβασιμότητα σε αυτό, ο διατιθέμενος χρόνος για διενέργεια της ανάλυσης, το κόστος κ.α.

4.7.3 Καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου (Destructive Testing - DT)

Σε αντίθεση με τις μη καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου, οι οποίες εφαρμόζονται σε ένα δομικό στοιχείο που αστόχησε για τη διερεύνηση ύπαρξης επιφανειακών ή υπό-επιφανειακών ελαττωμάτων, οι καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση περαιτέρω ελέγχων. Συγκεκριμένα, είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό τυχόν διαφοροποιήσεων στη χημική σύσταση, τη μικροδομή ή τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, σκληρότητα κ.α.) σε σχέση με τα προβλεπόμενα από τον τεχνικό φάκελο του συστήματος. Η διαφορά των τεχνικών αυτών μεθόδων έγκειται στο γεγονός ότι απαιτούν επέμβαση με κάποια συσκευή, εργαλείο, ουσία ή μηχανισμό για τη λήψη δειγμάτων από χαρακτηριστικές

περιοχές· επέμβαση η οποία προκαλεί καταστροφές στο δομικό στοιχείο (Lazarevic & Petrovic, 2015), (Φαρράς, 2008), (McEvily, 2013).

Οι καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου είναι ιδανικές όταν συνδυάζονται με μη καταστρεπτικές, καθώς ο συνδυασμός και των δύο μπορεί να δώσει την καλύτερη πληροφορία σχετικά με τα υλικά και τις ατέλειες που επέφεραν την αστοχία. Επιπλέον, με τις καταστρεπτικές τεχνικές ελέγχου μπορεί να εξακριβωθεί η ύπαρξη μικρορωγμών, διαβρώσεων ή άλλων μηχανισμών αστοχίας υλικού και να αποδειχθεί το πώς ή το πότε τα δομικά στοιχεία αστόχησαν ή πρόκειται να αστοχήσουν. Κάποια από τα πλεονεκτήματα των τεχνικών αυτών είναι:

- Γίνεται επαλήθευση των ιδιοτήτων του υλικού.
- Καθορίζεται η ποιότητα των συνδέσμων και των συγκολλήσεων.
- Αποτελούν εργαλείο για πρόβλεψη και μείωση των αστοχιών, των ατυχημάτων και του κόστους.
- Επιβεβαιώνεται η συμβατότητα με τις τεχνικές προδιαγραφές.¹⁶

Οι βασικότερες καταστροφικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των υλικών είναι οι εξής:

- Μηχανικός έλεγχος - ανάλυση (mechanical testing)
- Μικροσκοπικός έλεγχος (microscopic examination)
- Μεταλλουργικός - θραυστογραφικός έλεγχος (metallography - fractography)
- Χημική ανάλυση (chemical and elemental testing)

4.7.3.1 Μηχανικός έλεγχος (mechanical testing)

Περιλαμβάνει μια σειρά ελέγχων προκειμένου να εξακριβωθεί αν οι μηχανικές ιδιότητες του δομικού στοιχείου είναι σύμφωνες με τις προδιαγραφές ή για να αξιολογηθεί η επίπτωση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε αυτές.

- Θερμομηχανική ανάλυση (Thermo-Mechanical Analysis - TMA)
- Δυναμική μηχανική ανάλυση (Dynamic Mechanical Analysis - DMA)
 - Σκληρομέτρηση (hardness testing)
 - Δοκιμή εφελκυσμού (tensile strength and toughness testing)

¹⁶ <http://www.inspecta.com/en/Our-Services/Testing/Destructive-Testing/>

- Δοκιμή κάμψης (bending testing)
- Δοκιμή κρούσης (impact testing)
- **Θερμομηχανική ανάλυση (Termo-Mechanical Analysis - TMA)**

Στη TMA εξέταση καταγράφεται η παραμόρφωση και γενικά η συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού - δομικού στοιχείου υπό σταθερό φορτίο (τάση) σε συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.

- **Δυναμική μηχανική ανάλυση (Dynamic Mechanical Analysis - DMA)**

Η DMA παραμορφώνει μηχανικά ένα δοκίμιο ασκώντας σε αυτό μηχανικά φορτία και μετρά την απόκρισή του. Η παραμόρφωση μπορεί να εφαρμοστεί ημιτονοειδώς, με σταθερά βήματα ή με δεδομένο ρυθμό. Η απόκριση του δοκιμίου καταγράφεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.

Στις μέρες μας, η διάκριση μεταξύ των τεχνικών TMA και DMA έχει σχεδόν εξαλειφθεί, καθώς οι σύγχρονες διατάξεις συνδυάζουν και τις δύο λειτουργίες (DMTA), εφαρμόζεται δηλαδή πάντα μια ελεγχόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας.

- **Σκληρομέτρηση (hardness testing)**

Η σκληρομέτρηση αποτελεί μια ταχεία τεχνική που επιτρέπει στον αναλυτή αστοχιών να έχει μια πρώτη ένδειξη για τις μηχανικές ιδιότητες ενός μεταλλικού αντικειμένου, την ομοιόμορφη κατανομή των εσωτερικών τάσεων σε αυτό, καθώς και την επιτυχία ή όχι της θερμικής του κατεργασίας.

Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως σταθερά σκληρόμετρα εργαστηρίου που μετρούν το βάθος ή τις διαστάσεις του αποτυπώματος που αφήνει ο εντυπωτής (ή διεισδυτής) σκληρού υλικού στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού, μετά την επιβολή κάθετης δύναμης γνωστής τιμής. Ανάλογα με το εξεταζόμενο υλικό, το πάχος του και τις αναμενόμενες τιμές σκληρότητας χρησιμοποιούνται τέσσερις (4) τεχνικές σκληρομέτρησης σε βιομηχανική κλίμακα: Brinell, Vickers, Rockwell B και Rockwell C, τα βασικά στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά στο παράρτημα ΙΕ'.



Σχήμα 62. Παραδείγματα σταθερών και φορητών οργάνων σκληρομέτρησης

Εκτός από τα συνήθη σταθερά σκληρόμετρα εργαστηρίου χρησιμοποιούνται και φορητά σκληρόμετρα για επιτόπιες μετρήσεις σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η λήψη δείγματος του υλικού που έχει αστοχήσει ή σε περιπτώσεις επιθεώρησης εξαρτήματος που βρίσκεται σε λειτουργία, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η χρήση του δεν έχει επιφέρει αλλαγές στη σκληρότητά του.

- **Δοκιμή εφελκυσμού (tensile strength and toughness testing)**

Η γνώση της συμπεριφοράς του υλικού υπό στατική εφελκυστική φόρτιση αποτελεί βασικό στοιχείο που πρέπει να εκτιμηθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού μιας κατασκευής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες καταστροφικής αστοχίας και περιλαμβάνεται στο φάκελο σχεδιασμού της. Ωστόσο, η εξέταση της απόκρισης σε εφελκυσμό υλικού που έχει αστοχήσει δίνει επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις απαιτούμενες διορθώσεις στον σχεδιασμό, τόσο ως προς την κατάλληλη επιλογή του υλικού, όσο και ως προς τη διαστασιολογική του ανάλυση. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μεταλλικά, πολυμερή ή σύνθετα υλικά και αποτελεί καταστροφική τεχνική, γιατί απαιτεί είτε δείγμα από το δομικό στοιχείο, είτε το ίδιο το στοιχείο να υποστεί τον έλεγχο και να καταστραφεί (παραμορφωθεί ή θραυστεί).



Σχήμα 63. Ενδεικτικό όργανο σκληρομέτρησης και δοκιμή σε βίδα

- **Δοκιμή κάμψης (bending testing)**

Με τη δοκιμή κάμψης μπορεί να ελεγχθεί η ολκιμότητα των υλικών και η αντοχή τους σε θραύση. Χρησιμοποιείται τόσο στο στάδιο της κατασκευής, όσο και κατά την ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου, προκειμένου να συλλεχθούν δεδομένα για την όλκιμη συμπεριφορά του υλικού. Αποτελεί καταστροφική μέθοδος, διότι απαιτεί δείγμα του δομικού στοιχείου που αστόχησε ή το ίδιο το δομικό στοιχείο να υποβληθεί σε καταπόνηση και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους των υλικών. Διαδεδομένες είναι κυρίως δύο τεχνικές: δοκιμή με κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων. Ενδεικτικά, παρατίθεται εξοπλισμός δοκιμής τριών και τεσσάρων σημείων, όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 64. Εξοπλισμός δοκιμής τριών και τεσσάρων σημείων

- **Δοκιμή κρούσης (impact testing)**

Η δοκιμή κρούσης είναι ένας άλλος τύπος δοκιμής με την οποία μπορεί να ελεγχθεί η ολκιμότητα των υλικών, η σκληρότητά τους και η αντοχή τους σε θραύση. Υπάρχουν κυρίως δυο τεχνικές δοκιμών με κρούση, η «Izod» και η «Charpy».¹⁷ Ο συνήθης έλεγχος γίνεται με διατάξεις Charpy (διατάξεις εκκρεμούς) σε δοκίμια με εγκοπή V ή U, τυποποιημένης γεωμετρίας, κατά τις οποίες το δοκίμιο του εξεταζόμενου υλικού είναι στερεωμένο σε υποστήριγμα στην κατώτερη θέση της τροχιάς αιωρούμενης σφύρας γνωστής μάζας, η οποία αφήνεται να κινηθεί από γνωστό ύψος. Το ποσό της ενέργειας που απορροφάται κατά τη

¹⁷

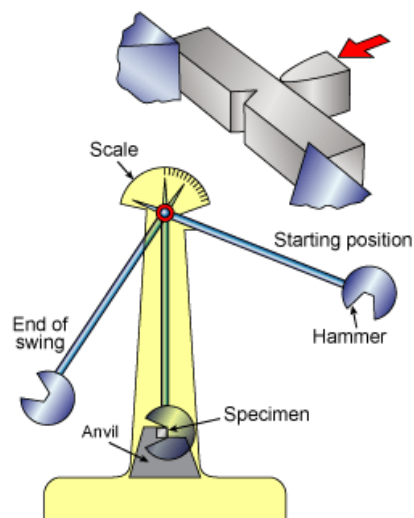
<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mechanical-testing-notched-bar-or-impact-testing-071/>

θραύση του δείγματος μετριέται και αποτελεί μια ένδειξη για την ευθραυστότητα του εξεταζόμενου υλικού. Ένα ψαθυρό υλικό απαιτεί μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε σχέση με ένα όλκιμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο έλεγχος αυτός είναι ποιοτικός και τα αποτελέσματα μπορούν να ελεγχθούν μόνο βάσει κάποιων προδιαγραφών ή μεταξύ των διαφόρων δειγμάτων.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τυπική διάταξη Charpy εκκινημούς που χρησιμοποιείται κατά τη δοκιμή κρούσης.



(α)



(β)

Σχήμα 65. (α) Ενδεικτικό όργανο μέτρησης (β) Τυπική διάταξη οργάνου

4.7.3.2 Μικροσκοπικός έλεγχος - μεταλλογραφία - θραυστογραφία (microscopic examination - metallography - fractography)

Η ύπαρξη μικροπόρων ή μικροεγκλεισμάτων, μικρορωγμών, μικροκοιλοτήτων, επιφανειακών ανωμαλιών (προκαλούμενων από οξείδωση, διάβρωση, τριβή, φθορά) καθώς και οποιασδήποτε μορφής αλλοιώσεων ή ελαττωμάτων της μικροδομής, που πιθανά να συνέβαλαν στην αστοχία ενός εξαρτήματος, μη ανιχνεύσιμων από τις τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου, μπορούν να προσδιοριστούν και να μελετηθούν μικροσκοπικά (Findlay & Harrison, 2002), (Ψυλλάκη, 2013).

Όσον αφορά την αστοχία μεταλλικών εξαρτημάτων, η μικροσκοπική ανάλυση της δομής των μετάλλων και των κραμάτων πραγματοποιείται μέσω της **μεταλλογραφίας**. Για να συντελεστεί όμως η παρατήρηση ενός δείγματος μετάλλου ή κράματος στο μικροσκόπιο, πρέπει να προηγηθεί μια κατάλληλη επεξεργασία, που περιλαμβάνει σχολαστικό καθαρισμό μέσω μηχανικής λείανσης, που συμπληρώνεται ενδεχομένως από χημικό ή ηλεκτροχημικό καθαρισμό ή με υπερηχητικά κύματα. Όταν η επιφάνεια του δείγματος γίνει απόλυτα λεία, καθίσταται ορατή η δομή του μέσω μικροσκοπικής ανάλυσης. Έτσι, η προσεκτική εξέταση του δείγματος στο μικροσκόπιο ή η μικροφωτογράφησή του μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τις θερμικές και μηχανικές διεργασίες που έχει υποστεί το δείγμα, την παρουσία ρωγμών, κενών, πόρων, προσμίξεων, ακαθαρσιών κ.α.

Όσον αφορά τις ρωγμές δομικών στοιχείων, υπάρχει η **θραυστογραφία** όπου με χρήση μικροσκοπικής απεικόνισης μελετούνται οι επιφάνειες ρωγμάτωσης. Οι επιφάνειες αυτές αποτελούν πηγή πληροφοριών για τα αίτια της ρωγμής, ελαττωμάτων του υλικού, καθώς και την επίδραση φορτίων ή παραγόντων του περιβάλλοντος.

Η μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων των εξαρτημάτων που έχουν αστοχήσει μπορεί να γίνει με τη χρήση των παρακάτω μικροσκοπίων:

- **Οπτικών μικροσκοπίων**, στα οποία η μεγεθυμένη εικόνα της μικροδομής επιτυγχάνεται με ανάκλαση δέσμης ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού. Η διακριτική ικανότητα των μικροσκοπίων αυτών είναι σχετικά περιορισμένη, επιτρέποντας την παρατήρηση σε κλίμακα ομάδας κόκκων του υλικού.

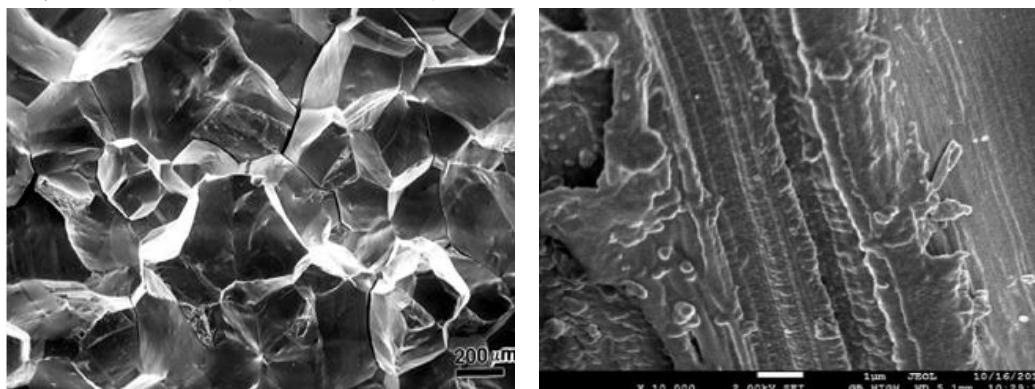
- **Ηλεκτρονικών μικροσκοπίων**, στα οποία η μεγεθυμένη εικόνα της μικροδομής επιτυγχάνεται με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων. Τα μικροσκόπια αυτής της κατηγορίας διακρίνονται σε:

- **Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy - SEM)**, στα οποία η προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του υλικού προοιωνίζοντας ελαστικές και ανελαστικές συγκρούσεις με τα άτομα του εξεταζόμενου υλικού.



Σχήμα 66. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) - ενδεικτικός εξοπλισμός

Χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση αγώγιμων υλικών, αλλά και μονωτικών (κεραμικών και πολυμερών) μετά από ειδική προετοιμασία της επιφάνειας. Έχουν δυνατότητα μεγέθυνσης έως και 250.000 φορές, επιτρέποντας την παρατήρηση της μικροδομής σε επίπεδο ενός κόκκου υλικού, καθώς και την τοπογραφία επιφανειών θραύσης. Με τη χρήση κατάλληλων ανιχνευτών μπορεί να γίνει τοπική στοιχειακή μικροανάλυση, να βρεθεί δηλαδή η χημική σύσταση σε επιλεγμένες περιοχές του υλικού (π.χ. κατακρημνισμάτων στα όρια των κόκκων).



Σχήμα 67. Απεικονίσεις μέσω SEM περικρυσταλλικής θραύσης (αριστερά) και ραβδώσεων κόπωσης (δεξιά)

- **Ηλεκτρονικά Μικροσκόπια Διερχόμενης Δέσμης (Transmission Electron Microscopy - TEM)**, στα οποία η προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων διαπερνά δείγμα του εξεταζόμενου υλικού, μετά από προσεκτική του διαμόρφωση σε «λεπτή τομή». Σε σύγχρονα μικροσκόπια αυτής της κατηγορίας, η δυνατότητα μεγέθυνσης φτάνει τις 1.000.000 φορές, επιτρέποντας την παρατήρηση σε επίπεδο κρυσταλλικού πλέγματος και τον εντοπισμό ατελειών μικροδομής, όπως είναι οι διαταραχές (γραμμικές ατέλειες) ή τα σφάλματα επιστοίβασης. Με κατάλληλους ανιχνευτές είναι επίσης δυνατή η αποτύπωση της κρυσταλλικής δομής του υλικού.

- Κάποιες από τις τεχνικές ανάλυσης της μικροδομής που είναι ευρέως διαδεδομένες είναι οι εξής (McEvily, 2013):

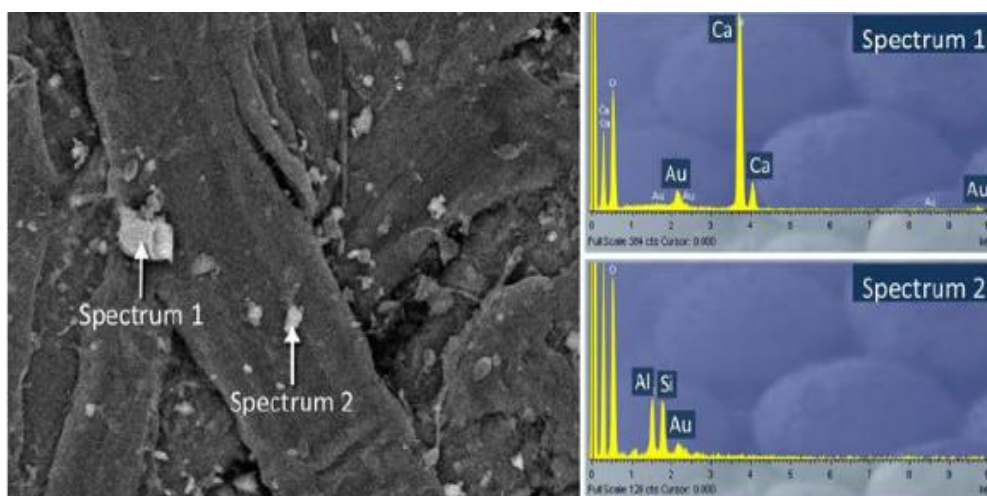
- Orientation Imaging Microscopy using Electron Backscattered Diffraction (EBSD)
- Phase Identification and Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction (XRD)
- Surface Analysis of Deposits using X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)
- Auger Electron Spectroscopy (AES)

4.7.3.3 Χημική ανάλυση (chemical and elemental testing)

Κατά την ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου συστήματος πολλές φορές προτείνεται η διενέργεια χημικού ελέγχου των υλικών και ιδιαίτερα όταν αποδεικνύεται ότι η σύσταση των υλικών αποτελεί το πιθανό κύριο αίτιο αστοχίας. Ελέγχοντας τις συγκεντρώσεις των στοιχείων των κραμάτων, των ελαίων κ.α. είναι δυνατόν να εντοπιστούν μικρές αποκλίσεις στη σύνθεσή τους, γεγονός που πολλές φορές αποτελεί αιτία για πρόκληση αστοχίας (Ψυλλάκη, 2013).

Υπάρχουν πληθώρα τεχνικών χημικού ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με τις κυριότερες να είναι οι εξής:

- Φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy)
- Φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής με επαγωγικό συζευγμένο πλάσμα (inductively coupled plasma atomic absorption spectroscopy)
- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης (atomic absorption spectroscopy)
- Κλασική υγροχημική μέθοδος ανάλυσης (classical wet chemical analysis)
- Χημική ανάλυση σημείου (spot test)



Σχήμα 68. Απεικονίσεις χημικής ανάλυσης μέσω SEM - XFS

Η τεχνική που χρησιμοποιείται κατά κανόνα για τη χημική ανάλυση σε μελέτες αστοχίας μεταλλικών μερών είναι η φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy) και συγκεκριμένα η Energy Dispersive X-ray analysis (EDX), λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας της. Στην τεχνική αυτή τα άτομα των στοιχείων του εξεταζόμενου υλικού διεγείρονται συνήθως με τη δημιουργία πλάσματος και στη φάση της αποδιέγερσής τους εκπέμπουν μια σειρά χαρακτηριστικών για κάθε στοιχείο ακτινοβολιών. Η παρουσία του

είδους των στοιχείων (ποιοτική ανάλυση) ταυτοποιείται με την ανίχνευση των κύριων φασματικών γραμμών, ενώ η περιεκτικότητα των στοιχείων στο δείγμα (ποσοτική ανάλυση) προσδιορίζεται μετά από κατάλληλη μέτρηση της έντασής τους με τη χρήση προτυποποιημένων δειγμάτων του αντίστοιχου στοιχείου. Χαρακτηριστικό αποτελεί το X-ray Fluorescence Spectroscopy (XFS), όπου τα υλικά αφού «βομβαρδιστούν» από ακτινοβολία X (ή γ) εκπέμπουν μια «δευτερεύουσα ακτινοβολία» χαρακτηριστική για κάθε στοιχείο. Άλλη γνωστή διαδικασία ανάλυσης είναι η Quantitative Elemental Analysis by Electron Probe Microanalysis (EPMA).

Τα πολυμερή υλικά μπορούν να ελεγχθούν για τη χημική τους σύσταση χρησιμοποιώντας τεχνικές υπέρυθρης φασματοσκοπίας, χρωματογραφία αερίων και θερμικής ανάλυσης.

4.7.4 Χρήσιμα εργαλεία και όργανα ενός αναλυτή για εργασίες πεδίου - χώρου αστοχίας

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για μια πρώτη «έρευνα» στον χώρο αστοχίας ενός δομικού στοιχείου ποικίλλει ανάλογα το είδος της αστοχίας και τις επικρατούσες συνθήκες. Ωστόσο, παρακάτω παρατίθενται ορισμένα βασικά εργαλεία - όργανα που μπορούν να φανούν χρήσιμα (Lazarevic & Petrovic, 2015), (Berk, 2009) (Βλ. Παράρτημα ΙΣΤ):

- Video camera, μαγνητόφωνο
- Polaroid camera
- 35mm camera ή digital camera με ρυθμιζόμενους φακούς καλής ανάλυσης.
- Μόνιμος μαγνήτης (permanent magnet) για καθορισμό αν το δομικό στοιχείο είναι σιδηρομαγνητικό (χάλυβας) ή όχι.
- Χάρακες - ταινίες μετρήματος, μικρόμετρα, παχύμετρο, μοιρογνωμόνιο, feeler gages, pin gages, sine plates, thread gages για έλεγχο των προδιαγραφών διαστάσεων.
- Log book - διάφορη γραφική ύλη
- Ταινία - ταμπέλες σήμανσεως
- Προστατευτικά γάντια- γυαλιά, ωτοασπίδες
- Εξοπλισμός καθαρισμού, χάραξης, γυαλίσματος
- Κυτίο με εξοπλισμό διεισδυτικών χρωματικών υγρών
- Μεγεθυντικοί φακοί

4.7.5 Βασικά στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνονται στην τελική αναφορά αστοχίας

Η τελική αναφορά της ανάλυσης αστοχίας ενός υλικού θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις αποδείξεις και τα ευρήματα (έλεγχοι) με τα οποία ο αναλυτής θα μπορεί να τεκμηριώσει το συμπέρασμά του για τον τρόπο (μηχανισμό) αστοχίας και τα αίτια που την προκάλεσαν. Επιπλέον, περιλαμβάνονται προτάσεις για επιδιόρθωση της αστοχίας και αποφυγή παρόμοιων ή ίδιων περιστατικών στο μέλλον. Η γραπτή τελική αναφορά πρέπει να είναι όσο πιο απλή γίνεται, περιλαμβάνοντας σε γενικές γραμμές τα κάτωθι (Findlay & Harrison, 2002), (Dennies, 2005):

- Την ομάδα ή τον οργανισμό που διεξήγαγε την ανάλυση.
- Το σύστημα - δομικό στοιχείο που αστόχησε.
- Εισαγωγή, που να περιλαμβάνει τον σκοπό της ανάλυσης, όπως αυτός τέθηκε από τον οργανισμό που διέταξε την εκτέλεσή της.
- Περιγραφή της αστοχίας που μελετήθηκε.
- Περιγραφή των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος τη στιγμή της αστοχίας.
- Απαραίτητες «background» πληροφορίες για το σύστημα (σχεδίαση, κατασκευή, χρήση, συντήρηση)
- Επιπτώσεις της αστοχίας
- Δεδομένα που συλλέχθηκαν (θραύσματα, δοκίμια, χημικές ουσίες, φωτογραφικό υλικό κ.α.)
- Τεχνικές ελέγχου και ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών (μακρό - θραυστογραφία, μικρό - θραυστογραφία, χημική ανάλυση, μηχανική ανάλυση, NDT, εφαρμογή εργαλείων προσομοίωσης κ.α.)
- Ανάλυση των ευρημάτων - αποτελεσμάτων ελέγχου και πως αυτά τεκμηριώνουν το τελικό συμπέρασμα.
- Ανάλυση των τρόπων και των μηχανισμών που συνέβαλαν στην αστοχία.
- Ανάλυση των αιτιών της αστοχίας και την χρονολογική αλληλουχία αυτών (root causes).
- Συμπεράσματα
- Προτεινόμενα προληπτικά ή επιδιορθωτικά μέτρα (ενδεχομένως)
- Οικονομική επιβάρυνση των προληπτικών μέτρων (ενδεχομένως)
- Διαδικασία με την οποία θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και η αποτελεσματικότητα των προληπτικών ή επιδιορθωτικών μέτρων (ενδεχομένως).
- Βιβλιογραφικές αναφορές και παραρτήματα.

4.7.6 Συνήθη σφάλματα και παγίδες στις οποίες μπορεί να υποπέσει ένας αναλυτής αστοχιών

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα από τα πιο συνηθισμένα σφάλματα και παγίδες στις οποίες μπορεί ένας μηχανικός αναλυτής αστοχιών να εκτελέσει κατά τη διάρκεια διεξαγωγής μιας ανάλυσης αστοχίας δομικού στοιχείου συστήματος (Dennies, 2005):

- Να μην κατανοήσει ακριβώς το «πρόβλημα».
- Να μην κατανοήσει πλήρως το πως λειτουργεί το σύστημα ή το δομικό στοιχείο που εξετάζει.
- Να «απολέσει» σημαντικά στοιχεία ή πληροφορίες κατά τη μετακίνηση, τη συσκευασία, την αποσυναρμολόγηση, τον τεμαχισμό ή τον καθαρισμό του δομικού στοιχείου, όπως προϊόντα διάβρωσης, τριβής, θραύσης, χημικές ουσίες, υγρά κ.α.
- Να ακολουθήσει μια «silver bullet» θεωρία ενός μόνο βασικού αίτιου αστοχίας, προσπαθώντας να αποδείξει τη θεωρία και να απορρίψει πιθανά άλλα αίτια αστοχίας ή συνδυασμό αυτών.
- Να μην λάβει υπόψη του όλα τα πιθανά αίτια αστοχίας.
- Να προβεί σε λανθασμένη ή ελλιπή «πορεία» εξεύρεσης της πηγής του αίτιου (μη ορθό brainstorming, ελλιπής fault tree analysis, κ.α)
- Να καταλήξει σε βεβαιωμένα συμπεράσματα.
- Να εκτελέσει περιττούς ή μη σχετικούς ελέγχους και αναλύσεις που δεν αποδεικνύουν το αίτιο της αστοχίας ή να μην ερμηνεύσει ορθά τα αποτελέσματα των ελέγχων.
- Να μην ζητήσει βοήθεια όταν χρειαστεί.
- Να αποτύχει να ακολουθήσει το χρονοδιάγραμμα διεξαγωγής της ανάλυσης και να καθυστερήσει να καταλήξει σε συμπέρασμα (established deadline).
- Να διεξάγει μια ανάλυση των λίγων λεπτών ή ωρών και να δώσει μια απάντηση βασιζόμενη σε υποθέσεις.
- Να υιοθετήσει τη λογική της αντικατάστασης του δομικού στοιχείου που αστόχησε με νέο και να μην προβεί σε ενέργειες εξεύρεσης του αίτιου αστοχίας, λόγω χρόνου, κόστους ή άλλων παραγόντων.
- Να υιοθετήσει τη λογική και την «πολιτική» του οργανισμού στον οποίο εργάζεται και να αποκρύψει πιθανώς την αλήθεια, εξυπηρετώντας άλλα συμφέροντα.
- Να αγνοήσει το πρόβλημα - αστοχία και να το θεωρήσει ως μοναδικό συμβάν που δεν πρόκειται να ξανασυμβεί και άρα δεν αξίζει περαιτέρω εξερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Περιπτώσεις εργαστηριακής ανάλυσης αστοχιών υλικού (case studies)

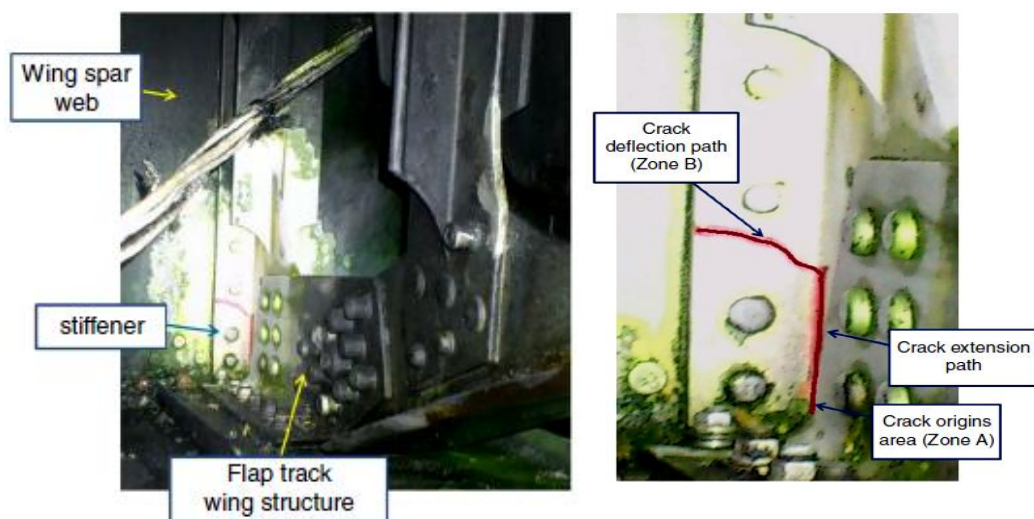
§5.1 Ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου πτέρυγας αεροσκάφους (aluminum extrusion aircraft wing component)

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν εν συντομία τα αποτελέσματα της ανάλυσης αστοχίας ενός δομικού στοιχείου στρατιωτικού μεταφορικού αεροσκάφους. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αστοχίας και τα αίτια που οδήγησαν μια ενισχυτική δοκό (spar stiffener) της κεντρικής πτέρυγας του αεροσκάφους σε θραύση (σχήμα 69) (Stamoulis, Panagiotopoulos, Pantazopoulos, & Papaegthymiou, 2016).

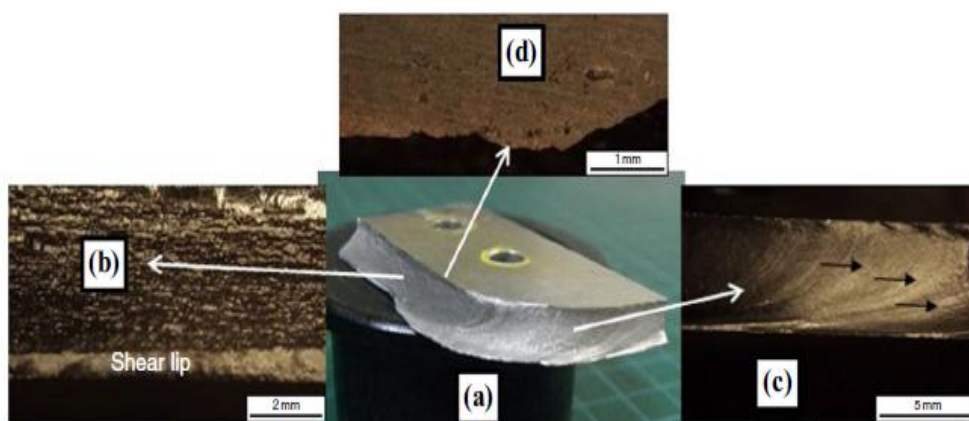
Η δοκός αυτή ήταν κατασκευασμένη από κράμα αλουμινίου 7075-T6 (AlZnMgCuCr) μέσω της διαδικασίας της διέλασης (extrusion). Το κράμα αλουμινίου 7075-T6 χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην αεροπορική βιομηχανία για κατασκευή κύριων δομικών στοιχείων αεροσκάφους, λόγω της μεγάλης αντοχής τους ανά μονάδα βάρους. Λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό των ασκούμενων φορτίων και τους κύριους περιβαλλοντικούς παράγοντες (διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, περιβάλλον υγρασίας και διάβρωσης, παγιδεύσεις νερού, κ.α.), η ομάδα που διεκπεραίωσε την ανάλυση αστοχίας της δοκού πρότεινε ως κύριους τρόπους αστοχίας (failure modes) την κόπωση (fatigue) και τη διάβρωση (corrosion), οι οποία επέδρασαν συνεργατικά πάνω στη δοκό. Ως τεχνικές ελέγχου ανάλυσης αστοχιών, χρησιμοποιήθηκαν η μικροσκοπία - SEM (Scanning Electron Microscopy), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis) και η χημική ανάλυση (chemical analysis).

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**

Ο μακροσκοπικός έλεγχος - θραυσματογραφία αποκάλυψε την ύπαρξη μιας τραχιάς περιοχής (σχήμα 70.b), πιθανώς ως αποτέλεσμα IGC ή SCC λόγω εγγενών μικροδομικών ανωμαλιών, μιας λείας περιοχής θραύσης λόγω κόπωσης (σχήμα 70.c) και μιας επιφανειακής περιοχής με οπές και κοιλότητες (σχήμα 70.d), οι οποίες ενεργούν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων και μαρτυρούν την ύπαρξη χημικών ή ηλεκτροχημικών επιδράσεων.



Σχήμα 69. Φωτογραφία της δοκού που εμφάνισε ρωγμή στο συναρμολόγημα της κεντρικής πτέρυγας του αεροπλάνου

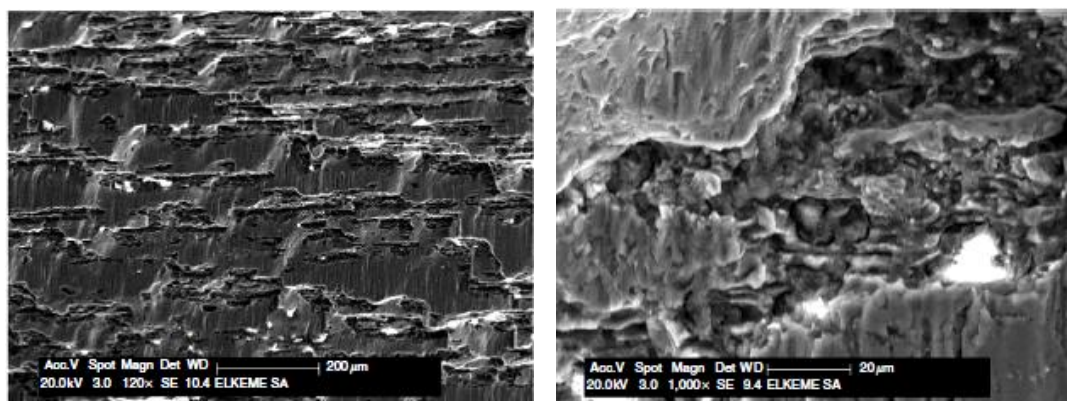


Σχήμα 70. (a) Μακροσκοπική απεικόνιση του θραυσμένου τμήματος της δοκού, (b) Αποδομημένη τραχιά περιοχή - Ζώνη Α, (c) Λεία περιοχή θραύσης λόγω κόπωσης με χαρακτηριστικά beach marks - Ζώνη Β και (d) Επιφανειακή αποδόμηση - παρουσία κοιλοτήτων και οπών

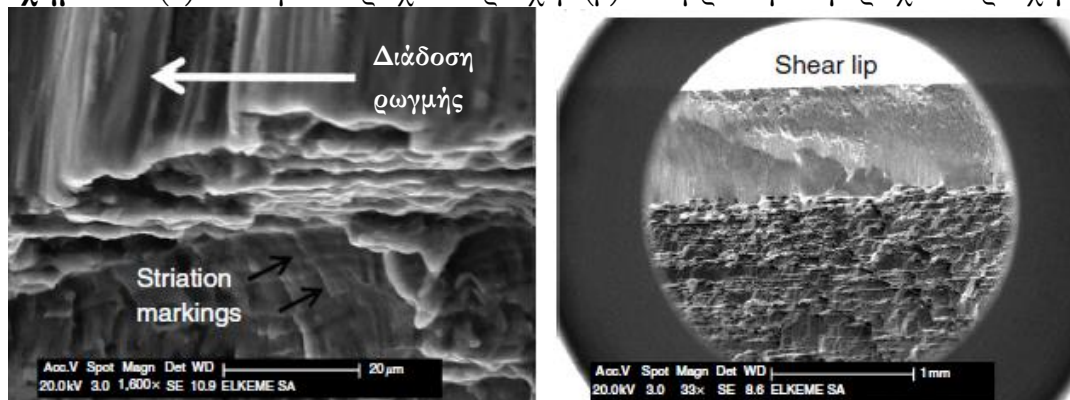
- **Μικρό - θραυστογραφία (SEM)**

Από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρατηρήθηκε ότι η μικροδομή του αλουμινίου (κρυσταλλικοί κόκκοι) (σχήμα 71.α) είχε νηματοειδή μορφή προσανατολισμένη προς την κατεύθυνση της μηχανικής διεργασίας του υλικού (διέλαση). Η δομή αυτή είναι ευάλωτη σε περικρυσταλλική θραύση (IGC) και ιδιαίτερα σε συνθήκες διάβρωσης (σχήμα 71.β). Από τη μορφή των «beach marks» διαφαίνεται η άσκηση κυκλικών φορτίσεων (σχήμα 71.γ), που σε

συνδυασμό με διάβρωση οδήγησε σε ρωγματοποίηση της δοκού. Η ρωγμή φαίνεται να ξεκίνησε από τη Ζώνη Α και διαδόθηκε στη Ζώνη Β με κατεύθυνση αυτή της προσανατολισμένης κρυσταλλικής μικροδομής (IGC).



Σχήμα 71. (α) Ζώνη Α: Τραχιά περιοχή (β) Διάβρωση στη τραχιά περιοχή



(γ) Ζώνη Β: Λεία περιοχή με σημάδια κόπωσης (δ) Επιφανειακή περιοχή

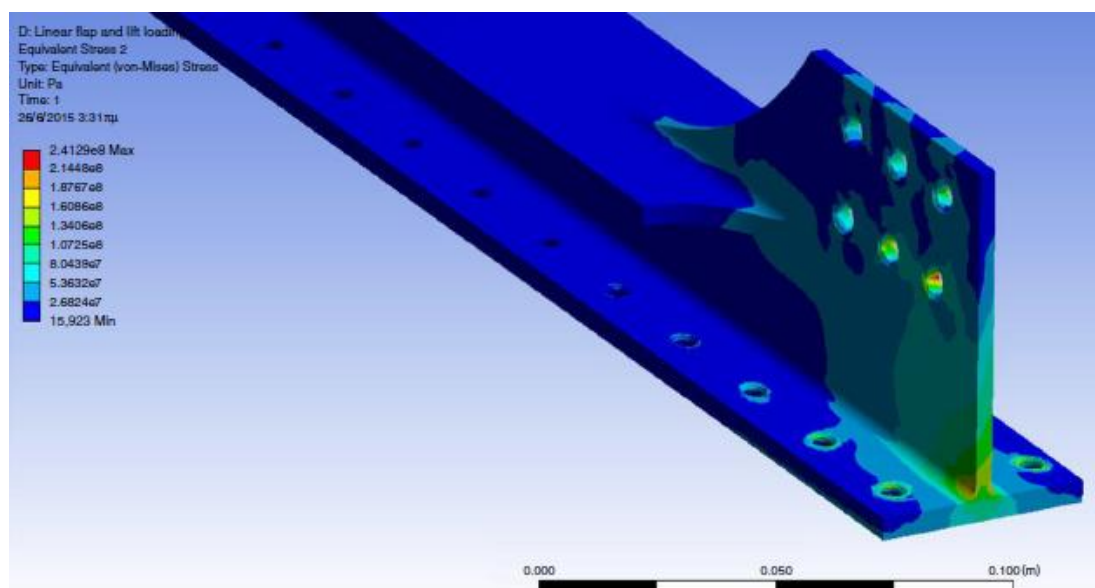
- Χημική ανάλυση

Η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 7075-T6 της δοκού πραγματοποιήθηκε με X-ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy και είναι αυτή του παρακάτω πίνακα:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Other each	Others total
Min wt. %	–	–	1.20	–	2.10	0.18	5.10	–	Rem	–	–
Max wt. %	0.40	0.50	2.00	0.30	2.90	0.28	6.10	0.20	Rem	0.05	0.15

Πίνακας 4. Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 7075-T6

- Έλεγχος με εργαλεία προσομοίωσης (CAD- von Mises Stress Distribution)



Σχήμα 72. Απεικόνιση κατανομής φορτίων με προσομοίωση

Χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία προσομοίωσης (3D FE Model) προκειμένου να υπολογιστούν οι ισοδύναμες τάσεις (von Mises) πάνω στη δοκό χωρίς την ύπαρξη ελαττώματος. Η προσομοίωση υπέδειξε ως περιοχή συγκέντρωσης των μέγιστων τάσεων το σημείο σύνδεσης της δοκού με την υπόλοιπη κατασκευή, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τον μακροσκοπικό έλεγχο της θραύσης (σχήμα 72) και με τη μικροσκοπική θραυσματογραφία, όπου η ρωγμή φαίνεται να ξεκίνησε στη Ζώνη Α και να διαδόθηκε στη Ζώνη Β.

• Συμπεράσματα

Μετά από αξιολόγηση όλων των ευρημάτων συμπεραίνεται ότι η αστοχία της δοκού αυτής ήταν αποτέλεσμα της πρόκλησης μικρορωγμών στα όρια των κρυσταλλικών κόκκων (intergranular), με τη συνέργια διάβρωσης (corrosion) λόγω περιβαλλοντικών επιδράσεων ή/και παραμενουσών τάσεων (residual stresses) που προκαλούνται στο στάδιο της κατασκευής του (διέλαση). Οι μικρορωγμές αυτές, με την επίδραση πολυκυκλικής κόπωσης (HCF), διαδόθηκαν στην κατεύθυνση της προσανατολισμένης από τη διέλαση μικροδομής και εξελίχθηκαν ως τελική ψαθυρή θραύση της δοκού.

§5.2 Ανάλυση αστοχίας κεφαλής κλείστρου ατομικού τυφεκίου M16 (rifle bolt)

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη αναφορά των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αστοχίας της κεφαλής κλείστρου του αμερικανικού ατομικού τυφεκίου M16, (Yu et al., 2005). Το τυφέκιο αυτό χρησιμοποιείται στον στρατό των Η.Π.Α από το 1968, όμως από το 1999 και μετά παρατηρήθηκε μια αύξηση των περιστατικών θραύσης της κεφαλής του κλείστρου, με αποκορύφωση το 2003. Κατά την ανάλυση, η επιφάνεια θραύσης μελετήθηκε μεταλλουργικά με οπτικό στέρεο-μικροσκόπιο, με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM), ενώ πραγματοποιήθηκε και έλεγχος σκληρότητας. Παράλληλα, μελετήθηκε με προσομοίωση η κατανομή των φορτίων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο «Geometric Element Analysis, ProMechanica^R» και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές βολές. Ως τρόπος αστοχίας θεωρείται η θραύση, με πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας την κόπωση σε συνδυασμό με τη διάβρωση και τη φθορά. Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία τα αποτελέσματα των ελέγχων.



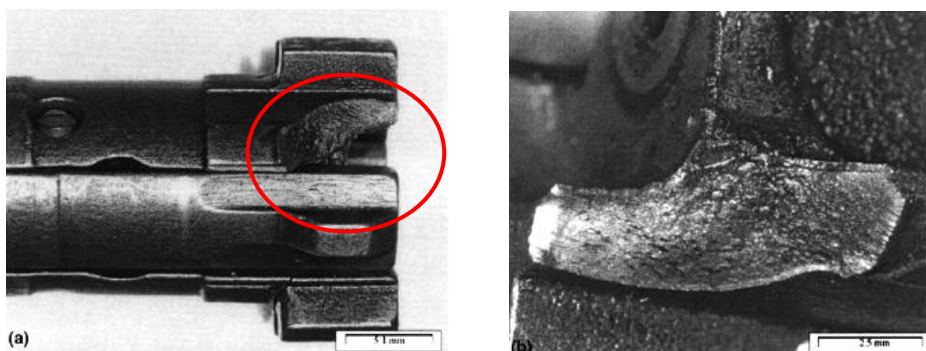
(α) Τυφέκιο

(β) Κλείστρο

(γ) Κεφαλή κλείστρου

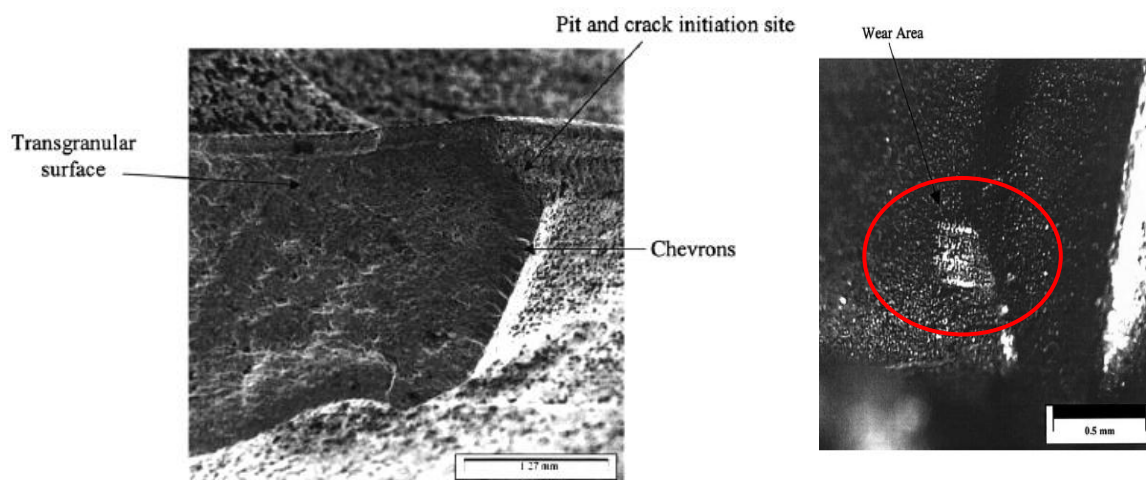
Σχήμα 73. Ατομικό τυφέκιο M16

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**



Σχήμα 74. Επιφάνειες θραύσης της κεφαλής του κλείστρου

- Μικρό - Θραυστογραφία (SEM) - Σκληρομέτρηση



(α) Θραύση

(β) Φθορά από πειραματικές δοκιμές

Σχήμα 75. Επιφάνεια θραύσης και φθοράς μέσω SEM

Ο μικροσκοπικός έλεγχος (SEM) της επιφάνειας θραύσης αποκάλυψε την εμφάνιση «διάβρωσης με βελονισμούς» (pitting corrosion) κοντά στην οδοντωτή περιοχή και μοτίβων τύπου «V» (διακλαδώσεις) στο χείλος της περιοχής θραύσης. Η περιοχή της «διάβρωσης με βελονισμούς» δεν εμφάνιζε μοτίβα διακλάδωσης, μαρτυρώντας ότι η θραύση ξεκίνησε από το σημείο αυτό. Επιπλέον, στα σημεία που υπάρχει «διάβρωση με βελονισμούς» συνήθως παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων, συμβάλλοντας στην εκκίνηση των ρωγμών. Κοντά στην περιοχή εκκίνησης τα σημάδια της επιφάνειας μαρτυρούν την πρόκληση ψαθυρής ενδοκρυσταλλικής θραύσης λόγω της επίδρασης φορτίσεων.

Από τη σκληρομέτρηση (Vickers microhardness) που πραγματοποιήθηκε σε διάφορα σημεία κοντά στην οδοντωτή περιοχή της κεφαλής του κλείστρου αποκαλύφθηκε ότι η σκληρότητα του υλικού ήταν υψηλότερη στην επιφάνεια απ' ότι στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου. Επιπλέον, η σκληρότητα στην οδοντωτή περιοχή ήταν μικρότερη σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή, αποδεικνύοντας ότι το δομικό στοιχείο δεν ήταν ομοιόμορφα κατατεργασμένο, γεγονός που προκάλεσε μεγαλύτερη φθορά στην οδοντωτή περιοχή.

- Χημική ανάλυση

Element	Material specifications [3]	Percent composition of fractured bolt
Carbon	0.10	0.185
Silicon	0.30	0.22
Nickel	3.50	3.43
Manganese	0.50	0.45
Chromium	1.50	1.39
Iron	Balance	Balance

Πίνακας 5. Χημική ανάλυση του δομικού στοιχείου της κεφαλής του κλείστρου

Η χημική ανάλυση απέδειξε αποκλίσεις στη σύνθεση του υλικού της κεφαλής του κλειστρου που αστόχησε σε σχέση με τις προδιαγραφές σύνθεσης του χάλυβα 158 από τον οποίο ήταν κατασκευασμένη.

- **Εργαλεία προσομοίωσης (Geometric Element Analysis, ProMechanica^R)**



Σχήμα 76. Προσομοίωση πεδίου τάσεων της κεφαλής του κλειστρου που αποδεικνύει τη συγκέντρωση τάσεων στο οδοντωτό μέρος του δομικού στοιχείου.

- **Πειραματική διαδικασία**

Κατά την πειραματική διαδικασία τρεις νέες κεφαλές κλειστρου χρησιμοποιήθηκαν σε βολές και παρατηρήθηκε μικροσκοπικά η επιφάνειά τους μετά από 1800 και 3600 πυροδοτήσεις. Οι πυροδοτήσεις αυτές αντιστοιχούν σε τρία και έξι χρόνια ζωής του τυφεκίου αντίστοιχα. Μετά από 1800 βολές παρατηρήθηκε φθορά στην οδοντωτή περιοχή, ενώ μετά από 3600 βολές προκλήθηκε μια εγκόπη στο ίδιο σημείο που υποστηρίζεται ότι ξεκίνησε η θραύση του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου. Η φθορά στο σημείο αυτό είναι επιρρεπής σε διάβρωση και συγκέντρωση δυνάμεων.

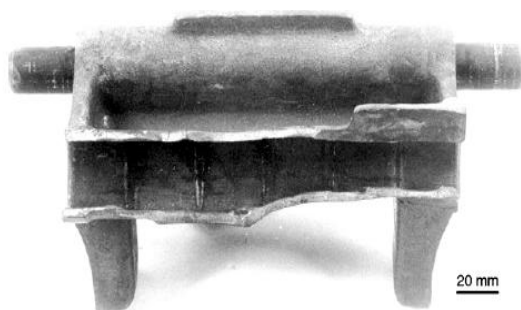
- **Συμπεράσματα**

Συμπεραίνεται ότι ο τρόπος αστοχίας της κεφαλής του κλειστρου ήταν η ψαθυρή ενδοκρυσταλλική θραύση στο οδοντωτό τμήμα αυτής. Ως μηχανισμοί αστοχίας ήταν αυτοί της φθοράς και της «διάβρωσης με βελονισμούς», που είχε ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση υψηλών τάσεων στην οδοντωτή περιοχή. Επιπλέον, στην περιοχή αυτή υπήρχε ήδη συγκέντρωση παραμενουσών τάσεων λόγω μη ομοιόμορφης κατεργασίας - σκλήρυνσης του υλικού. Τέλος, ως σημείο εκκίνησης της μικρορωγμής θεωρήθηκε το σημείο του οδοντωτού τμήματος, όπου παρατηρήθηκε η «διάβρωση με βελονισμούς», η οποία εξαπλώθηκε και οδήγησε σε θραύση.

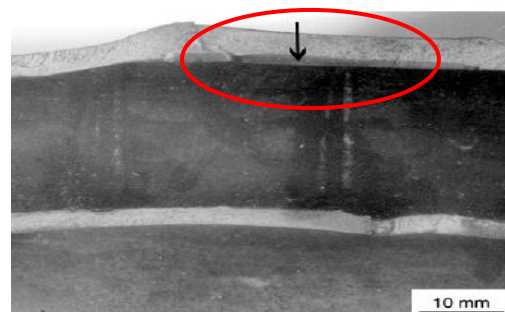
§5.3 Ανάλυση αστοχίας πέλματος ερπύστριας οχήματος μάχης του πεζικού (track shoe)

Ορισμένες παρτίδες πελμάτων ερπύστριας ενός οχήματος μάχης του πεζικού αστόχησαν κατά την εκτέλεση φυσιολογικών δοκιμών. Η αστοχία - θραύση προκλήθηκε κατά μήκος της οπής στην οποία διέρχεται πείρος προκειμένου να συναρμολογηθεί. Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία τα αποτελέσματα των ελέγχων (Reddy, 2004).

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**



(α)

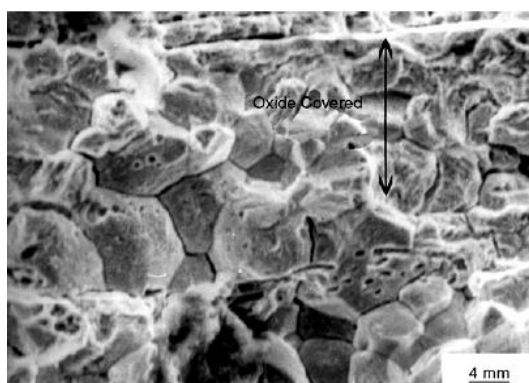


(β)

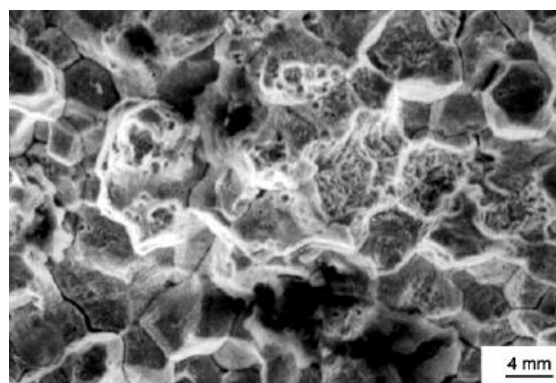
Σχήμα 77. Φωτογραφία του πέλματος που αστόχησε

Η επιφάνεια της θραύσης ήταν κρυσταλλικής μορφής σε όλο της το μήκος, ενώ πολλά σημεία της εσωτερικής επιφάνειας της οπής είχαν καλυφθεί από οξείδωση μαύρου χρώματος (σχήμα 77.β).

- **Μικρό - θραυστογραφία (SEM)**

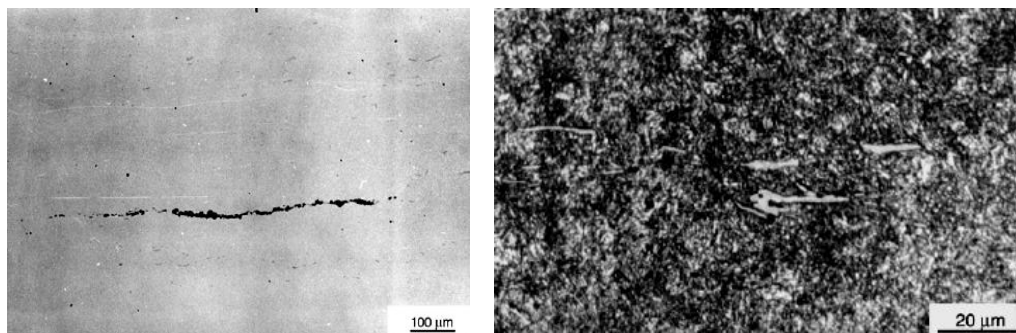


Σχήμα 78. (α) IGC & TGC



(β) IGC

Έπειτα από θραυσματογραφική εξέταση μέσω SEM αποκαλύφθηκε ότι η οξειδωμένη αυτή μαύρη περιοχή είχε υποστεί συνδυασμό ενδοκρυσταλλικής και περικρυσταλλικής θραύσης, ενώ έντονη ήταν και η παρουσία δευτερογενών μικρορωγμών (σχήμα 78.α). Η υπόλοιπη περιοχή αστοχίας είχε υποστεί μόνο περικρυσταλλική θραύση (σχήμα 78.β). Επιπλέον, έπειτα από εξέταση της μικροδομής ανιχνεύτηκαν επιμήκη εγκλείσματα μη μεταλλικών στοιχείων (πυριτικού άλατος - silicate), καθώς και μικρά εγκλείσματα οξειδίου (σχήμα 79). Η μέση σκληρότητα του δομικού στοιχείου ήταν 220 HB.



Σχήμα 79 (α) Έγκλεισμα πυριτικού άλατος (β) Tempered martensite structure

- Χημική ανάλυση

Element	Failed shoe	Specified	Element	Failed shoe	Specified
C	0.33	0.18–0.24	Mo	0.43	0.10–0.15
Si	0.20	1.20–1.50	Cu	0.18	0.3 max
Mn	1.44	0.90–1.20	S	0.05	0.035 max
Ni	—	0.90–1.20	P	0.02	0.035 max
Cr	0.16	0.60–0.90	Fe	Bal	Bal

Πίνακας 6. Χημική ανάλυση δείγματος του θραυσμένου πέλματος

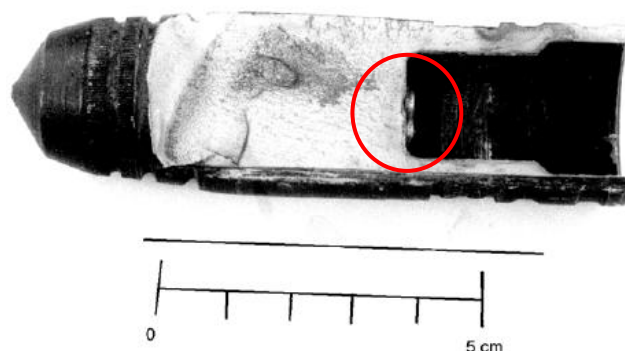
- Συμπεράσματα

Ο τρόπος αστοχίας του πέλματος της ερπύστριας ήταν η ψαθυρή περικρυσταλλική θραύση λόγω «tempered martensite embrittlement» (TME). Συγκεκριμένα, η λάθος επιλογή σύνθεσης του χάλυβα (Mn-Mo, αντί Si-Cr-Mn-Mo), που έχει υποστεί σκλήρυνση σε θερμοκρασία 200°C - 400°C, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μικροδομής ευάλωτης σε θραύση. Επιπλέον, η ύπαρξη πολυάριθμων μη μεταλλικών εγκλεισμάτων στη μικροδομή και η δημιουργία παραμενουσών τάσεων στα σημεία αυτά κατέστησαν το υλικό επιρρεπές σε θραύση, ενώ η παρουσία προϋπάρχουσων μικρορωγμών στην οξειδωμένη εσωτερική περιοχή της οπής επέτειναν την κατάσταση. Επομένως, τα βασικά αίτια της αστοχίας ήταν η λάθος επιλογή του υλικού για τη συγκεκριμένου τύπου θερμική κατεργασία πελμάτων και η μη καθαρότητα του υλικού (ύπαρξη εγκλεισμάτων).

§5.4 Ανάλυση αστοχίας κελύφους διατρητικής οβίδας 30 mm (armor - piercing shell)

Κατά τη διάρκεια βολών παρατηρήθηκε σημαντικός αριθμός διατρητικών οβίδων 30 mm να αστοχούν και συγκεκριμένα να διαρρηγνύονται σε δύο κομμάτια, όταν στον πρώτο κόκκο ανάφλεξης ασκούταν πίεση 320 MPa. Το κέλυφος της συγκεκριμένης οβίδας ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα τύπου HGS-35 από GOST B-10230-75. Προκειμένου ο χάλυβας αυτός να αποκτήσει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, η θερμική του κατεργασία (austenitization) με ελαιοβάπτιση (oil quenching) είχε πραγματοποιηθεί στους 890 °C, αντί των 840 °C και στη συνέχεια είχε σκληρυνθεί (tempering) στους 150°C για 3 ώρες, αντί των 210 °C για 3 ώρες. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των ελέγχων (Reddy, 2004).

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**

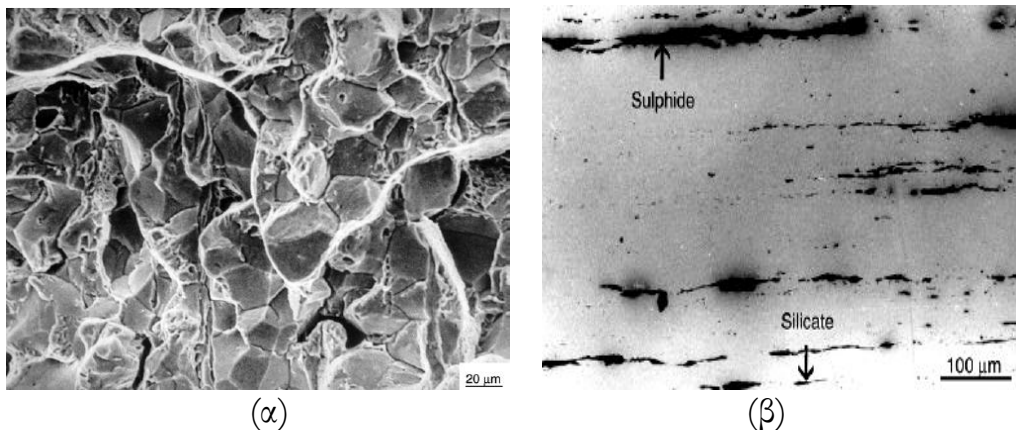


Σχήμα 80. Επιφάνεια θραύσης του κελύφους μακροσκοπικά

Στην επιφάνεια θραύσης παρατηρήθηκαν μοτίβα τύπου «V» στην περιοχή που το συμπαγές κέλυφος συναντά το κοίλο μέρος (σχήμα 80), ενώ υπήρχαν αποκλίσεις στο πάχος του τοιχώματος σε αρκετά κελύφη.

- **Μικρό - θραυστογραφία (SEM)**

Ο μικροσκοπικός έλεγχος της επιφάνειας θραύσης αποκάλυψε την ύπαρξη τόσο περικρυσταλλικών θραύσεων όσο και ενδοκρυσταλλικών ρωγμών, ενώ παρατηρήθηκαν και μεγάλοι επιμήκεις εγκλεισμοί (σουλφίδια και πυριτικό άλας) (σχήμα 81). Επιπλέον, σε περαιτέρω μικροσκοπικό έλεγχο αποδείχθηκε η ύπαρξη δομής σε μορφή «banded» αποτελούμενη από ινώδη «tempered martensite and bainite» (σχήμα 82). Η σκληρότητα του δομικού στοιχείου βρέθηκε της τάξεως των 593 - 613 HV.



Σχήμα 81. (α) Μικροδομή με IGC, TGC και εγκλείσματα, (β) Μικροδομή με εγκλείσματα σουλφιδίου και πυριτικού άλατος (sulphide - silicate)



Σχήμα 82. Μικροδομή δείχνοντας τη «banded» δομή αποτελούμενη από «tempered martensite and bainite»

- Χημική ανάλυση

Element	Actual	Specified	Element	Actual	Specified
C	0.54	0.32–0.39	Mo	0.26	—
Si	0.27	1.10–1.40	S	0.02	0.02 max
Mn	0.66	0.80–1.10	P	0.02	0.02 max
Cr	1.10	1.10–1.40	Fe	Bal	Bal
Ni	0.44	≤0.4			

Πίνακας 7. Χημική ανάλυση χάλυβα κελύφους 30 mm βλήματος

- **Συμπεράσματα**

Ο τρόπος αστοχίας του κελύφους της διατρητικής οβίδας των 30 mm ήταν η ψαθυρή θραύση, με μηχανισμό αστοχίας την περικρυσταλλική και ενδοκρυσταλλική ρωγμάτωση. Ως αίτια αστοχίας θεωρούνται η λάθος χημική σύσταση του χάλυβα (τύπος), η ακατάλληλη θερμική κατεργασία του υλικού, αφού αυτή πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές θερμοκρασίες προκειμένου του δομικό στοιχείο να αποκτήσει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, η μεγάλη συγκέντρωση εγκλεισμάτων (πυριτικό άλας, σουλφίδια), η ύπαρξη «tempered martensite» και τέλος οι διακυμάνσεις τους πάχους του περιβλήματος σε ορισμένα σημεία. Όλα τα παραπάνω κατασκευαστικά ελαττώματα συνέβαλαν στην άσκηση παραμενουσών τάσεων, που σε συνδυασμό με τα αναπτυσσόμενα φορτία της πυροδότησης οδήγησαν στη θραύση του συγκεκριμένου κελύφους.

§5.5 Ανάλυση αστοχίας σωλήνα πυροβόλου μεγάλου διαμετρήματος (large caliber gun barrel)

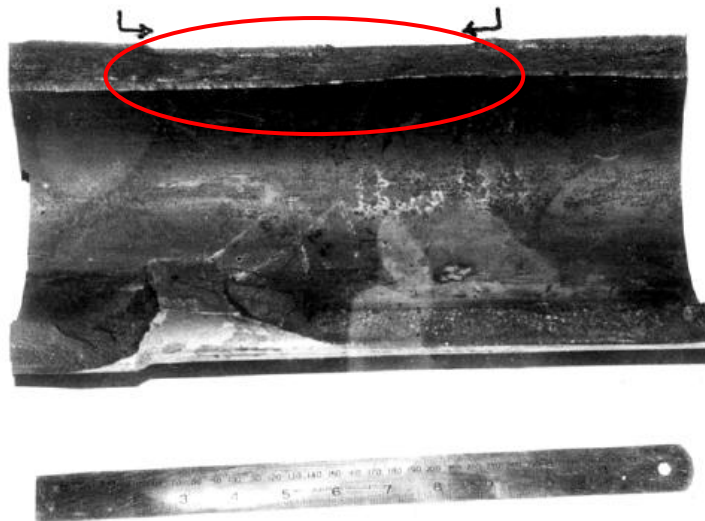
Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η θραύση ορισμένων σωλήνων πυροβόλου μεγάλου διαμετρήματος τεθωρακισμένου οχήματος κατά τη διάρκεια δοκιμής αξιοπιστίας. Η θραύση αρκετών σωλήνων, ήδη στο 1/4 του κύκλου ζωής του, επέβαλε την εκτέλεση της μελέτης αυτής (Makhlouf & Aliofkhazraei, 2016).

Οι σωλήνες ήταν κατασκευασμένοι από κράμα χάλυβα Ni-Cr-Mo-V (GOST 5192-78 grade OXH3MQA) και είχαν κατεργαστεί με θέρμανση (δύο φορές) και ψύξη, προκειμένου να αποκτήσουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, μετά από λεπτομερή έλεγχο του αρχείου της διαδικασίας κατασκευής τους, αποδείχθηκε ότι οι θερμοκρασίες κατά την σκλήρυνσή τους είχαν μειωθεί σε σχέση με τις προδιαγραφές, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντοχή (θερμοκρασίες κατεργασίας: 420 °C και 430 °C, αντί 520 °C και 550 °C). Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των ελέγχων.

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**

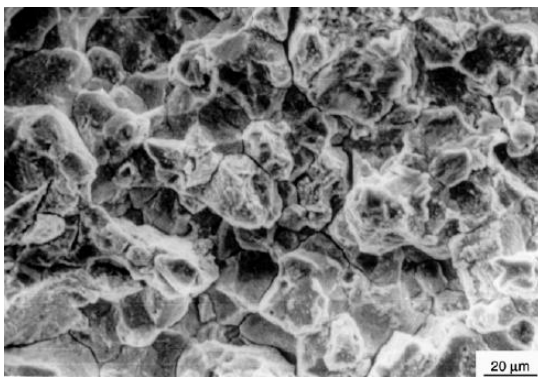
Οι περισσότεροι από τους σωλήνες υπέστησαν θραύση, όπου τα θραύσματα τους είχαν διασκορπιστεί σε μια μεγάλη περιοχή. Εξετάζοντας τα μοτίβα τύπου «V» που υπήρχαν σε όλες τις περιοχές θραύσης, παρατηρήθηκε ότι η προέλευση των περισσότερων θραύσεων

βρισκόταν στην πίσω περιοχή του σωλήνα (προς το πηγαίο), όπου αναπτύσσονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Ωστόσο, υπήρχαν και άλλες ρωγμές με διαφορετικά σημεία εκκίνησης. Στο σχήμα 83 φαίνεται ένα αντιπροσωπευτικό θραύσμα των συγκεκριμένων σωλήνων, όπου η επιφάνεια θραύσης μήκους 180 mm (σήμανση με κόκκινο κύκλο) είναι λεία, κρυσταλλική και χωρίς σχισμές στο χείλος της. Επιπλέον, από τα όρια της περιοχής αυτής ξεκινούν μοτίβα τύπου «V», τα οποία εξαπλώνονται στην υπόλοιπη επιφάνεια θραύσης.

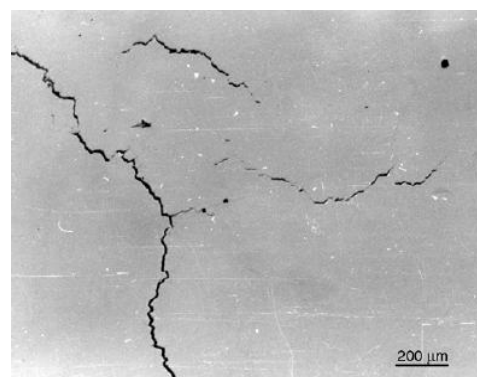


Σχήμα 83. Αντιπροσωπευτικό θραύσμα σωλήνα πυροβόλου

- Μικρό - θραυστογραφία (SEM)



(α)



(β)

Σχήμα 84. (α) Μικροδομή στην οποία φαίνεται η περικρυσταλλική θραύση και η ύπαρξη δευτερευουσών ρωγμών στην λεία περιοχή θραύσης (β) Περικρυσταλλικές ρωγμές κάτω από την επιφάνεια θραύσης

- Μηχανικές ιδιότητες του σωλήνα

Properties	Barrel	Specified (min)	Impact Energy (J)		
Yield strength (MPa)	1240	1170	Temperature	Barrel	Specified (min)
UTS (MPa)	1560	—	Room temperature	25	20
% El	10	—	-50°C	18	16
% RA	35	20			

Πίνακας 8. Μηχανικές ιδιότητες του εξεταζόμενου σωλήνα πολυβόλου

Σκληρότητα: 469 HV, που είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές (425 - 473 HV).

- Χημική ανάλυση

Element	Specified	Barrel	Element	Specified	Barrel
C	0.33–0.40	0.39	S	0.012	0.003
Si	0.17–0.37	0.20	P	0.012	0.008
Mn	0.25–0.50	0.42	As	—	0.008
Ni	3.0–3.5	3.30	Sn	—	0.021
Cr	1.2–1.5	1.45	Sb	—	0.001
Mo	0.35–0.45	0.39	Fe	Bal	Bal
V	0.10–0.11	0.17			

Πίνακας 9. Μηχανικές ιδιότητες σωλήνα πυροβόλου

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης έδειξαν φυσιολογικές τιμές στη σύνθεση των στοιχείων, βάσει των προδιαγραφών.

- Συμπεράσματα

Ο τρόπος αστοχίας των σωλήνων πυροβόλου ήταν η ψαθυρή θραύση, έχοντας ως μηχανισμό αστοχίας τη δημιουργία και διάδοση περικρυσταλλικών ρωγμών. Αίτιο της θραύσης ήταν η μείωση της δυσθραυστότητας του χάλυβα κατά την θερμική του κατεργασία (temper embrittlement), λόγω σιλήρυνσής του σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές των προδιαγραφών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χάλυβας είναι επιρρεπής σε «temper embrittlement» κατά τη θερμική του κατεργασία σε θερμοκρασίες 350 °C - 500 °C. Επιπλέον, οι παρατηρούμενες περικρυσταλλικές θραύσεις μαζί με δευτερεύουσες ρωγμές, καθώς και η παρουσία περικρυσταλλικών ρωγμών σε πολλά σημεία μαρτυρούν ότι ο χάλυβας «υπέφερε» από «temper embrittlement». Τέλος, οι μικρορωγμές αυτές κάτω από την άσκηση υψηλών φορτίων και θερμοκρασιών κατά την πυροδότηση, εξαπλώθηκαν και οδήγησαν σε θραυσματοποίηση του σωλήνα, γεγονός που αποδεικνύεται και από τα μοτίβα τύπου «V» στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας θραύσης.

§5.6 Ανάλυση αστοχίας κύριου τροχού μαχητικού αεροσκάφους (main wheel)

Η αστοχία που αναλύεται σε αυτή την παράγραφο παρουσιάστηκε στον εξοπλισμό προσγείωσης ενός μαχητικού αεροσκάφους και συγκεκριμένα σε έναν από τους δύο κύριους τροχούς κατά τη διάρκεια κίνησης του αεροσκάφους στο έδαφος, πριν την απογείωσή του. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε θραύση στο κεντρικό μέρος του τροχού, όπου συνδέεται μέσω ρουλεμάν με το υπόλοιπο μέρος του συστήματος προσγείωσης (Makhlouf & Aliofkhazraei, 2016).

Ο τροχός ήταν κατασκευασμένος από κράμα αλουμινίου 2014 - T6 και σύμφωνα με το log-book είχε πραγματοποιήσει 299 πτήσεις, ενώ ο τελευταίος λεπτομερής έλεγχος είχε πραγματοποιηθεί στην 241 πτήση με NDT (eddy current test).

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των ελέγχων.

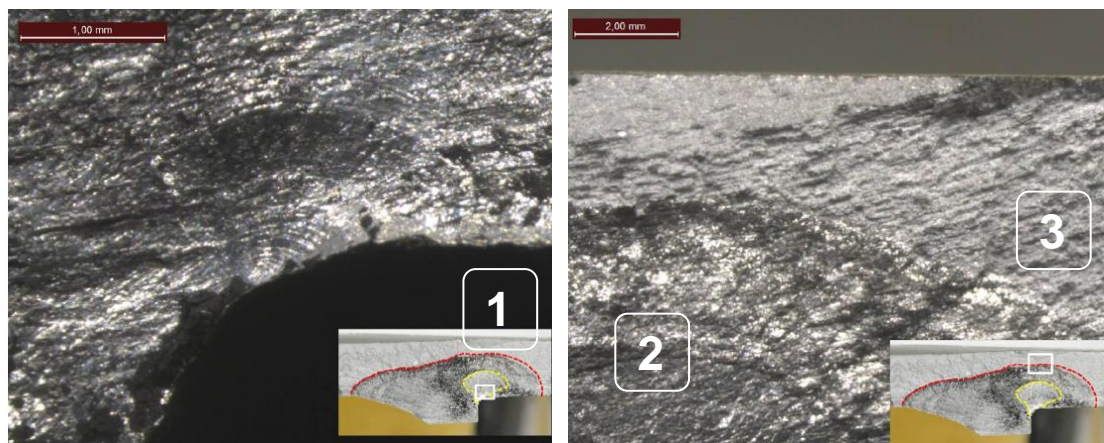
- **Οπτικός έλεγχος και Μακρο - Θραυστογραφία**



Σχήμα 85. Τροχός αεροσκάφους και θραυσμένο τμήμα αυτού

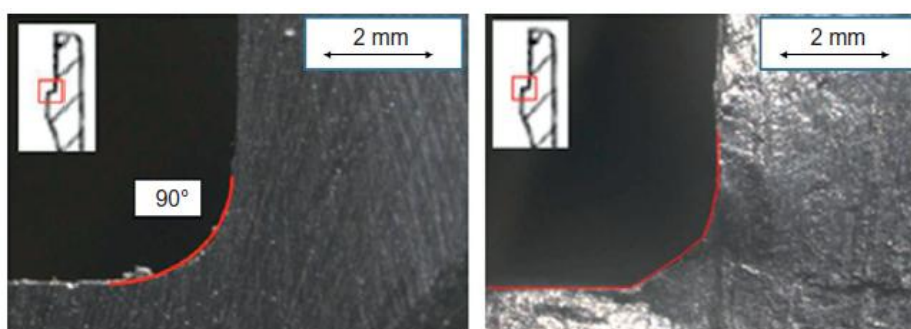
Η ρωγμή φαίνεται ότι ξεκίνησε από το κεντρικό τμήμα του τροχού (κυλινδρικό τμήμα), στο σημείο που συνδέεται και φιλοξενεί το ρουλεμάν σύνδεσης και εξαπλώθηκε στο λοιπό κεντρικό μέρος, προκαλώντας τη θραύση του. Σύμφωνα με τον θραυστογραφικό έλεγχο, στην επιφάνεια της θραύσης διακρίνονται τρεις διαφορετικές μορφολογικά περιοχές: η περιοχή 1, όπου είναι πιο λεία, επίπεδη και φωτεινή με χαρακτηριστικά «beach marks», η περιοχή 2, η οποία είναι λεία, με κάποια αδρά χαρακτηριστικά - κοιλότητες και «beach marks» και τέλος, την περιοχή 3, που είναι η πιο σκληρή και αδρή, χωρίς «beach marks» και

μαύρα κατάλοιπα. Η περιοχή 3 είναι η περιοχή όπου συνέβη η τελική αστοχία, η ψαθυρή θραύση (σχήμα 86). Στο σχήμα 87 φαίνεται η αρχική πλαστική παραμόρφωση που έχει προκληθεί στο εσωτερικό του κυλινδρικού τμήματος του τροχού (σημείο εκκίνησης ρωγμής) λόγω κακής ευθυγράμμισης με το ρουλεμάν, σε σύγκριση με αντίστοιχο τροχό χωρίς αστοχία.



Σχήμα 86. (α) Περιοχή θραύσης 1

(β) Περιοχή θραύσης 2 και 3



(α) Τροχός χωρίς αστοχία (β) Τροχός με αστοχία και πλαστική παραμόρφωση.

Σχήμα 87. Εσωτερική περιοχή εκκίνησης της ρωγμής

- **Μικρό - θραυστογραφία (FESEM)**



Σχήμα 88. Ραβδώσεις κόπωσης στην περιοχή 1

Από τις παρατηρήσεις με Field Emission SEM (ενσωματωμένο EDS) στις περιοχές 1 και 2 διαπιστώθηκε η επίδραση κόπωσης υψηλού κύκλου (high - cycle fatigue) με ραβδώσεις της τάξεως των 10^5 .

- **Χημική ανάλυση - σκληρομέτρηση - μετρήσεις**

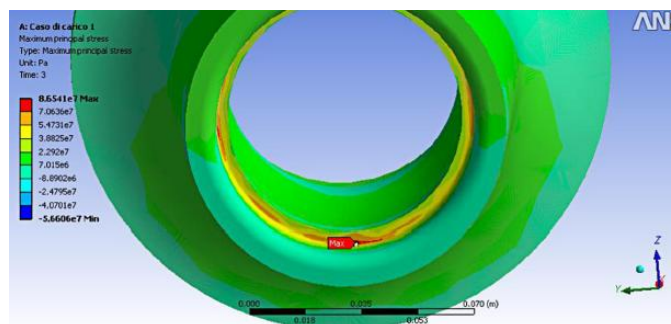
Η χημική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με φασματοσκοπία εκπομπής (Energy Dispersive Spectroscopy - EDS) και απέδειξε ότι η σύνθεση του δοκιμίου ήταν σύμφωνη με τις προδιαγραφές του AA 2014-T6. Ελέγχθηκε συγκεκριμένα και το σημείο εκκίνησης της ρωγμής και τα αποτελέσματα ήταν φυσιολογικά.

Επιπλέον, ελέγχθηκε με υπέρυθρη φασματοσκοπία (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) δείγμα από το μαύρο οργανικό υλικό που βρέθηκε στην επιφάνεια θραύσης. Αποδείχθηκε ότι ήταν καουτσούκ από το σύστημα των φρένων, το οποίο όμως αποκλείστηκε από τα πιθανά αίτια αστοχίας, μιας και είχε παρατηρηθεί σε πιο έντονη μορφή και σε άλλους τροχούς οι οποίοι δεν είχαν αστοχήσει.

Πραγματοποιήθηκε επιπλέον έλεγχος σκληρότητας με τη μέθοδο Rockwell T30 στην εξωτερική επιφάνεια του θραυσματοποιημένου δοκιμίου και τα αποτελέσματα (τιμή 71) ήταν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του AA 2014 -T6.

Τέλος, μετρήθηκε ο δακτύλιος του ρουλεμάν που «φιλοξενείται» στο κεντρικό κυλινδρικό τμήμα του τροχού και βρέθηκε να έχει κατά 5 μm μεγαλύτερη διάμετρο από τις τιμές σχεδίασης.

- **Προσομοίωση - Έλεγχος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA)**



Σχήμα 89. Ένδειξη συγκέντρωσης τάσεων μέσω προσομοίωσης.

Θέτοντας κάποιες παραμέτρους μελετήθηκαν με προσομοίωση οι παραμένουσες τάσεις λόγω κακής ευθυγράμμισης του ρουλεμάν στην υποδοχή του τροχού, καθώς και τα ασκούμενα φορτία που δημιουργούνται σε συνθήκες λειτουργίας. Έτσι, αποδείχθηκε ότι σε

συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατόν να ασκηθούν τάσεις της τάξεως των 300 MPa στο σημείο που θεωρείται ότι ξεκίνησε η ρωγμή, ενώ το όριο κόπωσης του AA 2014 -T6 είναι 125 MPa.

- **Συμπεράσματα**

Ο τρόπος αστοχίας του κύριου τροχού του μαχητικού αεροσκάφους ήταν η ψαθυρή θραύση του κεντρικού σημείου σύνδεσής του με το άκρο - ρουλεμάν. Ως μηχανισμός αστοχίας θεωρείται η πολυκυκλική κόπωση της τάξεως των 10^5 (HCF), λόγω των παραμενουσών τάσεων και της άσκησης κυκλικών φορτίων κατά τη λειτουργία του αεροσκάφους. Ως κύριο αίτιο αστοχίας εκτιμάται ότι ήταν οι πλαστικές παραμορφώσεις που προκλήθηκαν κατά τη διαδικασία εγκατάστασης του τροχού στο ρουλεμάν, καθώς ο δακτύλιος του δεύτερου είχε μεγαλύτερη διάμετρο (κατά 5 μm). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προκληθούν πλαστικές παραμορφώσεις στο εσωτερικού του κυλινδρικού τμήματος του τροχού, γεγονός που ευνοεί τη συγκέντρωση τάσεων. Τέλος, από τους συγγραφείς προτείνεται να ακολουθηθούν άλλες NDT (π.χ. υπέρηχοι) κατά τους περιοδικούς ελέγχους, μιας και ο έλεγχος με δινορεύματα δεν εντόπισε με επιτυχία την κόπωση.

§5.7 Ανάλυση αστοχίας ηλεκτρικών επαφών (electrical contacts) ενός DIMM (Dual In-line Memory Module)

Κατά την εγκατάσταση ενός αριθμού server σε έναν οργανισμό παρατηρήθηκε ότι έξι από αυτά είχαν χάσει μεγάλο μέρος της μνήμης τους, γεγονός που επηρέαζε τη λειτουργία των συστημάτων. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με αντικατάσταση των DIMM (είδος dynamic RAM IC). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αστοχίας των DIMM (ηλεκτρικές επαφές) και των θυρών υποδοχής τους (slot) στην πλακέτα για δύο server που εμφάνισαν το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας μνήμης. Η ανάλυση περιλάμβανε ηλεκτρική απομόνωση του σφάλματος (fault isolation) και ακολούθως οπτικό- μικροσκοπικό έλεγχο, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η αστοχία οφειλόταν σε διάβρωση της περιοχής των ηλεκτρικών επαφών, λόγω παρουσίας οξειδίων του Νικελίου (ISTFA, 2009).



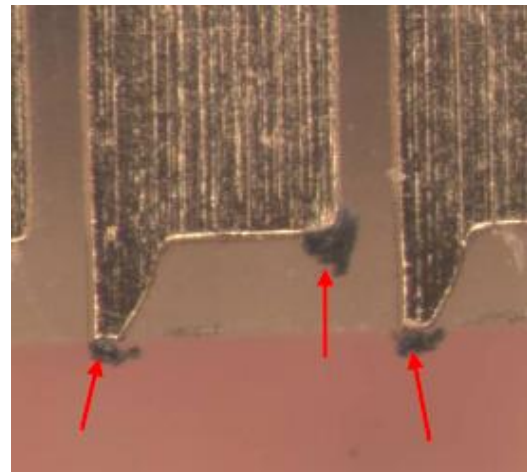
Σχήμα 90. Πλακέτα με ενσωματωμένο DIMM

- **Οπτικός μακροσκοπικός έλεγχος**

Με τον οπτικό έλεγχο διαπιστώθηκε ότι πολλές από τις ηλεκτρικές επαφές εμφάνιζαν απόξεση στα περιβλήματα (housing) των pins (σχήμα 91.α). Επιπλέον, στα memory modules παρατηρήθηκαν βαθειά σημάδια φθοράς στο «σώμα φιλοξενίας» (housing body) των golden fingers (σχήμα 91.β).



(α)

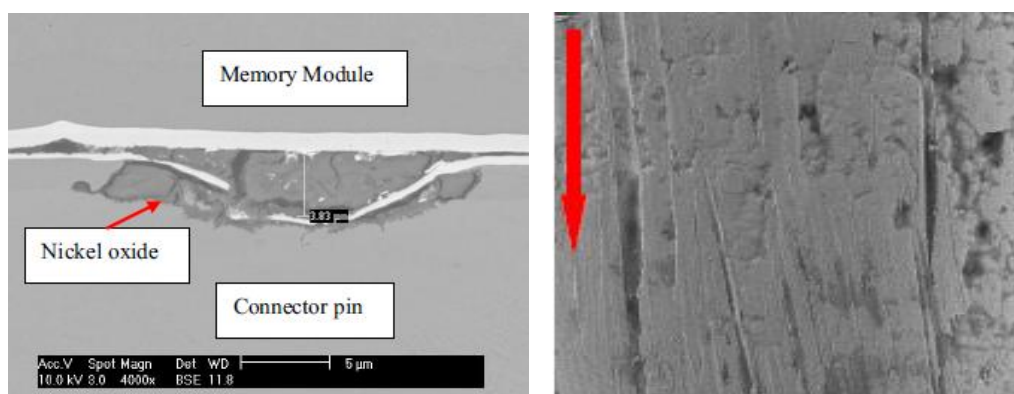


(β)

Σχήμα 91. Οπτικό μικροσκόπιο: (α) απόξεση στα περιβλήματα των pins στις ηλεκτρικές επαφές (β) σημάδια φθοράς στο housing body των memory modules

- **Μικροσκοπικός έλεγχος (SEM - EDS)**

Ο μικροσκοπικός έλεγχος SEM και η χημική ανάλυση EDS φανέρωσε την παρουσία οξειδίων Νικελίου στα σημεία σύνδεσης (pins) των memory modules (σχήμα 92).



(α)

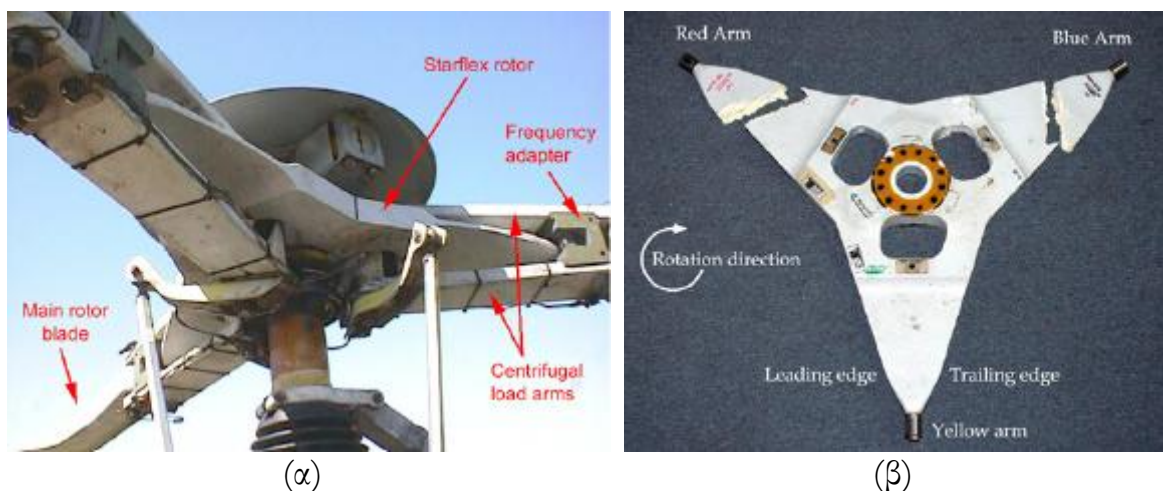
Σχήμα 92. Εικόνα SEM: (α) παρουσία οξειδίων νικελίου στην επιφάνεια ηλεκτρικής επαφής (β) σημάδια φθοράς σε pin

- **Συμπέρασμα**

Η ανάλυση αστοχίας των ηλεκτρικών επαφών των DIMM κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο μηχανισμός αστοχίας που επέδρασε και προκάλεσε φθορά και διάβρωση στα pins, τα golden fingers και τα housings αυτών ήταν η παρουσία οξειδίων νικελίου. Το νικέλιο υπάρχει ως υπόστρωμα κάτω από ένα στρώμα χρυσού των pins και των golden fingers και όταν εκτεθεί στην ατμόσφαιρα, οξειδώνεται. Τα σημάδια - εκδορές (σχήμα 92) που παρατηρήθηκαν πάνω στα pins μαρτυρούν την έκθεση του νικελίου. Ως αίτιο της αστοχίας πιθανολογείται η «manual» τοποθέτηση των DIMM στην πλακέτα, μιας και η είσοδος στην υποδοχή με λάθος γωνία προκαλεί εκδορές στα pins και τα DIMM αστόχησαν στην αρχική τους λειτουργία. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα memory modules είναι κατασκευασμένα να επανατοποθετούνται με μηχανικό τρόπο έως 25 φορές. Τέλος, η παρουσία οξειδίων νικελίου είχε ως συνέπεια τη μείωση της ηλεκτρικής επαφής, αυξάνοντας έτσι την ηλεκτρική αντίσταση και προκαλώντας προβλήματα στη λειτουργία του DIMM ως «memory chip».

§5.8 Ανάλυση αστοχίας δομικού στοιχείου στροφείου ελικοπτέρου (rotor head component of an ADF helicopter)

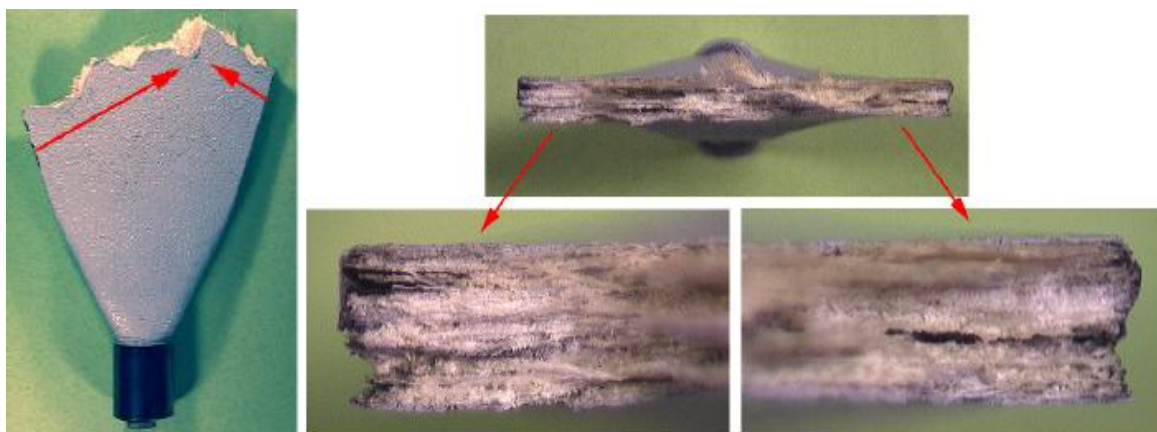
Κατά την προσγείωση (run-on landing) δύο διαφορετικών ADF ελικοπτέρων παρατηρήθηκε θραύση σε δομικό στοιχείο του στροφείου κεφαλής (Starflex Rotor), το οποίο ήταν κατασκευασμένο από «fiberglass». Η συγκεκριμένη ανάλυση αστοχίας πραγματοποιήθηκε προκειμένου να εξακριβωθεί αν η αστοχία οφειλόταν σε «συντονισμό εδάφους» (ground resonance) ή σε ελάττωμα του δομικού αυτού στοιχείου. Στο ένα ελικοπτερο παρατηρήθηκε θραύση σε δύο από τους τρεις «star» βραχίονες, ενώ στο δεύτερο μόνο σε έναν βραχίονα (Pell, Athiniotis, & Clark, n.d.).



Σχήμα 93. (α) Το starflex στροφέιο εγκατεστημένο στο κεντρικό στροφέιο του ελικοπτέρου
(β) Starflex στροφέιο με αστοχία (θραύση) σε δύο από τους τρεις «star» βραχίονες

- **Οπτικός έλεγχος και Μακρό - θραυστογραφία**

Ο οπτικός έλεγχος των τριών βραχιόνων των δύο ελικοπτέρων που παρουσίασαν αστοχία απέδειξε ότι είχαν παρόμοιες επιφάνειες θραύσης. Και στις τρεις περιπτώσεις, η θραύση ξεκίνησε σε δύο επίπεδα, όπου κάθε επίπεδο ήταν κάθετο είτε στο εμπρόσθιο είτε οπίσθιο τμήμα του βραχίονα (leading or trailing edge) και εξαπλώθηκε προς το κέντρο, όπως δείχνει το σχήμα 94.

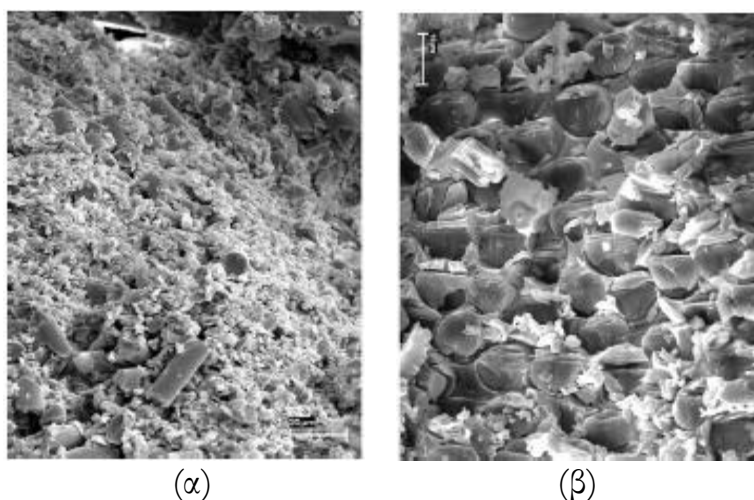


Σχήμα 94. Επιφάνειες θραύσης ενός βραχίονα του starflex στροφείου ελικοπτέρου

Ο οπτικός μακροσκοπικός έλεγχος απέδειξε ότι οι επιφάνειες θραύσης ήταν πιο επίπεδες στις άκρες του βραχίονα, ενώ είχαν ινώδη μορφή στο κέντρο αυτού. Αυτό αποδεικνύει ότι η θραύση επήλθε κυρίως μετά την πρόκληση ρωγμών λόγω θλιπτικών τάσεων στις άκρες του βραχίονα, σε συνδυασμό με την άσκηση κάποιας τάσης στην κεντρική περιοχή.

- **Μικρό - θραυστογραφία (SEM)**

Πραγματοποιήθηκε εξέταση των δειγμάτων με SEM, όπου επαληθεύτηκε ο ισχυρισμός του μακροσκοπικού ελέγχου, δηλαδή ότι οι επίπεδες επιφάνειες θραύσης προκλήθηκαν εξαιτίας θλιπτικών φορτίων, όπως μαρτυρούν οι παραμορφωμένες (λυγισμένες) ίνες στο σχήμα 95 (β).



Σχήμα 95. Εικόνα από SEM (α) Επίπεδη επιφάνεια θραύσης της άκρης βραχίονα του starflex στροφείου (β) Παραμόρφωση - λύγισμα ινών στην επιφάνεια θραύσης

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι δεν εντοπίστηκαν προϋπάρχουσες ατέλειες ή σημάδια κόπωσης στις επιφάνειες θραύσης.

- **Συμπέρασμα**

Από την παραπάνω ανάλυση διαπιστώνεται ότι ο τρόπος αστοχίας των βραχιόνων του starflex στροφείου του ελικοπτέρου ήταν η θραύση λόγω υπερφορτίσεων, η οποία επήλθε έπειτα από πρόκληση ρωγμών λόγω άσκησης θλιπτικών τάσεων στα άκρα των βραχιόνων, οι οποίες εξαπλώθηκαν ραγδαία προς το κέντρο, προκαλώντας την τελική θραύση. Ως αίτιο αστοχίας θεωρείται ο «συντονισμός εδάφους» (ground resonance), ο οποίος αποτελεί ένα καταστροφικό για το ελικόπτερο φαινόμενο δόνησης, που προκαλείται όταν οι έλικες περιστρέφονται μη φυσιολογικά, ενώ το ελικόπτερο είναι στο έδαφος. Κατά τον «συντονισμό εδάφους» αναπτύσσονται τεράστια φορτία στο οριζόντιο επίπεδο (lead-lag loads), τα οποία μπορούν να ασκήσουν θλιπτικές φορτίσεις στα άκρα των βραχιόνων του starflex στροφείου. Καθώς τα σύνθετα υλικά είναι επιρρεπή στην άσκηση θλιπτικών τάσεων, η θραύση λόγω θλίψης αποτελεί τον κυριότερο τρόπο αστοχίας, δεδομένου ότι δεν εντοπίστηκε κανένα προϋπάρχον ελάττωμα ή σημάδι κόπωσης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχία.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Το πρόβλημα της αστοχίας των οπλικών συστημάτων και της επίπτωσης στη λειτουργική τους ικανότητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της Πολεμικής Βιομηχανίας. Ήδη από το στάδιο της σχεδίασης και της κατασκευής πραγματοποιούνται όλοι οι δυνατοί υπολογισμοί και έλεγχοι, προκειμένου να προβλεφθούν οι πιθανές αστοχίες και να ληφθούν όλα τα προληπτικά μέτρα προς αποφυγή εκδήλωσης αυτών. Όμως, κάθε σύστημα όσο σύγχρονο και να είναι, θα εκδηλώσει κάποια μορφή αστοχίας, η οποία πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική για το σύστημα.

Με την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή συμπεραίνεται ότι κάθε αστοχία είναι μοναδική και πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τέτοια. Η ομάδα ανάλυσης θα πρέπει να ακολουθεί μια συστηματική διαδικασία και μεθοδολογία, η οποία θα προσαρμόζεται ανά περίπτωση. Το είδος της αστοχίας και του υλικού του δομικού στοιχείου που αστόχησε καθορίζει τα βήματα και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν. Στα μεταλλικά δομικά στοιχεία παρατηρούνται οι μηχανισμοί της κόπωσης (fatigue), της διάβρωσης (corrosion), της θραύσης (fracture), της φθοράς (wear), της παραμόρφωσης (deformation) ή συνδυασμού αυτών, με μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης αυτό της κόπωσης και έπειτα της διάβρωσης. Στα σύνθετα υλικά εκτός των προαναφερθέντων τρόπων αστοχίας μπορεί να παρατηρηθούν επιπλέον, ρωγμές ή παραμόρφωση στην μήτρα ή τις ίνες, αποκόλληση - διαχωρισμός της μήτρας ή των ινών, παραμόρφωση των κόκκων ενίσχυσης, ρωγμές στα στρώματα, αποκολλήσεις των πολυστρωματικών υλικών (αστοχία στους δεσμούς) κ.α. Επιπλέον, τα ηλεκτρονικά - ηλεκτρολογικά δομικά στοιχεία και το λογισμικό μέρος ενός οπλικού συστήματος αστοχούν με διαφορετικό τρόπο, γεγονός που καθορίζει τον τρόπο ανάλυσης αστοχίας των εξαρτημάτων αυτών. Έτσι, αναλύοντας τους πιθανούς τρόπους και μηχανισμούς αστοχίας μέσω μιας σειράς κατάλληλων τεχνικών ελέγχων, καταστρεπτικών ή μη (NDT - DT), η ομάδα ανάλυσης μπορεί να καταλήξει σε ένα αξιόπιστο συμπέρασμα για τα αίτια και τους παράγοντες αστοχίας.

Τα συνήθη αίτια αστοχίας που έχουν αποκαλυφθεί κατά τις αναλύσεις αστοχιών είναι: σφάλματα σχεδίασης (design failures), μη κατάλληλη επιλογή υλικού (material), κατασκευαστικές ατέλειες (manufacturing - fabrication deficiencies), ελαττώματα συγκόλλησης - συναρμολόγησης ή εγκατάστασης (assembly/installation defects), συνθήκες λειτουργίας (operation conditions), έλλειψη συντήρησης ή ακατάλληλη - ανεπαρκής συντήρηση και κακές επισκευές (maintenance - repairs), ακατάλληλος έλεγχος - επιθεώρηση του συστήματος (inspection), μη ορθός τρόπος χρήσης του συστήματος (use) κ.α. Όλα τα παραπάνω αποτελούν παράγοντες και αίτια αστοχίας που μπορεί να θέσουν ένα οπλικό σύστημα εκτός λειτουργίας σε οποιαδήποτε φάση του κύκλου ζωής του. Επομένως, μόνο με την ανάπτυξη καλύτερων τεχνικών σχεδίασης, τη βελτίωση των τεχνικών πρόβλεψης της

αξιοπιστίας του συστήματος, την παροχή περισσότερων και ολοκληρωμένων πληροφοριών για τα υλικά, τον βελτιωμένο ποιοτικό έλεγχο, τις κατάλληλες διαγνωστικές διαδικασίες, την αποτελεσματική συντήρηση, τη λίπανση και καθαριότητα του υλικού, την καλύτερη κατανόηση των τρόπων αστοχίας, τη βελτιωμένη ανάλυση αστοχιών και τη συνεχή τροφοδότηση των αποτελεσμάτων ανάλυσης (αρχείο) κ.α, μπορούν να αποφευχθούν ή να περιοριστούν τα περιστατικά αστοχίας.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα πρέπει να συνοψίζονται κατά λιτό και περιεκτικό τρόπο σε ένα είδος αναφοράς, η οποία θα αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την ορθή επιδιόρθωση της αστοχίας, την πραγματοποίηση σχεδιαστικών αλλαγών, τη λήψη προληπτικών μέτρων προς αποφυγή μελλοντικών αστοχιών, καθώς και για την αποικατάσταση της αλήθειας μέσω δικαστικών ή διοικητικών διαδικασιών σε περιπτώσεις απώλειας ζωής ή υγείας. Επιπλέον, εκτός των θεμάτων ασφαλείας, τα οικονομικά οφέλη από την αποφυγή μελλοντικών παρόμοιων αστοχιών αποτελεί ένα κίνητρο διενέργειας της ανάλυσης αστοχιών.

Τέλος, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν να αποτελέσει ένα είδος βοηθήματος - υποβάθρου για οποιονδήποτε επιχειρήσει να ασχοληθεί με αστοχίες οπλικών συστημάτων. Παραθέτοντας με συνοπτικό και περιεκτικό τρόπο τα βασικότερα θεωρητικά στοιχεία της έννοιας του συστήματος, της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής, της τεχνολογίας των υλικών, της Μηχανικής των Θραύσεων και της Αντοχής των Υλικών, της έννοιας της αστοχίας, της μεθοδολογίας ανάλυσης αστοχιών, των μηχανισμών και αιτιών μιας αστοχίας, καθώς και των τεχνικών ελέγχου, επιχειρήθηκε να δοθεί όλη η απαιτούμενη πληροφορία ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει ένα βασικό υπόβαθρο που θα τον καταστήσει ικανό να μελετήσει οποιαδήποτε αναφορά ανάλυσης αστοχίας οπλικού συστήματος ή και να συνεισφέρει ενεργά, στο βαθμό του εφικτού, σε μια τέτοια διαδικασία.

Βιβλιογραφία

- Ανδριανοπουλος, Ν. (2003). Τα Κριτήρια Αστοχίας των Υλικών -Μια Περιήγηση στην Ιστορία, 1–12.
- Αντωνιάδης, Α. (2010). Μάθημα 5ο: Ποιες είναι οι Ιδιότητες των Υλικών;; *Dept. of Production Eng. & Management, Micromachining & Manufacturing Modeling Lab.*
- Αποστόλου, Ν. (2017). Συγκέντρωση Τάσεων σε Μηχανολογικές Κατασκευές. Πάτρα: (Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.).
- Γαλιατσάτος, Ν., Λιναρδάτος, Γ., & Λιναρδάτος, Δ. (2016). Αντοχή των υλικών (Β' Έκδοση). Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενιδου.
- Γιαννάτσης, Ι. (2013). Ειδικά Κεφάλαια Σύγχρονων Τεχνολογιών Παραγωγής, Ενότητα 2: Βασικές Κατασκευαστικές Τεχνολογίες. *Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Πειραιώς*, 1–2. Retrieved from http://www.tex.unipi.gr/undergraduate/notes/eid_kef_syg_tech/AMT_2_12-13.pdf
- Γριμπά, Β. (2010). Μελέτη εξέλιξης του σχεδιασμού αεροπλάνων: Υλικά και μεθοδολογίες σχεδιασμού. (Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Σχεδιασης Προϊόντων και Συστημάτων Πανεπιστήμιο Αιγαίου). Retrieved from <http://www.syros.aegean.gr/de/dpsd01009.pdf>
- Δάρας, Ν. Ι. (2014). Systems Engineering (Οργάνωση και Σχεδιασμός Συστημάτων), 2η Διάλεξη Μαθήματος “Θεωρία Συστημάτων.”
- Δεσσαλέρμος, Σ. (2015). Διαχείριση αξιοπιστίας και συστήματα δεδομένων. Διάλεξη Μαθήματος “Αξιοπιστία Συστημάτων”, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα “Σχεδίαση Και Επεξεργασία Συστημάτων, ΣΣΕ & Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Διαμαντάκος, Ι. (2009). Πρόβλεψη δημιουργίας, διάδοσης και συνένωσης ρωγμών σε αεροπορικά δομικά στοιχεία με πολλαπλή βλάβη. *Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Τεχνολογίας Και Αντοχής Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Και Αεροναπληγών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών.*
- Καλογέρης, Μ. (2016). Ανίχνευση Ατελειών σε Σύνθετα Υλικά μέσω Μη Καταστροφικού Ελέγχου. *Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής Και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.*
- Καναβάκης, Β. (2014). Μελέτη της κόπωσης και ανοχής στη βλάβη. Αστοχίες σε αεροπορικά μηχανολογικά στοιχεία. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανών, Τομέας Τεχνολογίας Των Κατεργασιών*, (2111676).
- Κολοβός, Κ. (2012). Σύγχρονα Υλικά Ι (Σημειώσεις). “Αθηρά” Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων.
- Κούη, Μ., Χειλάκου, Ε., Θεοδωρακάς, Π., Δρίτσα, Β., & Αβδελιδής, Ν. (2015). Μη Καταστρεπτικές Και Φασματοσκοπικές Μέθοδοι Εξέτασης των Υλικών, Θεωρία, Τεχνικές και Εφαρμογές. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πετρόπουλος, Π. (1997). Μεταλλουργία.pdf. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενιδου. Retrieved from http://www.eugenfound.edu.gr/appdata/documents/books_pdf/e_h00065.pdf
- Προκοπάκης, Γ. (2017). Μελέτη αντοχής σε θλίψη σύνθετου πολυμερούς (επόξυ – ρητίνης ενισχυμένης με υαλοϋφασμα). *A study of compression strength of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο.*
- Σοφιανόπουλος, Δ. (n.d.). Διάλεξη “Μεταλλικές Κατασκευές Ι.” *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.*
- Σταμούλης 1, Κ. (2017). Lect1_Combat Systems Eng with narration Iq. Αθήνα: Διάλεξη 1η μαθήματος “Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων Μαχής II: Εισαγωγή στα Οπτικά Συστήματα.

- Σταμούλης 2, Κ. (2017). Lect2_Computer Aided Des Eng Man Part A with narration. *Διάλεξη 2Α, μαθήματος "Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων Μαχής II: Εισαγωγή στα Οπλικά Συστήματα*.
- Σταμούλης 3, Κ. (2017). Lect2_Computer Aided Des Eng Man Part B with narration. *Διάλεξη 2Β μαθήματος "Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων Μαχής II: Εισαγωγή στα Οπλικά Συστήματα*.
- Σταμούλης 4, Κ. (n.d.). Σημειώσεις Τεχνολογίας Υλικών για Αεροναυπηγικές Εφαρμογές. *Κρατικό Εργοστάσιο Αεροσκαφών*, 1–16.
- Φιλόπουλος, Σ. (2005). Κριτήρια αστοχίας. *Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ναυπηγικής, Τ.Ε.Ι. Αθηνών*. Retrieved from <https://eclass.teiath.gr/modules/document/index.php?course=ET189&download=/5341a3ab8mzj/5341a419spgk.pdf>
- Ψαρράς, Γ. Χ. (2008). Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (Dynamic Mechanical Analysis). *Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών*, 1–6. <https://doi.org/10.1002/9780470423837.ch5>
- Ψυλλάκη, Δ. Π. (2013). Θερμικές κατεργασίες- Ενότητα Β': Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής τους για Μηχανολογικές Εφαρμογές. *Τμήμα Μηχανολογίας, ΣΤΕΦ/ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ*.
- Affonso, L. O. A. (2006). Machinery Failure Analysis Handbook, Sustain Your Operations and Maximize Uptime. *Gulf Publishing Company, Houston, Texas*. Retrieved from www.knovel.com
- Aliya, D. (n.d.). The Failure Analysis Process: An Overview.
- Beech, I., Bergel, A., Mollica, A., Flemming, H., Scotto, V., & Sand, W. (2000). Simple methods for the investigation of the role of biofilms in corrosion SIMPLE METHODS FOR THE INVESTIGATION OF THE ROLE OF. *Biocorrosion Network*, (September), 0–27.
- Berk, J. (2009). Systems Failure Analysis. *ASM International, The materials Information Society*. Ohio: ASM International, The Materials Information Society. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7316-7.50006-1>
- Bowles, J. B., & Bonnell, R. D. (1995). Failure mode, effects, and criticality analysis (FMECA). *1995 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tutorial Notes, Washington, DC*, (February).
- Clifford, M. (1998). A Practical Guide to Engineering Failure Investigation. *Professional Engineering Publishing Limited, London and Burry St. Edmunds, First edit.*
- Collins, J. A. (1993). Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis Prediction, Prevention", *John Wiley & Sons, Second Edition, New York*.
- Dennies, D. P. (2005). How to Organize and Run a Failure Investigation. Event (London). Ohio: ASM International, The Materials Information Society. Retrieved from www.asminternational.org
- E-class, T. (n.d.). Φυσικές και Μηχανικές Ιδιότητες των Υλικών. *ΑΤΕΙ Λάρισης/Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών/ΓΤΘΕ/Εργαστήριο Τεχνολογίας Δομικών Υλικών*, 1–12. Retrieved from https://eclass.teilar.gr/modules/document/file.php/GT8E116/ΓΕΝΙΚΕΣ_ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ_ΔΟΚΙΜΕΣ_ΣΤΙΣ_ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ_ΤΩΝ_ΥΛΙΚΩΝ/ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ_ΤΩΝ_ΥΛΙΚΩΝ-ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ_ΜΕΡΟΣ.pdf
- Everett, R. A., & Sen, J. K. (n.d.). Structural Integrity and Aging- Related Issues of Helicopters. *Defense Technical Information Center Compilation Part Notice, ADP010436, Part of the Report: Aging EngineS, Avionics, Subsystems and Helicopters*.
- Fielding, J. P. (1999). Introduction to Aircraft Design. *College P.Fielding, Cambridge University Press*, 263. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808906>
- Findlay, S. J., & Harrison, N. D. (2002). Why aircraft fail. *Materials Today*, 5(11), 18–25. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(02\)01138-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(02)01138-0)

- Fink, B. K., Bogetti, T. A., Klinger, J. R., & Gillespie, J. W. (2000). Low Cycle Fatigue of Composite Materials in Army Structural Applications: A Review of Literature and Recommendations for Research. *Army Research Laboratory (ARL- TR -2242)*, (June).
- Forth, S., Le, D., & Turnberg, J. (2005). An Evaluation of the Applicability of Damage Tolerance to Dynamic Systems. *8th Joint NASA/FAA/DOD Aging Aircraft Conference, Palm Springs, California, USA*, (757).
- Goksel, L. (2013). Fatigue and Damage Tolerance Assessment of Aircraft Structure Under Uncertainty (a thesis presented to the Academic Faculty in partial fulfillment of the requirements for the Degree Master's of Science in the School of Mechanical Engineering). *Georgia Institute of Technology*, (August).
- ISTFA. (2009). *ISTFA 2009, Conference Proceedings from the 35th International Symposium for Testing and Failure Analysis*. California, USA: ASM International.
- Jackson, M. (2004). Seeing more of the world. *IEEE Software*, 21(6), 83–85. <https://doi.org/10.1109/MS.2004.51>
- Jackson, M. (2005). Electrical Overstress EOS Electrical Over-Stress. *Cypress Perform*, 1–17. Retrieved from <http://www.cypress.com/file/97816/download>
- Kladis, G. P., Economou, J. T., Tsourdos, A., White, B. A. and Knowles, K. (2009). Fault diagnosis with matrix analysis for electrically actuated unmanned aerial vehicles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 223, no. 5, pp. 543-563.
- Kladis, G. P., Economou, J., Tsourdos, A., and White, B. (2007). A Kalman based approach for fault detection and diagnosis on a model-based actuator device. In *Proceedings of the IEEE 2007 Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007, Arlington, Texas, USA, 9–12, September 2007*, pp. 742–747.
- Kladis, G. P., Economou, J., Tsourdos, A., and White, B. and Knowles, K. (2008). Digraph matrix reliability analysis for fault assessment for a UAV platform application. A fault-tree analysis approach. In *Proceedings of the IEEE 2008 Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, Harbin, China, 3–5 September 2008*.
- Lakshminarayanan, V. (1992). Software Problem Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia. *US GAO Reports, Report No. GAO/IMTEC-92-26*. <https://doi.org/IMTEC-92-26>:
- Lakshminarayanan, V. (1999). What Causes Semiconductor Devices to Fail? *EDN Network*, 1–4.
- Lakshminarayanan, V. (2001). Failure analysis techniques for semiconductors. *RF Design, February*(February), 34–38. Retrieved from <http://images.rfdesign.com/files/4/0201lakshim34.pdf>
- Lazarevic, I., & Petrovic, Z. (2015). Failure Investigation: Analysis Procedure and Some Notable Aircraft and Aeroengine Service Failures, *65*(1), 45–52.
- Lee, W. S., Grosh, D. L., Tillman, F. A., and Lie, C. H. (1985). Fault tree analysis methods and applications – a review. *IEEE Trans. Reliab.*, 34(3), 194–203
- Lourenco. (2010). Damage Tolerance Design for Wing Components. *Instituto Superior Tecnico*.
- Makhlouf, A. S. H., & Aliofkhazraei, M. (2016). Handbook of Materials- Failure Analysis With Case Studies From The Aerospace And Automotive Industries. *Oxford, UK: Elsevier Ltd., Butterworth Heinemann*.
- McEvily, A. (2013). Metal Failures, Mechanisms, Analysis, Prevention (*Second, Vol. 1*). New Jersey: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118671023>
- MIL-STD-1522A. (1984). Standard General Requirements For Safe Design and Operation of Pressurized Missile and Space Systems. *Military Standard (MIL- STD- 1522 USAF)*, Department Of Air Force, Washington , D.C. 20301, 1522(July 1972).

- Multiple. (2011). Corrosion Fatigue and Environmentally Assisted Cracking in Aging Military Vehicles (Vol. 323). *Research and Technology Organization (RTO- AG-AVT-140)*, NATO. <https://doi.org/978-92-837-0125-5>
- Pell, R., Athiniotis, N., & Clark, G. (n.d.). Fracture of composites in military aircraft. *Defence Science & Technology Organization, Victoria Australia*, 305–306.
- Pepi, M. (2008). Sample Preservation - The Key to a Successful Failure Analysis. *Army Research Laboratory (ARL- RP -228)*, (May), 6–8.
- Pusey, H. C. (1996). Technology Showcase: Integrated Monitoring, Diagnostics and Failure Prevention. Proceedings of a Joint Conference, Mobile, Alabama. *Defense Technical Information Center, Compilation Part Notice*.
- Reddick, H. K. (n.d.). Safe- Life and Damage- Tolerant Design Approaches for Helicopter Structures. *US Army Research and Technology Laboratory (AVRADCOM), Ft Eustis, Virginia*.
- Reddy, A. V. (2004). Investigation of aeronautical and engineering component failures. *New York: CRC Press LLC*. <https://doi.org/10.1108/acmm.2005.12852dae.001>
- Richard, D. (2017). Understanding NDT for Aircraft MROs.
- Sachs, N. W. (2014). Understanding the Multiple Roots of Machinery Failures. *Reliability Magazine*, 8(6), 1–5.
- Shishko, R. (1995). *NASA -Systems Engineering Handbook*. Nasa- SP- 610S - PPMI. <https://doi.org/SP-610S>
- Stamoulis, K., Panagiotopoulos, D., Pantazopoulos, G., & Papaegthymiou, S. (2016). Failure analysis of an aluminum extrusion aircraft wing component. *International Journal of Structural Integrity*, 7(6), 748–761. <https://doi.org/10.1108/IJSI-10-2015-0050>
- Sullivan, M., & Chillarege, R. (1991). Software defects and their impact on system availability-a study of field failures in operating systems. *1991 Digest of Papers FaultTolerant Computing The TwentyFirst International Symposium*, 2–9. <https://doi.org/10.1109/FTCS.1991.146625>
- Tam, A. S. B., & Gordon, I. (2009). Clarification of failure terminology by examining a generic failure development process. *International Journal of Engineering Business Management*, 1(1), 33–36. <https://doi.org/10.5772/6782>
- Wanhill, R. J. H., Byrnes, R. T., & Smith, C. L. (2010). Executive summary Stress corrosion cracking in aerospace vehicles. *Defence Science and Technology Organisation, Woodhead Publishing Ltd, Melbourne, Australia*.
- Wilby, A. J., & Neale, D. P. (n.d.). Defects Introduced into metals during fabrication and service. *Materials Science and Engineering, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), British Energy Ltd., Gloucester, UK, III*.
- Yu, V. Y., Kohl, J. G., Crapanzano, R. A., Davies, M. W., Elam, A. G., & Veatch, M. K. (2005). Failure analysis of the M16 rifle bolt. *Engineering Failure Analysis*, 12(5 SPEC. ISS.), 746–754. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.01.004>

Ιστότοποι (βιβλιογραφία)

<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/3%20MHXANIKH%20SYMPERIFORAw.pdf>
http://oximaton.drwx.eu/files/txn_yl_thewria_erwt_apant.pdf
<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/9%20EPILOGH%20YLIKWNw.pdf>
http://www.tex.unipi.gr/undergraduate/notes/ylik_sxed/YLIKA%20&%20SXEDIASMOS_EN_2_3_4.pdf
<http://www.mech.upatras.gr/~papado/CAMD/2.Pres.pdf>
<http://www.borunsteel.com/Inspection-and-Testing.html>
<https://www.harrykrantz.com/products#electromechanical>
<http://www.eddyfi.com/ndt/surface-inspection/some-alternatives-to-liquid-penetrant-testing/>
<http://istqbexamcertification.com/what-is-a-failure-in-software-testing/>
<http://www.softwaretestinghelp.com/types-of-software-errors/>
<http://www.softwaretestingtimes.com/2010/04/types-of-software-errors-and-bugs-most.html>
http://www.christoforidis.gr/gr/galvanic_corrosion.php
<http://www.dviaviation.com/metallurgical-failures.html>
<https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2844/1/4.pdf>
<https://www.thebalance.com/types-of-corrosion-2340005>
<http://www.amteccorrosion.co.uk/corrosionresistantship.html>
http://efcweb.org/efcweb_media/MICbook.pdf
http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/microbiologically_influenced_biological_microbial_corrosion.htm
<http://docplayer.gr/4776370-Syntheta-ylika-haraktirismos-kai-idiotites.html>
<http://docplayer.gr/4776370-Syntheta-ylika-haraktirismos-kai-idiotites.html>

Ιστότοποι (φωτογραφικό υλικό)

<https://www.etscablecomponents.com/2013/08/galvanic-corrosion-protection-prevention-harsh-environments/>
<http://www.amteccorrosion.co.uk/corrosionresistantship.html>
https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_leaching
<http://integratedglobal.com/industries/fossil-power/stress-corrosion-cracking-scc/>
<https://www.slideshare.net/nishantbhanu/corrosion-59800750>
https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/cooling_water_systems/fig24-5.jsp
<https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Uniform-Corrosion/>
<http://www.processindustryforum.com/article/hobbs-valve-provides-solution-galvanic-corrosion-duplex-butterfly-valves-offshore-platforms>
<http://www.metallurgist.com/hurricane-corrosion-accident.html>
http://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_crevice.htm
<http://www.dalic.com.au/railways/>
<https://met-tech.com/aluminized-steel-heater-tubes/>
<http://www.leancrew.com/all-this/2014/01/bridge-failure/>
<https://www.slideshare.net/MuhammadAliSiddiqui6/fracture-mechanics-failure-analysis-lecture-fatigue>
<http://www.nitty-gritty.it/crevice-corrosion/?lang=en>
http://www.afgrow.net/applications/DTDHandbook/sections/page2_2_4.aspx
<http://www.gideonlabs.com/posts/electronic-transformers/>
https://www.google.gr/search?q=military+software&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjL57f52fzWAhUkIpoKHUaRBz0Q_AUICigB&biw=1517&bih=735#imgsrc=zgXOStMqKyT5QM:
<https://www.linkedin.com/pulse/liquid-penetrant-testing-pt-lpt-mehdi-mehdizadeh>
<https://www.linkedin.com/pulse/ndt-ultrasonic-testing-salman-cader>
<https://www.qualitymag.com/articles/92928-ultrasonic-testing-of-metal-bars-and-tubular-products>
<http://www.techcorr.com/phased-array-ultrasonic-testing.php>
<http://www.mechanicalengineeringblog.com/4185-ndt-x-ray-testing-ndt-radiographic-testing-radiography-test-for-casting/>
<http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525/htm>
<http://www.worldoftest.com/portable-hardness-tester-magnetic-type-qualimag-series>

<http://www.affri.com/index.php/hardness-testers/portable/portable-hardness-tester-rockwell-brinell-vickers>
<https://forcetechnology.com/en/energy-industry/nuclear-power/tensile-testing>
<http://www.mark-10.com/instruments/grips/G1095-G1097.html>
<http://www.directindustry.fr/prod/tinius-olsen/product-29300-358303.html>
<http://www.houstonem.com/fractures.html#!prettyPhoto>
<https://www.kullabs.com/classes/subjects/units/lessons/notes/note-detail/9526>
https://www.fose1.plymouth.ac.uk/fatiguefracture/tutorials/FailureAnalysis/Fractography/Fractography_Resource4.htm
https://www.google.gr/search?q=erosion+wear&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi6lPP0yp7XAhWBVxoKHWJGCpUQ_AUICigB&biw=1517&bih=681#imgdii=nklRB6g5T20pGM:&imgsrc=05D1RXRyazI4lM:
http://www.mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks_dvd_only/DAN/buckling/intro/intro.html
http://www.ltas-cm3.ulg.ac.be/FractureMechanics/print.php?p=Lecture6_P4
https://www.researchgate.net/figure/256715372_fig6_Figure-6-SEM-micrograph-of-typical-failure-modes-of-untreated-flax-fabric-reinforced
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399215307131>
<http://www.epoxycraft.com/a-solid-repair-for-fibreglass-delamination/>
http://www.adf-gallery.com.au/gallery/Blackhawk-A25-202/A25_202
<http://xrayinspectionsservice.com/systems/>
https://www.researchgate.net/figure/281436192_fig7_Figure-8-SEM-images-showing-the-existence-of-striation-on-the-surface-of-fatigue-failed-embedded

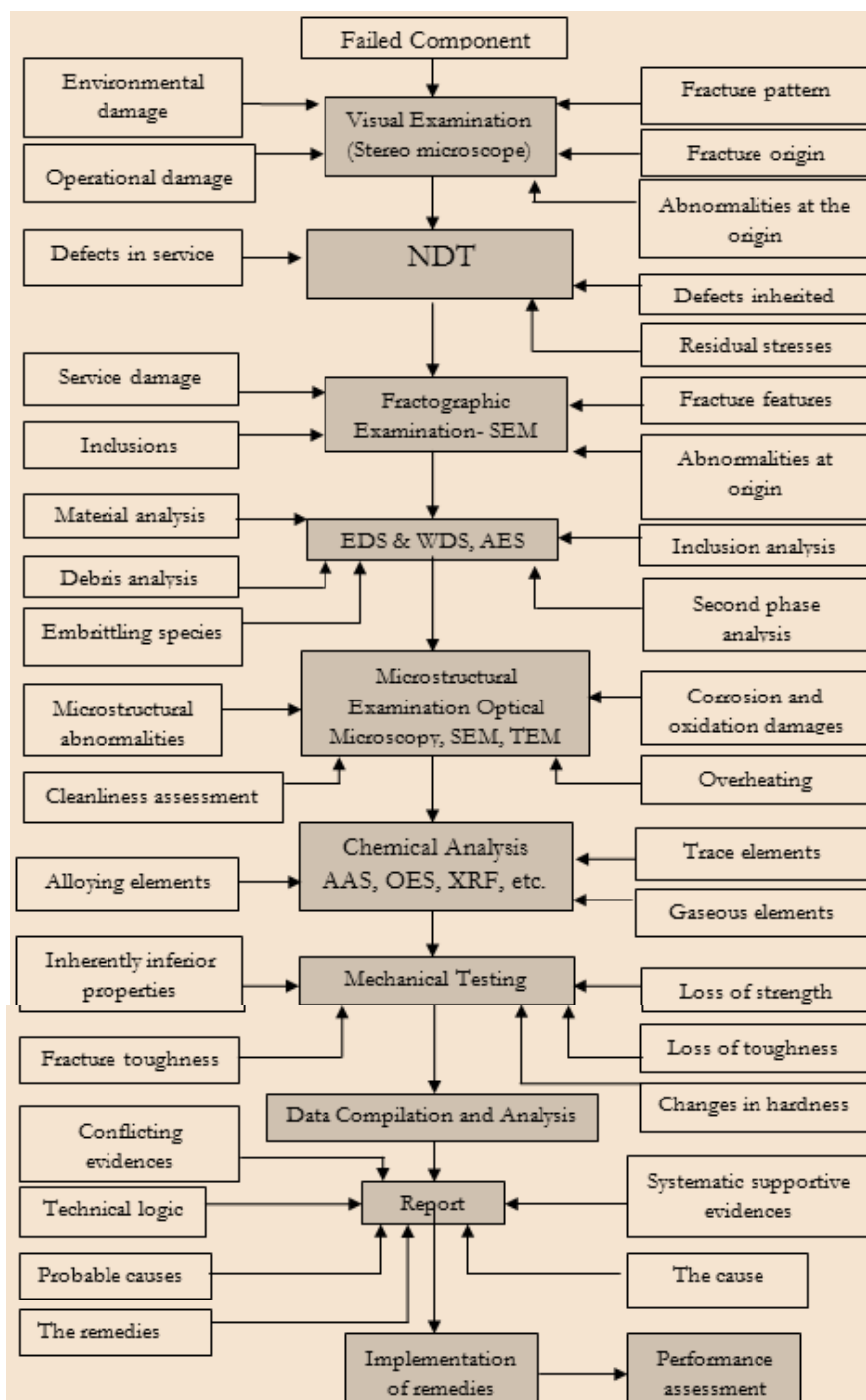
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' (Βασικοί ορισμοί αστοχίας)

Terms	Definition	Reference
Fault	The inability of an entity to perform its required function, resulting in unavailability.	Smith (1993)
Failure	Termination of the ability of an item to perform a required function	ISO 14224 (1999)
	A loss of function or a malfunction of a system/part thereof.	Moubray (1997)
	Inability to perform within specified limits of an intended function.	Hessburg (2001)
	Performance outside the upper and lower specified acceptable levels.	Tweeddale (2003)
	A cessation of function that has consequences (usually meaning death, injury or damage) beyond a component or entity merely becoming unavailable to perform its function.	Smith (1993)
Functional Failure	Inability of any asset to fulfil a function to a standard of performance which is acceptable to the user.	Moubray (1997)
Failure Mechanism	The physical, chemical, electrical, thermal or other process which results in a Failure	MIL-STD-721C 12 June 1981
	The failure mechanism is the physical, chemical or other process or combination of processes that leads to the failure. It is an attribute of the failure event that can be deduced technically, e.g. the apparent, observed cause of the failure.	ISO 14224 (2006)
Failure Mode	Effect by which a failure is observed on the failed item	ISO 14224 (1999)
	A single event that causes a functional failure	Moubray (1997)
Failure Effect	A description of what happens when a failure mode occurs	Moubray (1997)
	Expected influence on the components and subsequent plant behaviour	Grimmelius et al. (1995)
Failure Cause	Circumstances during design, manufacture or use which have led to a failure	ISO 14224 (1999)
Root Cause	Any cause in the cause-effect continuum that is acted upon by a solution such that the failure event does not recur.	Gano (1999)
Terms	Definitions (Equipment context)	
Failure	The termination of the ability of the equipment to perform a required function.	
Failure Event	An occurrence of the termination of the ability of the equipment to perform a required function.	
Failure Warning	Detectable signs of deteriorating conditions and/or adverse actions that provide warning of a potential failure.	
Failure Effect	The immediate outcome that a failure event has on the operation, function or status of the equipment.	
Failure Mechanism	The physical, chemical, electrical, thermal or other process or mechanism that produces failure event.	
Failure Cause	The deteriorated condition of the equipment, or the adverse action that has led to a failure.	
Root Cause	Any cause in the cause-effect continuum that is acted upon by a solution such that the failure event does not recur.	
Failure Consequence	The impact that a failure event has upon the failed equipment's operational context, including business, people, and the environment.	
Failure Development Period	Failure Development Period is the time from first signs of deteriorating health condition being able to be detected to the actual time of a failure event. The length of the time period depends upon many factors such as the durability of the equipment, its duty cycle, the operating environment (load, weather conditions), and so on.	
Health Indicator	A measure that differentiates between normal (expected) and abnormal condition and/or performance. Health Indicators are instruments of strategy chosen to monitor and act upon available warnings of failure.	

(Tam & Gordon, 2009)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'

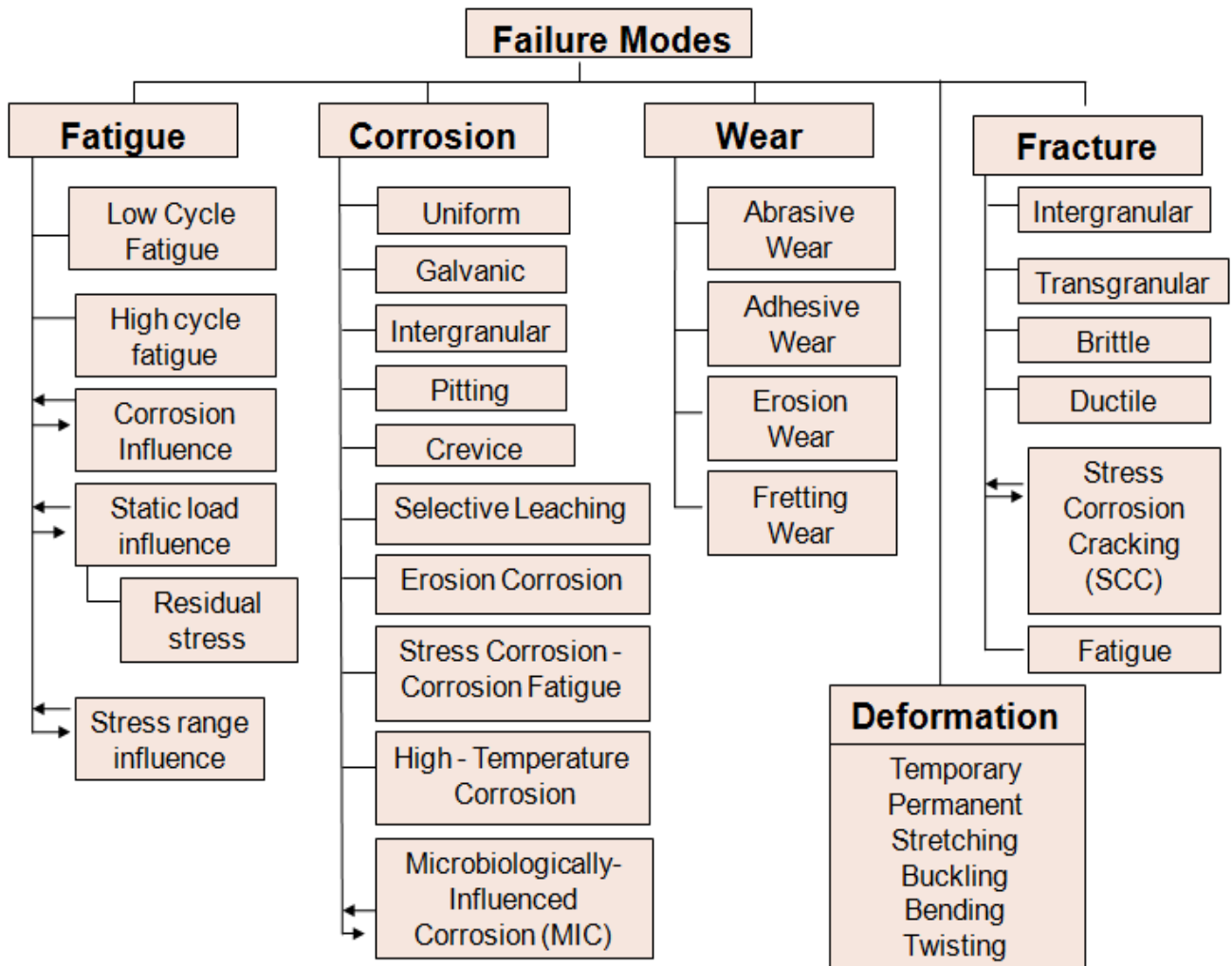
Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάλυσης αστοχίας δομικού στοιχείου.



(Reddy, 2004)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ'

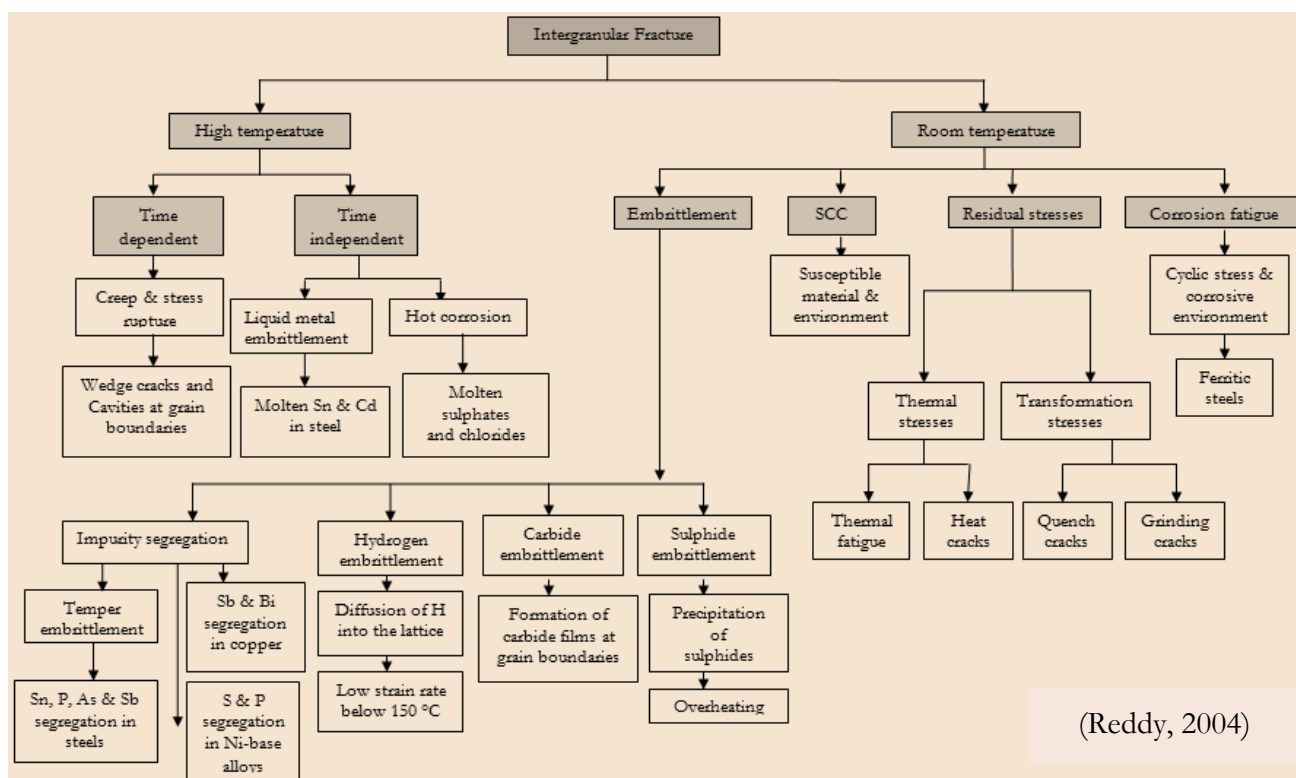
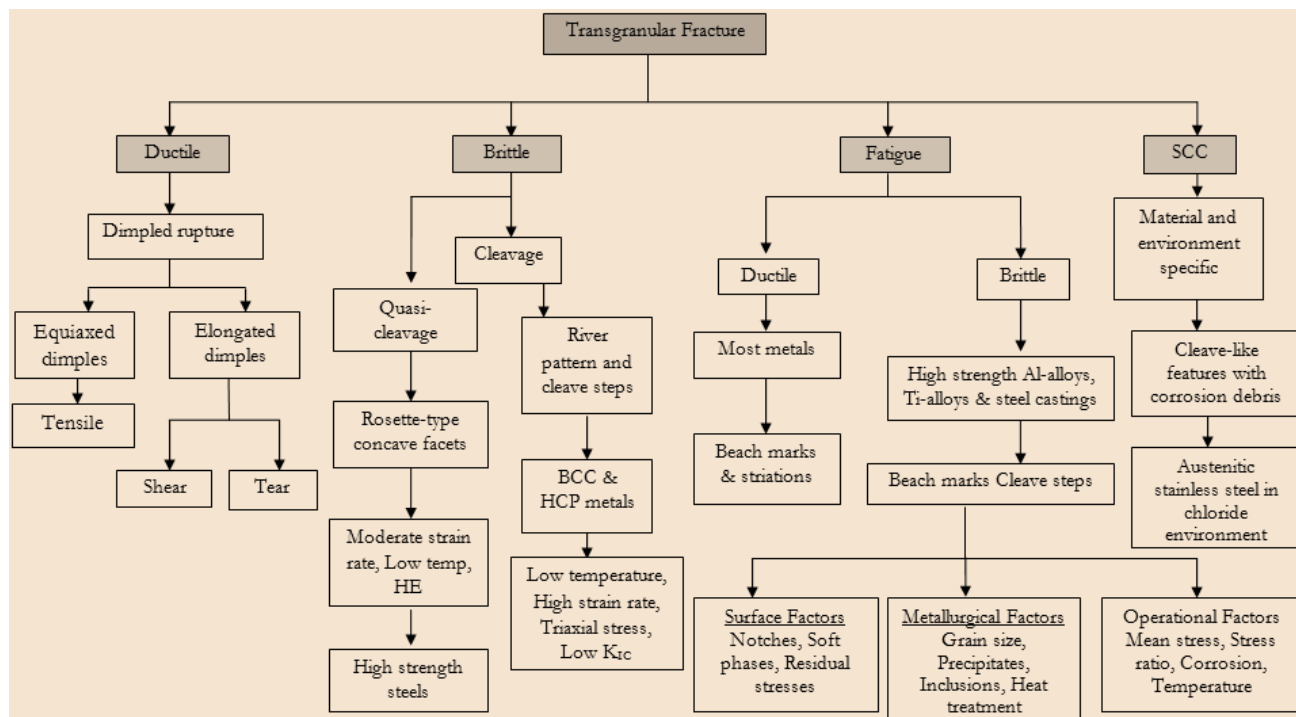
Διάγραμμα βασικών τρόπων αστοχίας (failure modes)¹⁸



¹⁸ <http://www.dviaviation.com/metallurgical-failures.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ'

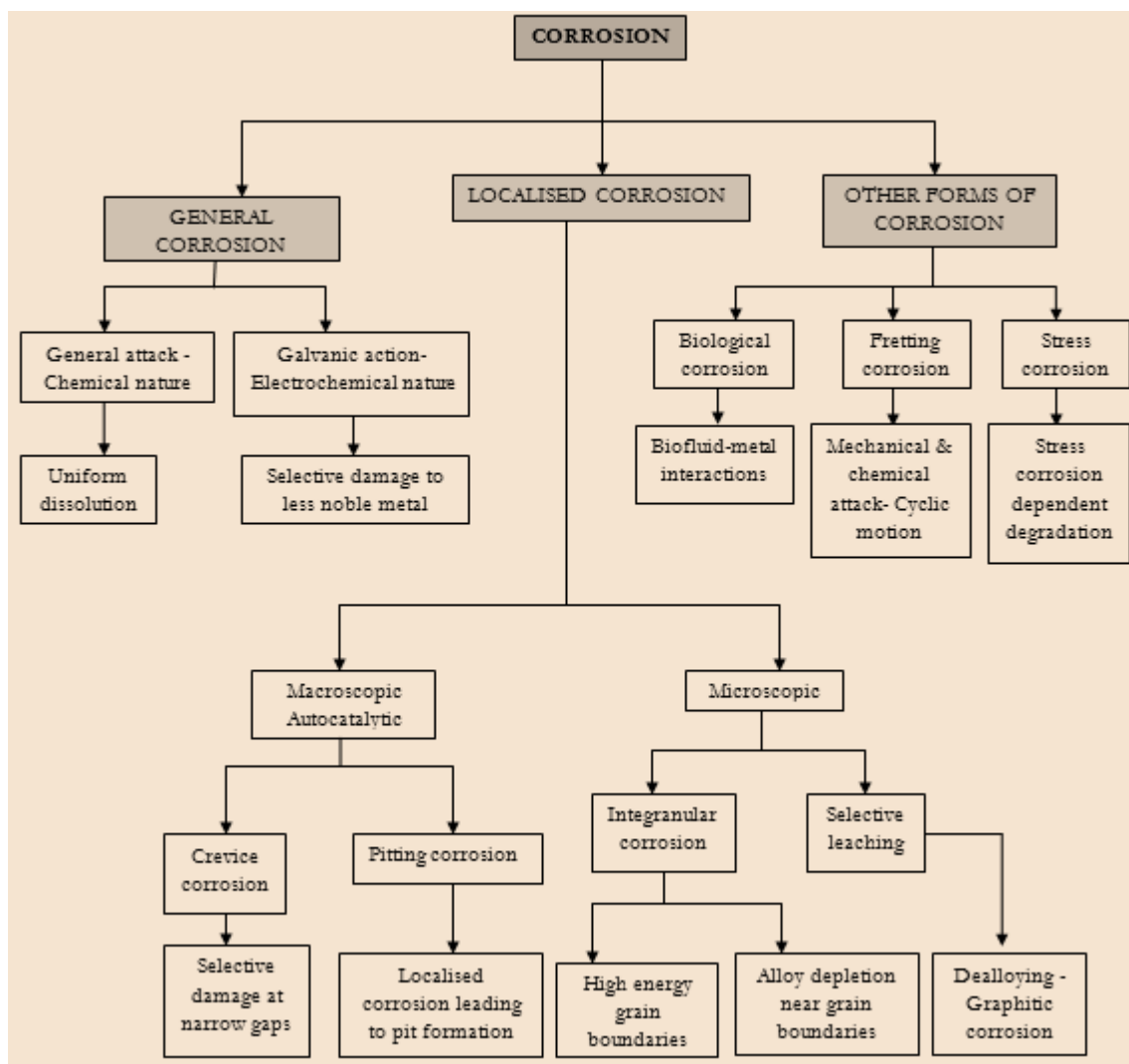
Διαγράμματα ανάλυσης ενδοκρυσταλλικής και περικρυσταλλικής θραύσης



(Reddy, 2004)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε΄

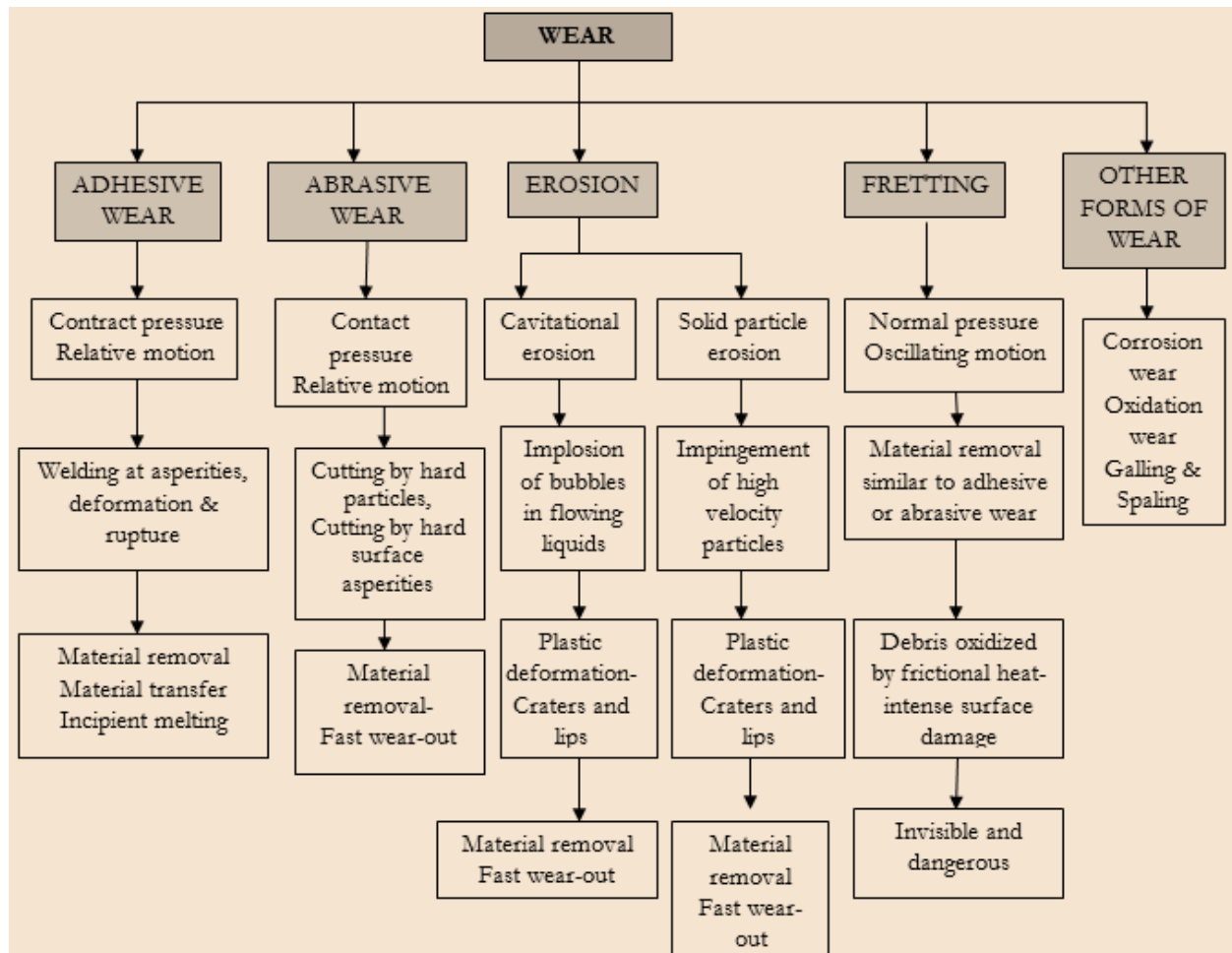
Διάγραμμα ανάλυσης των κατηγοριών διάβρωσης



(Reddy, 2004)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ'

Διαγράμματα ανάλυσης των κατηγοριών φθοράς



(Reddy, 2004)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ'

Πίνακας «Check List» πιθανών αιτιών αστοχιών (failure causes)

<p>Σχεδίαση</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Ακατάλληλη επιλογή υλικού <input type="checkbox"/> Ανεπάρκεια υπαρχόντων υποσυστημάτων <input type="checkbox"/> Ακατάλληλα υποσυστήματα ελέγχου (integrated system checks) <input type="checkbox"/> Ακατάλληλα υποσυστήματα προστασίας - επιδιόρθωσης <input type="checkbox"/> Μη ορθός υπολογισμός των φορτίων <input type="checkbox"/> Μη ορθός υπολογισμός αντοχής συστήματος σε διάφορες συνθήκες και καταστάσεις <input type="checkbox"/> Μη κατάλληλο λογισμικό <p>Υλικό</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Κακή ποιότητα <input type="checkbox"/> Ελαττωματικό υλικό <input type="checkbox"/> Υπαρξη πόρων, εγκλεισμάτων ή μικρορωγμών στο εσωτερικό του υλικού. <p>Διαδικασία κατασκευής</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Ακατάλληλη μηχανική καταργασία <input type="checkbox"/> Ακατάλληλη θερμική καταργασία <input type="checkbox"/> Ξένο σώμα παρέμεινε εντός υλικού <p>Διαδικασία συναρμολόγησης – εγκατάστασης</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Μη ορθό ταιριασμα επιμέρους τμημάτων <input type="checkbox"/> Παράλειψη τμημάτων <input type="checkbox"/> Μη επιτυχής συνένωση (συγκόλληση, δέσιμο, σύσφιξη, ένωση) <input type="checkbox"/> Μη επιτυχής εγκατάσταση λογισμικού <p>Συνθήκες λειτουργίας- εξωτερικοί παράγοντες</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Θερμοκρασία εσωτερική και εξωτερική (περιβάλλοντος) <input type="checkbox"/> Υγρασία- βροχή <input type="checkbox"/> Άνεμος, <input type="checkbox"/> Άμμος, νέφος <input type="checkbox"/> Παρουσία αλατιού <input type="checkbox"/> Χημικές ουσίες <input type="checkbox"/> Ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον <input type="checkbox"/> Τάση ισχύος λειτουργίας - βραχυκύκλωμα <input type="checkbox"/> Μόλυνση από ξένα σώματα 	<p>Συνθήκες αποθήκευσης- μεταφοράς</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Επαρκής λίπανση μεταλλικών επιφανειών <input type="checkbox"/> Κατάλληλοι οδοί αποστράγγισης υγρών (νερού, ελαίου) <input type="checkbox"/> Κθάαρση τμημάτων συστήματος <input type="checkbox"/> Χρήση προστατευτικών υλικών <input type="checkbox"/> Διαδικασία φόρτωσης και μεταφοράς <p>Τρόπος χρήσης του συστήματος</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Μη ορθή εκκίνηση λειτουργίας συστήματος <input type="checkbox"/> Μη ορθή παύση λειτουργίας συστήματος <input type="checkbox"/> Υποσυστήματα ελέγχου σφαλμάτων εκτός λειτουργίας <input type="checkbox"/> Μη ορθή ερμηνεία των ενδείξεων των υποσυστημάτων ελέγχου σφαλμάτων <p>Συντήρηση</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Μη εκτέλεση στον προβλεπόμενο χρόνο <input type="checkbox"/> Χρήση μη προβλεπόμενων διαδικασιών <input type="checkbox"/> Χρήση ακατάλληλων υλικών <input type="checkbox"/> Χρήση ακατάλληλων οργάνων- εργαλείων <input type="checkbox"/> Μη επαρκής ή μη ορθή λίπανση <input type="checkbox"/> Υπαρξη ξένων σωμάτων (βρωμιά, νερό, ρινίσματα κ.α.) στα υγρά πλήρωσης (ελαιολιπαντικά, υδραυλικά, κ.α.) <input type="checkbox"/> Μη ορθή ποσότητα υγρών <input type="checkbox"/> Μη ορθός έλεγχος ηλεκτρολογικών συστημάτων <input type="checkbox"/> Μη ορθός έλεγχος ηλεκτρονικών συστημάτων <input type="checkbox"/> Μη ορθός έλεγχος υδραυλικού συστήματος <p>Παλιά φθορά/ζημιά</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Μη επιτυχής επιδιόρθωση- θεραπεία <p>Ανακατασκευή- αναβάθμιση συστήματος</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Μη κατάλληλη σχεδίαση <input type="checkbox"/> Μη επιτυχής ενσωμάτωση νέας τεχνολογίας.
--	---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η'

Ερωτήματα στα οποία πρέπει να απαντήσει ένας αναλυτής αστοχιών κατά τη διεξαγωγή μια ανάλυσης αστοχίας

1. Έχει καθοριστεί η αλληλουχία των συμβάντων της αστοχίας;
2. Αν η αστοχία περιλαμβάνει ρωγμή ή θραύση, έχει καθοριστεί η περιοχή/σημεία έναρξης αυτής;
3. Οι ρωγμές ξεκίνησαν από την επιφάνεια ή το εσωτερικό του δομικού στοιχείου;
4. Οι ρωγμές σχετίζονται με συγκέντρωση φορτίων;
5. Η ρωγμή είναι μεγάλη; Πόσο; Υπάρχουν μικρορωγμές;
6. Ποιος είναι ο τύπος της φόρτισης: στατική, κυκλική ή διακοπτόμενη;
7. Η επιφάνεια θραύσης είναι σύμφωνη με τον υποτιθέμενο τύπο φόρτισης;
8. Ποιος είναι ο μηχανισμός αστοχίας;
9. Ποια ήταν περίπου η θερμοκρασία λειτουργίας του δομικού στοιχείου τη στιγμή της αστοχίας; Υψηλή ή χαμηλή θερμοκρασία συνέβαλε στην αστοχία;
10. Υπήρχαν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας;
11. Υπάρχουν σημάδια φθοράς του δομικού στοιχείου;
12. Υπάρχουν σημάδια διάβρωσης του δομικού στοιχείου; Αν ναι, τι είδους διάβρωση;
13. Το δομικό στοιχείο είναι κατασκευασμένο από κατάλληλο υλικό; Ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές; Απαιτείται επιλογή καλύτερου υλικού;
14. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού είναι σύμφωνες με τις προδιαγραφές σχεδίασης;
15. Το υλικό του δομικού στοιχείου ήταν κατάλληλα καταργασμένο;
16. Υπάρχουν κατασκευαστικές ατέλειες στο δομικό στοιχείο;
17. Το δομικό στοιχείο ήταν κατάλληλα συναρμολογημένο ή εγκατεστημένο;
18. Το δομικό στοιχείο έχει επισκευαστεί παλιότερα; Αν ναι, η επισκευή ήταν σύμφωνα με τις προδιαγραφές;
19. Το δομικό στοιχείο τέθηκε σε λειτουργία με τον προβλεπόμενο τρόπο;
20. Το δομικό στοιχείο ήταν συντηρημένο και είχε λιπανθεί σύμφωνα με το τεχνικό του εγχειρίδιο;
21. Η αστοχία σχετίζεται με κακομεταχείριση ή λανθασμένη χρήση του στοιχείου;
22. Είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν βελτιώσεις στο σχέδιο του υλικού προκειμένου να αποφευχθούν παρόμοιες μελλοντικές αστοχίες;
23. Η αστοχία ήταν κύρια ή προκλήθηκε από την αστοχία άλλου δομικού στοιχείου;
24. Είναι πιθανό να συμβεί αστοχία σε άλλα σχετικά δομικά στοιχεία που βρίσκονται σε λειτουργία; Ποια μέτρα μπορούν να ληφθούν προκειμένου να περιοριστεί η αστοχία ή να μην αστοχήσουν άλλα δομικά στοιχεία;

(Dennies, 2005)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ'

Πίνακας με βασικά χαρακτηριστικά των NDT

Μέθοδος	Αρχή Λειτουργίας	Τυπικές Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Οπτικός έλεγχος	Επιφανειακή εξέταση διά γυμνού οφθαλμού ή άλλων οπτικών μέσων όπως κάμερες και μεγεθυντικοί φακοί	Εφαρμογή σε περιπτώσεις που τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας μπορούν να οδηγήσουν στη λήψη συμπερασμάτων για την κατάσταση ή/και λειτουργία του υπό εξέταση αντικειμένου.	<ul style="list-style-type: none"> - Τεχνική χαμηλού κόστους, - δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, - άμεση διάγνωση αποτελεσμάτων. 	<ul style="list-style-type: none"> - Περιορίζεται στην επιφανειακή επιθεώρηση, - χρονοβόρα διαδικασία, - περιορισμένη ακρίβεια, - συχνά απαιτείται πηγή φωτισμού. - απαραίτητη η πρόσβαση στην υπό εξέταση επιφάνεια.
Διεισδυτικά υγρά	Υγρά με φθορίζοντα χρώματα εφαρμόζονται σε επιφάνειες. Η παρουσία μιας ατέλειας επιφανειακής θραύσης επιτρέπει τη διεיסδυση του υγρού στο εσωτερικό της, καθιστώντας ικανό τον εντοπισμό της.	Στερεά και μη πορώδη υλικά όπως μέταλλα, γυαλί, πλαστικά, κεραμικά.	<ul style="list-style-type: none"> - Τεχνική χαμηλού κόστους, - δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, - ικανότητα εξέτασης επιφανειών μη επίπεδης και σύνθετης γεωμετρίας, - εύκολη και γρήγορη διάγνωση αποτελεσμάτων. 	<ul style="list-style-type: none"> - Εντοπισμός ασυνεχειών που ξεκινούν από την επιφάνεια, - απαιτεί καθαρισμό της υπό εξέτασης επιφάνειας πριν και μετά την εφαρμογή της, - μη ικανοποιητικά αποτελέσματα σε τραχιές ή/και επικαλυμμένες με χρώμα επιφάνειες.
Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια	Μαγνητισμός του υπό εξέταση στόχου μέσω ηλεκτρομαγνήτη και μετέπειτα εφαρμογή μαγνητικών σωματιδίων στην επιφάνεια. Ασυνέχειες εμποδίζουν τη ροή των δυναμικών γραμμών, φαινόμενο το οποίο ανιχνεύεται από τη συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων στα όρια της ατέλειας.	Εφαρμογή σε σιδηρομαγνητικά υλικά	<ul style="list-style-type: none"> - Χαμηλό κόστος εφαρμογής, - δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, - εύκολη διάγνωση αποτελεσμάτων, - γρήγορος έλεγχος μεγάλων επιφανειών. 	<ul style="list-style-type: none"> - Μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, - δυνατότητα εντοπισμού επιφανειακών ατελειών, - δεν εντοπίζονται μικρές ρωγμές παράλληλες στη μαγνητική ροή, - απαιτείται απομαγνητισμός του υπό εξέταση υλικού μετά το τέλος της επιθεώρησης.

(Κούη end all, 2015)

Ραδιογραφικός Έλεγχος	Βασίζεται στη διαφορά πάχους διαδρομής των ακτίνων X ή γ λόγω διαφοράς πυκνότητας ή μεταβολής πάχους. Η διαφορετική απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα την απεικόνιση με διαφορετικό τρόπο στο μέσο αποτύπωσης.	Εφαρμογή σε όλα τα υλικά μεταλλικά και μη μεταλλικά ανεξαρτήτως σχήματος ή δομής	<ul style="list-style-type: none"> - Υψηλή ευαισθησία στον εντοπισμό εσωτερικών ατελειών, - δυνατότητα ανάκτησης διαστάσεων ή τρισδιάστατων απεικονίσεων, - γρήγορος έλεγχος μεγάλων επιφανειών με σύνθετη γεωμετρία και/ή πολλαπλών διαστρωματώσεων. 	<ul style="list-style-type: none"> - Η ευαισθησία εφαρμογής μειώνεται με το πάχος και την πυκνότητα του υλικού, - σχετικά ακριβός εξοπλισμός, - εκπομπή επικίνδυνης ακτινοβολίας για τον άνθρωπο, - ο εντοπισμός μιας εσωτερικής ατέλειας εξαρτάται από τον προσανατολισμό της.
Έλεγχος με Υπερήχους	Ηχητικά κύματα υψηλών συχνοτήτων μεταδίδονται από έναν πομπό προς το εσωτερικό του υλικού. Μέρος της μηχανικής ενέργειας ανακλάται στην περιοχή ύπαρξης μιας ατέλειας ή στην διεπιφάνεια δύο μέσων.	Υλικά στα οποία η διάδοση ηχητικών δονήσεων είναι δυνατή και η επιφάνεια δεν έχει αρκετά σύνθετη γεωμετρία.	<ul style="list-style-type: none"> - Εύκολη ερμηνεία αποτελεσμάτων, - μεγάλο βάθος ανίχνευσης, - υψηλή ευαισθησία στον εντοπισμό εσωτερικών ατελειών, - δυνατότητα ανάκτησης ποσοτικών πληροφοριών. 	<ul style="list-style-type: none"> - Συνήθως απαιτείται επαφή του πομπού υπερήχων με την υπό εξέταση επιφάνεια, - σχετικά αργή τεχνική στην εξέταση μεγάλων επιφανειών, - δύσκολος έλεγχος επιφανειών σύνθετης γεωμετρίας.
Έλεγχος με Δινορρέυματα	Τα δινορρέυματα παράγονται σε ηλεκτρικά αγωγίμα μεταλλικά υλικά μέσω εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Οι ασυνέχειες του υλικού διαταράσσουν τη ροή των δινορρευμάτων και έτσι επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τους.	Εφαρμογή σε αγωγίμα υλικά για τον εντοπισμό επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών σε μικρό βάθος	<ul style="list-style-type: none"> - Εντοπισμός ατελειών σε πραγματικό χρόνο, - δεν απαιτείται επαφή με την υπό εξέταση επιφάνεια. 	<ul style="list-style-type: none"> - Εφαρμογή μόνο σε αγωγίμα υλικά, - μικρό βάθος ανίχνευσης, - περιορισμένη εφαρμογή σε επιφάνειες σύνθετης γεωμετρίας.
Θερμογραφικός Έλεγχος	Καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος και εντοπισμός επιφανειακών θερμοκρασιακών διαφορών που υποδηλώνουν την ύπαρξη υποεπιφανειακών ανομοιογενειών.	Όλα τα υλικά στα οποία η ύπαρξη επιφανειακών θερμοκρασιακών διαφορών σχετίζεται με δυσλειτουργία ή διαφοροποιήσεις στη δομή του υπό εξέταση στόχου.	<ul style="list-style-type: none"> - Εντοπισμός ατελειών σε πραγματικό χρόνο, - γρήγορη εξέταση μεγάλων επιφανειών, - δεν απαιτείται επαφή με την υπό εξέταση επιφάνεια. 	<ul style="list-style-type: none"> - Εξάρτηση από τον συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, - ο εντοπισμός εξαρτάται από το μέγεθος της φθοράς, - μη αποτελεσματικός για εντοπισμό φθορών σε μεγάλα βάθη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι'

Πίνακας με προτεινόμενες μεθόδους ανάλυσης ανάλογα τον τρόπο αστοχίας

Suspected component failure cause	Suggested analysis method
Nonconforming dimensions	Dimensional inspection
Missing component	Visual examination, x-ray or n-ray (if device cannot be disassembled and depending on materials)
Incorrect material	Visual examination, along with energy-dispersive analysis of x-rays (EDAX), spectrometry, chromatography (depending on material type)
Incorrect assembly	Visual examination, x-ray or n-ray (if device cannot be disassembled and depending on materials)
Internal component presence and fit	Visual examination, x-ray or n-ray (if device cannot be disassembled and depending on materials)
Contamination	Visual examination, magnification, optical microscopy, scanning electron microscopy, along with EDAX, spectrometry, chromatography (depending on material type)
Interference	Dimensional inspection, tolerance analysis, visual examination, microscopic examination
Wear	Dimensional inspection, tolerance analysis, visual examination, microscopic examination, chemical and visual analysis of lubricant
Excessive clearance	Dimensional inspection, tolerance analysis, visual examination, microscopic examination
Deformation	Tolerance analysis, visual examination, dimensional inspection, stress analysis, strength testing
Porosity	Visual examination, microscopic examination, x-ray
Leaking	X-ray inspection for porosity, dimensional inspection, tolerance analysis for adequate seal/gasket squeeze, visual and microscopic examination for presence of contaminants or cuts on seals, materials analysis to confirm correct seal/gasket material, dye penetrant inspection, fluorescent dye pressure testing, magnafluxing, helium sniffer leak testing
Electrical/electronic component fails open/short	Visual examination, multimeter testing, replacement with known good component
Electrical connection fails open/short	Visual examination, multimeter testing, replacement with known good component
Electronic subassembly performs outside specified range	Visual examination, multimeter testing, subassembly testing, replacement with known good component
Electrical disconnect	Visual examination, magnification, optical microscopy
Fractures	Visual and microscopic examination, dye penetrant inspection, fluorescent dye pressure testing, x-ray
Mechanical disconnect	Visual examination, dimensional inspection, surface fractography, stress analysis, strength of materials testing

-συνέχεια-

-συνέχεια-

Suspected component failure cause	Suggested analysis method
Metallic component compressive, tensile, brittle, fatigue failure	Surface fractography, microscopic examination, hardness testing, materials analysis, stress analysis, dimensional inspection
Plastic or composite component compressive, tensile, brittle, fatigue failure	Surface fractography, microscopic examination, materials analysis, contaminant presence, stress analysis, dimensional inspection, storage history review
Ceramic component compressive, tensile, brittle, fatigue failure	Surface fractography, microscopic examination, hardness testing, materials analysis, stress analysis, dimensional inspection
Adhesive, epoxy, or composite disbond or delamination	Microscopic examination, Fourier transform infrared analysis to check for silicone or other contaminants, process review

(Berk, 2009)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΑ'

Χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών

Στο παρόν Παράρτημα γίνεται μια σύντομη αναφορά των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που εμφανίζουν τα υλικά (E-class, n.d.), (Σοφιανόπουλος, n.d.), (Αντωνιάδης, 2010), (Κολοβός, 2012).

Οι ιδιότητες των υλικών αποτελούν ένα από τα βασικά κριτήρια για τη σύγκριση των διαφόρων υλικών μεταξύ τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητά τους για την κατασκευή συγκεκριμένου συστήματος. Είναι δηλαδή, φυσικά μεγέθη που περιγράφουν τη συμπεριφορά του υλικού σε εξωτερικές επιδράσεις.

Οι ιδιότητες των δομικών υλικών διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Φυσικές
- Μηχανικές
- Χημικές
- Τεχνικές ή τεχνολογικές

Οι **φυσικές ιδιότητες** περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά των υλικών που περιγράφουν τη συμπεριφορά του υλικού στις εξωτερικές επιδράσεις, που κατά κανόνα δεν αλλοιώνουν τη χημική τους σύσταση και είναι οι εξής:

- Πυκνότητα και πορώδες
- Απορροφητικότητα, διαπερατότητα, υγροσκοπικότητα
- Θερμική διαστολή και συστολή

- Σημείο τήξεως
- Θερμική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ικανότητα μαγνητίσεως

Ως **πυκνότητα** ορίζεται ο λόγος της μάζας ενός υλικού προς τον φαινόμενο όγκο που καταλαμβάνει, ενώ ως **πορώδες** ορίζεται ο λόγος του όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο του σώματος.

Απορροφητικότητα είναι η ιδιότητα των δομικών υλικών να απορροφούν κάποιο ρευστό χωρίς εξωτερική πίεση. **Διαπερατότητα** είναι η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό στη δίοδο ενός ρευστού από τη μάζα του υπό ορισμένη πίεση. **Υγροσκοπικότητα** είναι η ιδιότητα του υλικού να απορροφά υγρασία από την ατμόσφαιρα.

Θερμική διαστολή και συστολή είναι η μεταβολή των διαστάσεων των δομικών υλικών ως αποτέλεσμα της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Σημείο τήξεως είναι η θερμοκρασία στην οποία ένα υλικό μεταβαίνει από τη στερεά κατάσταση στην υγρή, φαινόμενο που ονομάζεται τήξη.

Θερμική αγωγιμότητα είναι η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν τη διέλευση θερμότητας μέσω της μάζας τους και περιγράφεται από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα** εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσα από κάποιο υλικό σώμα και αποτελεί το δυαδικό μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης. Ανάλογα με την τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως αγωγός, μονωτής ή ημιαγωγός. Εξαρτάται γενικά από την ειδική αγωγιμότητα του υλικού και τη γεωμετρία του αντικειμένου.

Ικανότητα μαγνητίσεως είναι η ικανότητα ορισμένων υλικών, όπως ο σίδηρος, να σχηματίζουν μόνιμους μαγνήτες ή να έλκονται από μαγνήτες.

Μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού σώματος είναι εκείνες που προσδιορίζουν αριθμητικά την αντίστασή του στη δράση εξωτερικών δυνάμεων που προσπαθούν να το παραμορφώσουν, δηλαδή να αλλάξουν το σχήμα και τις διαστάσεις του. Αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων αυτών είναι η ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων στα υλικά που ονομάζονται τάσεις.

Τα υλικά παρουσιάζουν τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες:

- Αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση, κάμψη και στρέψη.
- Αντοχή σε κόπωση
- Αντοχή σε ερπυσμό
- Θερμική αντοχή
- Αντοχή σε θραύση (Δυσθραυστότητα)
- Σκληρότητα
- Συνεπτικότητα

Χημικές ιδιότητες ενός υλικού είναι αυτές που περιγράφουν τη συμπεριφορά του σε εξωτερικές επιδράσεις, που τείνουν να αλλοιώσουν τη χημική του σύσταση και συμπεριφορά. Έτσι, χημική αντοχή είναι η ιδιότητα των υλικών να αντέχουν στην επίδραση εξωτερικών χημικών παραγόντων π.χ.

οξέων, αλκαλίων, διαβρωτικών αλάτων και αερίων, οργανικών διαλυτών κ.λπ. και διακρίνουμε την αντοχή σε οξείδωση και διάβρωση. Η χημική διάβρωση μετράται με την ελάττωση του βάρους και του πάχους του υλικού σε ορισμένο χρόνο και ανάλογα με την ανθεκτικότητά τους τα υλικά χωρίζονται σε πρακτικά ανθεκτικά, σχετικά ανθεκτικά, όχι πολύ ανθεκτικά και μη χρησιμοποιούμενα.

Τεχνικές ή τεχνολογικές ιδιότητες είναι αυτές που αναφέρονται στην ικανότητα των υλικών να δέχονται μηχανικές κατεργασίες χωρίς να μεταβάλλονται οι άλλες ιδιότητές τους (φυσικές, μηχανικές, χημικές). Επίσης, έχουν σχέση με τη δυνατότητα χειρισμού των διαφόρων υλικών κατά την εκτέλεση των εργασιών. Οι σπουδαιότερες τεχνολογικές ιδιότητες είναι οι εξής:

- Κατεργασιμότητα
- Ολισμότητα
- Ελατότητα
- Η ικανότητα χύτευσης
- Το συγκολλητό

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΒ'

Βασικό τυπολόγιο της Μηχανικής των Υλικών

Φυσικές Ιδιότητες	Μέγεθος	Μαθηματική σχέση	Παρατηρήσεις
Πυκνότητα (ρ)	Kg/m ³	$\rho = m/V$	m = μάζα V = όγκος
Πορώδες (α)		V_K/V	V_K = όγκος των κενών
Απορροφητικότητα (Υ)		$\Upsilon = (m_o - m_\xi)/m_\xi$	m_o = μάζα μετά την εμβάπτιση του υλικού στο ρευστό m_ξ = ξηρή μάζα του υλικού
Διαπερατότητα		$dq/dt = k [\Delta h \cdot A / L \cdot \mu]$	dq/dt = ρυθμός ροής του ρευστού Δh = πτώση πίεσης A = επιφάνεια δείγματος L = πάχος στοιχείου μ = το ιξώδες του υγρού
Θερμοκρασία τήξης	°C / °K	-	-
Θερμοκρασία βρασμού	°C / °K	-	-

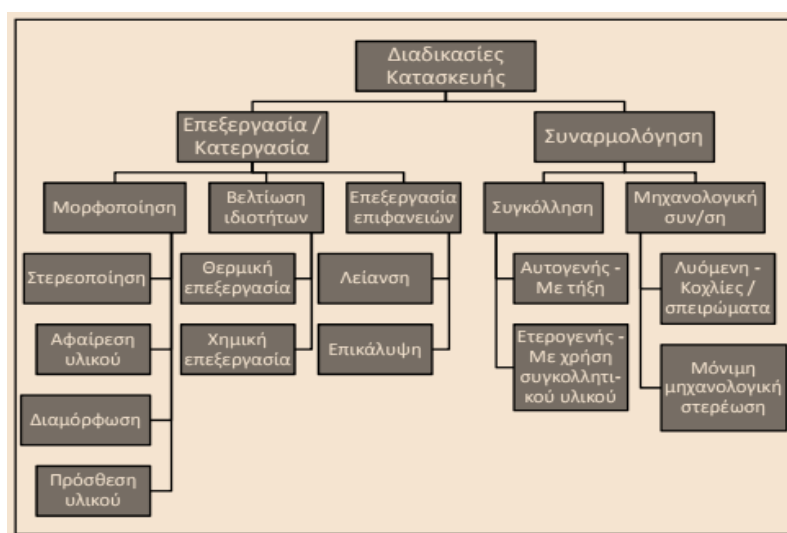
Μηχανικές Ιδιότητες	Μέγεθος	Μαθηματική σχέση	Παρατηρήσεις
Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (σ_T)	MPa	-	-
Όριο διαρροής (σ_S)	MPa	-	-
Όριο αντοχής σε κόπωση (σ_a)	MPa	-	-
Μέτρο ελαστικότητας του Young (E)	GPa	$\sigma = E \cdot \epsilon$ $E = 2G(1+\nu)$	σ = εφελκυστική τάση ϵ = ανηγμένη επιμήκυνση
Μέτρο διάτμησης ή στρέψης (G)	GPa	$\tau = G \cdot \epsilon$	τ = διατμητική τάση ϵ = ανηγμένη επιμήκυνση
Λόγος Poisson (μ) Σταθερά Poisson (m)	-	$\mu = -(\epsilon_g / \epsilon)$ $m = 1/\mu$	ϵ = ανηγμένη επιμήκυνση ϵ_g = εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση

Θερμικές Ιδιότητες	Μέγεθος	Μαθηματική σχέση	Παρατηρήσεις
Συντελεστής θερμικής διαστολής (α)	mm/(mm °C)	$\Delta \ell = \alpha \cdot \ell \cdot \Delta T$	$\Delta \ell$ =μεταβολή της διάστασης ℓ = αρχική διάσταση ΔT = διαφορά θερμοκρασίας
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ)	W/m° C	$Q = \lambda \cdot (\Delta T) \cdot A \cdot t / d$	Q = ποσό θερμότητας A = επιφάνεια d = πάχος επιφάνειας t = χρόνος ΔT = διαφορά θερμοκρασίας
Θερμοχωρητικότητα (C _p)	J/mol*K	$C_p = dQ / dT$	dQ = ποσό θερμότητας που απορροφάται dT = μεταβολή θερμοότητας

Ορθή τάση (σ)	$\sigma = F / A$	F = εσωτερική δύναμη A =επιφάνεια διατομής
Διατμητική τάση (τ)	$\tau = F / A$	F = εσωτερική δύναμη A =επιφάνεια διατομής
Νόμος ελαστικότητας του Hooke	$\Delta l = \frac{F \cdot l}{A \cdot E}$	Δl = επιμήκυνση εφελκυστικής ράβδου F = ασκούμενο φορτίο εφελκυσμού l = μήκος ράβδου, A = διατομή ράβδου E = μέτρο ελαστικότητας του Young
Ανηγμένη επιμήκυνση (ε)	$\epsilon = \Delta l / l$	Δl = επιμήκυνση εφελκυστικής ράβδου l = μήκος ράβδου
Εγκάρσια ανηγμένη παραμόρφωση (ε _g)	$\epsilon_g = \Delta b / b$	Δb = μεταβολή διαστάσεως διατομής b = αρχική διάσταση διατομής

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΓ'

Διάγραμμα βασικών κατηγοριών επεξεργασίας- κατεργασίας – συναρμολόγησης υλικών



(Γιαννάτσας, 2013)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΔ'

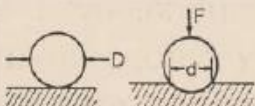

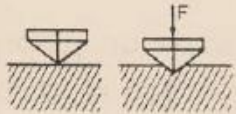

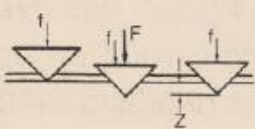
Πίνακας με τιμές χαρακτηριστικών ιδιοτήτων βασικών υλικών

Υλικό	Ιδιότητες αντοχής			Ιδιότητες ελαστικές		
	Όριο Διαρροής	Όριο Θραύσης	Επιμήκυνση θραύσης	Μέτρο Ελαστικότητας	Μέτρο στρέψης	Λόγος Poisson
	(MPa)	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	
Αλουμίνιο [Al]	20	70	60	70	26	0,33
Ορείχαλκος	70 - 550	200 - 620	4 - 60	96 - 110	36 - 41	0,34
Μπρούντζος	82 - 690	200 - 830	5 - 60	96 - 120	36 - 44	0,34
Σκυρόδεμα, μπετόν	-	10 - 70	-	18 - 30	-	0.1 - 0.2
Χαλκός	55 - 330	230 - 380	10 - 50	110 - 120	40 - 47	0.33 - 0.36
Γυαλί	-	30 - 1000	-	48 - 83	19 - 34	0.2 - 0.27
Χυτοσίδηρος	120 - 290	69 - 480	0 - 1	83 - 170	32 - 69	0.2 - 0.3
Μαγνήσιο [Mg]	20 - 70	100 - 170	5 - 15	41	15	0,35
Νικέλιο [Ni]	140 - 620	310 - 760	2 - 50	210	80	0,31
Νάυλον, πολυαμίδη	-	40 - 70	50	2.1 - 2.8	-	0,4
Καουτσούκ	1.0 - 7.0	7.0 - 20	100 - 800	7.0×10^{-4} - 4.0×10^{-3}	2.0×10^{-4} - 1.0×10^{-3}	0.45 - 0.5
Χάλυβας	280 - 1600	340 - 1900	3 - 40	190 - 210	75 - 80	0.27 - 0.3
Τιτάνιο [Ti]	-	500	25	110	40 - 40	0,33
Ξύλο (Έλατο, Δρύς, Πεύκο)	30 - 70	50 - 100	-	10 - 14	-	-

Υλικό	Φυσικές Ιδιότητες			Θερμικές ιδιότητες	
	Πυκνότητα	Θερμοκρασία τήξης	Θερμοκρασία βρασμού	Συντελεστής γραμμικής διαστολής	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητα
	($\times 1000$ kg/m ³)	(°C)	(°C)	($\times 10^{-6}$ /°C)	(W/m·K)
Αλουμίνιο [Al]	2,71	660,3	2519	23	237
Ορείχαλκος	8.4 - 8.75	930	-	19.1 - 21.2	-
Μπρούντζος	7.8 - 8.8	1050	-	18.0 - 21.0	-
Σκυρόδεμα, μπετόν	2.3 - 2.4	-	-	7.00 - 14.0	-
Χαλκός	8,94	1085	2562	16.6 - 17.6	410
Γυαλί	2.4 - 2.8	-	-	5.00 - 11.0	-
Χυτοσίδηρος	7 - 7.4	-	-	9.90 - 12.0	-
Μαγνήσιο [Mg]	1,74	650	1090	25,2	156
Νικέλιο [Ni]	8,89	1455	2913	13	90,7
Νάυλον, πολυαμίδη	1,1	-	-	75.0 - 100	-
Καουτσούκ	0.96 - 1.3	-	-	130 - 200	-
Χάλυβας	7,85	1425	-	10.0 - 18.0	-
Τιτάνιο [Ti]	4,54	1668	3287	-	21,9
Ξύλο (Έλατο, Δρύς, Πεύκο)	0.50 - 0.70	-	-	-	-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΕ'

Τεχνικές Σκληρομέτρησης

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ	ΦΟΡΤΙΟ (F)	ΑΡΧΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ
Brinell	Σφαίρα σκληρού χάλυβα ή καρβιδίου με διάμετρο 10mm	500 ή 3000kg		Διάμετρος αποτυπώματος (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής 136° 	σκληρομέτρηση 5-100kg μικροσκληρομέτρηση 5-1000g		Διαγώνιος αποτυπώματος (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Κώνος διαμαντιού με γωνία κορυφής 120° 	προφόρτιση (f) 10kg φόρτιση (F) 150kg		Βάθος αποτυπώματος (z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Σφαίρα σκληρού χάλυβα με διάμετρο 1,59mm	προφόρτιση (f) 10kg φόρτιση (F) 100kg	Ιδια αρχή με την Rockwell C	Βάθος αποτυπώματος (z)	$HRB = f(Z)$

(Ψυλλάκη, 2013)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΣΤ'

Χρήσιμα εργαλεία που πρέπει να περιέχονται στο βαλιτσάκι ενός αναλυτή αστοχιών (Dennies, 2005)

1	Open and questioning mind	Be prepared. Ask questions. Be ready for the unexpected.
2	Good attitude	You need the people you meet more than they need you.
3	Professional demeanor	If you look like you are organized and knowledgeable, people will consider your presence important and may offer more help.
4	Laptop/notebook computer	Spreadsheets, documents, etc.
5	Digital camera	Take as many pictures as you can of the item, the area, supporting equipment, people, anything and everything. Be careful about color and document your location when taking a photo.
6	Known color chart, white piece of paper, etc.	Kodak gray or color chart, hardware paint charts, red button, your tie; anything that later can be used as a standard to judge picture color
7	Scales or rulers: steel and plastic	Use in photos for scale: gray steel rulers on light backgrounds, white plastic rulers on dark backgrounds. Steel rulers will indicate whether something is magnetic; plastic rulers may work better if the subject is magnetic.
8	Tape measure	Measure long distances.
9	Magnets: flat one and a "wand" with an extension	Identify magnetic and nonmagnetic materials. Use the wand to retrieve items or to collect magnetic debris; immediately separate debris into magnetic and nonmagnetic.
10	Loupe and magnifying glass	Inspect samples. Loupe is higher magnification (10–25×); lower-power magnifying glass can also be helpful.
11	Indelible ink marker (fine)	Mark items, bags, bottles.
12	Flashlight	Look at items in dark areas, etc.; 90° bend attachment allows inspection of holes, and pinlight attachment allows inspection of small crevices.
13	Conductivity tester	Check surface conductivity or nonconductivity.
14	Mirror	Check around corners and under objects.
15	Surface finish comparators	Verify machined, cast, electrical discharge machined surface finish standards.
16	Leatherman tool or pocket knife	Scissors, screwdriver (flat and Phillips), punch, tweezers, blades, plastic toothpick; can't be carried on an airplane. Uses include examination tools, surface finish profilometer, cutting, etc.
17	Pen and pencil	Just because
18	Sheets of blank and lined white paper	Color standard, note paper, drawing paper, collection funnel
19	Plastic bags, 100 × 100 mm (4 × 4 in.)	Sample collection
20	Swabs	Sample collection; always keep one for control sample
21	Alloy reference list	Materials, compositions, specs, data
22	Hardness conversion charts	Martensitic and austenitic charts
23	Addresses and phone numbers	Assistance, info, etc.
24	Technical information	Specification lists, design criteria, drawings, notes, etc.
25	Cellular phone	Immediate access
26	Eyewitness report forms	Better if these are e-mailed or sent ahead to be filled out as soon as possible.
27	Other	Anything else you think you will need