



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και
Συστημάτων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ)
Σχεδίαση Διαδραστικών και Βιομηχανικών
Προϊόντων και Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση και σχεδιασμός μεταλλικών και σύνθετων
επιθεμάτων σε ρηγματωμένα καμπύλα ελάσματα
αλουμινίου. Εφαρμογή σε αεροπορικά δομικά στοιχεία

Πάσχος Θεόδωρος

Επιβλέπων: Παπανίκος Παρασκευάς

Σύρος, Μάιος 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο σχεδιασμός των βασικών δομικών στοιχείων των αεροσκαφών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη νέα φιλοσοφία σχεδιασμού «Με Ανοχή στη Βλάβη» (Damage Tolerance). Ο σχεδιασμός αυτός στηρίζεται στην απαίτηση τα εξαρτήματα να σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε αν παρουσιασθεί κάποια βλάβη να υπάρχουν αρκετά χρονικά περιθώρια για να εντοπισθεί και να επιδιορθωθεί πριν να φθάσει στην αστοχία. Στη νέα σχεδιαστική προσέγγιση λαμβάνονται υπόψη και μελετούνται οι ατέλειες που υπάρχουν στη μάζα του υλικού, επιτρέπονται να υπάρχουν μέχρι ένα βαθμό, και γίνεται μέσω της προγραμματισμένης συντήρησης της κατασκευής, συνεχής παρακολούθηση της εξέλιξής της. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθοδολογίας είναι ότι επιτρέπει την προγραμματισμένη επισκευή ακόμα και βασικών δομικών στοιχείων όταν η βλάβη δεν έχει ξεπεράσει ένα κρίσιμο μέγεθος. Η επισκευή με κολλημένα επιθέματα από μεταλλικά ή σύνθετα υλικά έχει εδραιωθεί ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος επισκευής βλαβών (λόγω ρωγμών ή διάβρωσης) στην άτρακτο των αεροσκαφών, προσφέροντας πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών μεθόδων των μηχανικά συνδεδεμένων ενισχύσεων. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι η βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση, μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση και ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης των τάσεων. Παρόλο που η επισκευή με κολλημένα επιθέματα ξεκίνησε πριν από 35 χρόνια, προς το παρόν τέτοιες επισκευές είναι πιστοποιημένες μόνο για δευτερεύοντα δομικά στοιχεία του αεροσκάφους. Προκειμένου να επεκταθεί η χρήση τους και στα πρωτεύοντα δομικά στοιχεία, χρειάζεται μια ακόμα πιο λεπτομερή γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς τους κάτω από διαφορετικά φορτία. Επί του παρόντος, το έργο αυτό πραγματοποιείται κυρίως με δαπανηρά και χρονοβόρα πειραματικά προγράμματα.

Το πιο αποτελεσματικό εργαλείο για τον βέλτιστο σχεδιασμό του επιθέματος είναι η αριθμητική ανάλυση καθώς μπορεί να μας δώσει πληροφορίες όχι μόνο για τη μείωση του συντελεστή έντασης των τάσεων στα επισκευασμένα ρηγματωμένα δομικά στοιχεία αλλά και την επίδραση του υλικού και των διαστάσεων του επιθέματος στην ανακατανομή των τάσεων στο δομικό στοιχείο. Μεγάλος αριθμός

παραμετρικών αναλύσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικρό χρόνο και να περιορίσει έτσι την ανάγκη δαπανηρών πειραματικών προγραμμάτων.

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων και του υλικού του επιθέματος τόσο σε ρηγματωμένους δίσκους όσο και σε ρηγματωμένα καμπύλα ελάσματα. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για να βρεθούν οι βέλτιστες διαστάσεις των επιθεμάτων με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συντελεστή έντασης των τάσεων. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η επίδραση του υλικού και πάχους του επιθέματος στη διάρκεια ζωής του ρηγματωμένου δομικού στοιχείου.

Δομή της εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται θεμελιώδεις έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων (Συντελεστής Έντασης Τάσεων, Κόπωση κ.α.) που είναι βασικά στοιχεία για τις επισκευές των ρωγμών σε δομικά στοιχεία αεροσκαφών, οι υπάρχουσες μεθοδολογίες σχεδιασμού αυτών και η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των αεροσκαφών. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις επισκευές με κολλημένα επιθέματα κυρίως ως προς την επίδραση των υλικών και των διαστάσεων των επιθεμάτων στην αποτελεσματικότητα της επισκευής. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα βήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των επιθεμάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αντίστοιχα τα αποτελέσματα των αναλύσεων για επίπεδα και καμπύλα ρηγματωμένα δομικά στοιχεία. Τέλος, τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας παρουσιάζονται στο έκτο κεφάλαιο

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	5
1.2	ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ «ΑΝΟΧΗ ΣΤΗ ΒΛΑΒΗ» ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΡΑΥΣΕΩΝ	7
1.2.1	<i>Η έννοια του Συντελεστή έντασης τάσεων (SIF).....</i>	<i>9</i>
1.2.2	<i>Επίδραση ρωγμών στην αντοχή ρηγματωμένων μεταλλικών σωμάτων</i>	<i>11</i>
1.3	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΙΣ ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ («ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΜΕ ΑΣΦΑΛΕΙΑ» ΣΕ ΑΝΤΙΠΑΡΑΘΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ «ΑΝΟΧΗ ΣΤΗ ΒΛΑΒΗ»).....	12
1.4	ΚΟΠΩΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	13
1.4.1	<i>Συμπεριφορά ρωγμής ενός λεπτού δίσκου σε κόπωση σταθερού εύρους τάσεων..</i>	<i>15</i>
1.4.1.1	Χαρακτηριστικά της κόπωσης ρωγμών:	15
1.4.1.2	Πείραμα κόπωσης ρωγμής βάσει κειμένων προδιαγραφών	17
1.5	ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	21
1.5.1	<i>Κόπωση μεταλλικών δομικών στοιχείων αεροσκαφών.....</i>	<i>21</i>
1.5.2	<i>Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των αεροσκαφών.....</i>	<i>24</i>
1.5.2.1	Ποια μεγέθη μπορούν να παρακολουθούνται;.....	27
1.5.2.2	Η παρακολούθηση των βλαβών (ρωγμών)	31
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	35
2.1	ΣΕ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΡΩΓΜΩΝ.....	35
2.1.1	<i>Σύγκριση σύνθετων και μεταλλικών επιθεμάτων</i>	<i>37</i>
2.1.2	<i>Οι εφαρμογές των επισκευών με σύνθετα υλικά.....</i>	<i>38</i>
2.2	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΑΕΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	39
2.3	Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΜΙΑΣ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗΣ ΡΩΓΜΗΣ	42
2.3.1	<i>Η επίδραση του υλικού του μπαλώματος</i>	<i>44</i>
2.3.2	<i>Η επίδραση του μέτρου διάτμησης G_a της κόλλας</i>	<i>46</i>
2.3.3	<i>Η επίδραση του πάχους του στρώματος κόλλας.....</i>	<i>47</i>
2.3.4	<i>Επίδραση του πάχους του μπαλώματος στις παραμέτρους της θραύσης.....</i>	<i>48</i>
2.3.5	<i>Επίδραση της γεωμετρίας του μπαλώματος</i>	<i>49</i>
2.4	ΆΛΛΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	50
3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ & ΤΟΥ ΕΠΙΘΕΜΑΤΟΣ	53
3.1	ΓΕΝΙΚΑ:	53

3.2	ΠΟΡΕΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	54
3.2.1	Τύπος στοιχείων, διακριτοποίηση, ιδιότητες και σταθερές.....	54
3.2.2	Συνοριακές συνθήκες, φορτίσεις και παραμόρφωση μοντέλου.....	57
3.2.3	Υπολογισμός των τιμών του SIF στη ρωγμή.....	59
3.2.4	Έλεγχος της ακρίβειας του μοντέλου.....	61
4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	65
4.1	ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΡΩΓΜΗ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΕΠΙΘΕΜΑ.....	65
4.2	ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΡΩΓΜΗ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΟ ΕΠΙΘΕΜΑ.....	70
4.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....	75
5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΚΑΜΠΥΛΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ.....	80
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
6.1	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	88
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας (ασφάλειας και δομικής αντοχής) των πολιτικών και αεροπορικών κατασκευών είναι πρωτεύον θέμα για την κοινότητα των μηχανικών. Ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων των κατασκευών με βάση τις παραδοσιακές αρχές της αντοχής των υλικών, δηλαδή η μέγιστη τάση να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη, να αποφεύγονται συγκεντρώσεις τάσεων και μεγάλες παραμορφώσεις, να μη δημιουργούνται φαινόμενα λυγισμού, είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία βαριών κατασκευών με μεγάλους συντελεστές ασφάλειας. Παρόλα αυτά υπήρξαν πολλά καταστροφικά δυστυχήματα που κόστισαν ανθρώπινες ζωές. Μερικά από αυτά οφείλονταν σε ανεπαρκή σχεδιασμό.

Το δυστύχημα στο ορυχείο Markham Colliery της Αγγλίας, τον Ιούλιο του 1973 προκλήθηκε από θραύση στο μοχλοβραχίονα του συστήματος πέδησης του ανελκυστήρα, ο οποίος σχεδιάστηκε με κριτήριο τη διαρκή του αντοχή (fail safe design). Η θραύση αυτή του μοχλοβραχίονα, που είχε σαν αποτέλεσμα τον θάνατο 14 ατόμων και άλλων 14 βαριά τραυματισμένων, φανέρωσε ότι ο σχεδιασμός με κριτήριο την ασφάλεια ως προς διαρκή αντοχή (αστοχία) είχε σοβαρά μειονεκτήματα. Αλλά και στο κλάδο των αεροπορικών κατασκευών, υπήρξαν κατά καιρούς μερικά σοβαρά δυστυχήματα που προκλήθηκαν από πτώσεις αεροσκαφών.

Το 1977, στο δυστύχημα της Lusaka, ένα φορτηγό αεροσκάφος της Boeing, στο στάδιο της προσγείωσης του κατέπεσε από ύψος 260 μ. μακριά από τον αεροδιάδρομο προσγείωσης και ανεφλέγη. Κατά τη διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι η αστοχία ξεκίνησε από μια μικρή ρωγμή κόπωσης, που δημιουργήθηκε σε διαμήκη δοκό του οριζόντιου σταθερού σε χείλος οπής καρφιού, από αυτά που συνδέουν το περίβλημα με το σκελετό του αεροσκάφους. Η ρωγμή εξελίχθηκε με το χρόνο και οδήγησε τελικά στην αποκόλληση του δεξιού οριζόντιου σταθερού και στη πτώση του αεροσκάφους. Στη περίπτωση αυτή δηλαδή αποδείχθηκε ότι ο σχεδιασμός του οριζόντιου σταθερού ήταν λανθασμένος.

Ένα άλλο δυστύχημα που αξίζει να αναφερθεί ήταν το δυστύχημα της EI-AI στο Άμστερνταμ, το 1992, που αφορούσε την πτώση φορτηγού αεροσκάφους τύπου

B747. Το αεροσκάφος αυτό αμέσως μετά την απογείωσή του από το αεροδρόμιο του Άμστερνταμ εξέπεμψε σήμα κινδύνου και επέστρεψε για άμεση προσγείωση. Όμως κατά τη διαδικασία επιστροφής απώλεσε τον έλεγχο και προσέκρουσε σε ενδεκαόροφη πολυκατοικία, με συνέπεια να χάσουν τη ζωή τους 46 άτομα. Η διερεύνηση έδειξε ότι ο ένας από τους τέσσερεις κινητήρες, κατά την απογείωση αποσπάσθηκε και προσέκρουσε στο γειτονικό κινητήρα και τον ξερίζωσε, με συνέπεια το αεροσκάφος να χάσει τον έλεγχο. Έγιναν μεταλλογραφικοί και θραυστομηχανικοί έλεγχοι οι οποίοι έδειξαν ότι υπήρχαν ρωγμές λόγω κόπωσης σε ένα από τους τρεις πείρους στήριξης του κινητήρα Νο. 3 που προκάλεσαν θραύση αποχωρισμού από το μεταλλικό ιστό (pylon). Το δυστύχημα αυτό θα αποφεύγονταν αν ο τρόπος στήριξης του κινητήρα διασφάλιζε, ότι σε περίπτωση αποχωρισμού του δεν θα προκαλούσε καταστροφική ζημιά στο αεροσκάφος. Ο σχεδιασμός του μεταλλικού ιστού δηλαδή αποδείχθηκε λανθασμένος [1].

Οι έρευνες στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις αστοχιών έδειξαν ότι το πρόβλημα υπήρχε στο σχεδιασμό των αντίστοιχων κατασκευών που κατέρρευσαν. Η φιλοσοφία σχεδιασμού τους, που ήταν κοινή, απεδείχθη ότι ήταν αδύνατη και ανεπαρκής. Ο σχεδιασμός τους είχε γίνει με κριτήριο την ασφάλεια ως προς διαρκή αντοχή (ή αλλιώς **ασφάλεια ως προς την αστοχία- Fail Safe Design Philosophy**). Η σχεδιαστική αυτή φιλοσοφία είχε αναπτυχθεί με σκοπό να αντιμετωπίσει αξιόπιστα αστοχίες λόγω κόπωσης. Με την φιλοσοφία αυτή τα εξαρτήματα θεωρείται ότι μελετώνται και σχεδιάζονται με τρόπο ώστε ακόμη και αν παρουσιασθεί κάποια βλάβη (αστοχία) σε κάποιο εξάρτημα, αυτή να μην αποβαίνει καταστροφική. Αποδείχθηκε όμως από τα δυστυχήματα ότι αυτός ο σκοπός δεν επετεύχθη και ότι η φιλοσοφία σχεδιασμού αυτή εμπεριείχε αδυναμίες γιατί δεν ελάμβανε υπόψη της τις ατέλειες που υπάρχουν στο υλικό των κατασκευών. Οι ατέλειες αυτές, λόγω κόπωσης από τη χρήση του υλικού, προκαλούν μικρορωγμές μέσα στη μάζα του οι οποίες εξελίσσονται και οδηγούν σε οριστική αστοχία του δομικού στοιχείου. Η σχεδιαστική αυτή φιλοσοφία έπρεπε να συμπληρωθεί και με την παραδοχή της ύπαρξης μικρορωγμών καθώς και με τη μελέτη της αργής διάδοσης των ρωγμών.

1.2 Φιλοσοφία Σχεδιασμού «Ανοχή στη Βλάβη» και Μηχανική Θραύσεων

Με τη συμπλήρωση και μερική αναθεώρηση στοιχείων της παλιάς φιλοσοφίας δημιουργήθηκε νέα φιλοσοφία σχεδιασμού που ονομάστηκε «**Ανοχή στη Βλάβη**» (**Damage Tolerant**) και στηρίζεται στην απαίτηση τα εξαρτήματα να σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε αν παρουσιασθεί κάποια βλάβη να υπάρχουν αρκετά χρονικά περιθώρια για να εντοπισθεί και να επιδιορθωθεί πριν να φθάσει στην αστοχία. Το προϊόν συνοδεύεται με αυστηρά εγχειρίδια συντήρησης. Στη νέα φιλοσοφία λαμβάνονται υπόψη και μελετούνται οι ατέλειες που υπάρχουν στη μάζα του υλικού, επιτρέπονται να υπάρχουν μέχρι ένα βαθμό, και γίνεται μέσω της προγραμματισμένης συντήρησης της κατασκευής, συνεχής παρακολούθηση της εξέλιξής της.

Η αλλαγή που επήλθε στη Φιλοσοφία Σχεδιασμού των δομικών στοιχείων μιας κατασκευής στηρίχθηκε στην ανάπτυξη νέων, μη καταστρεπτικών, μεθόδων ελέγχου των υλικών και στην παράλληλη ανάπτυξη της επιστήμης της «**Μηχανικής των Θραύσεων**» που διαμορφώθηκε σαν ένας νέος κλάδος της Αντοχής των Υλικών ο οποίος μελετά τις ατέλειες του υλικού, τις ρωγμές που εμφανίζονται σε μια κατασκευή λόγω κόπωσης, και την εξέλιξη αυτών. Η Θραυστομηχανική έχει ίδιο αντικείμενο με αυτό της Αντοχής των Υλικών. Και οι δυο Επιστήμες ασχολούνται με τη συμπεριφορά των σωμάτων, δηλαδή με τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων, όταν επιδρούν σ' αυτά εξωτερικά φορτία. Επίσης ασχολούνται με τον προσδιορισμό της ικανότητας των στοιχείων μιας κατασκευής να μεταφέρουν με ασφάλεια τα φορτία λειτουργίας τους, ώστε η κατασκευή αυτή να μην αστοχήσει. Η αστοχία μιας κατασκευής, και στις δύο Επιστήμες, μπορεί να προκληθεί από:

- Πλαστική διαρροή του υλικού
- Λυγισμό
- Θραύση (ψαθυρή ή ελαστοπλαστική)
- Ερπυσμό
- Κόπωση υλικού

Παρόλο όμως το κοινό τους αντικείμενο, η Μηχανική των Θραύσεων θεωρείται διακριτή Επιστήμη, και η βασική διαφορά των δύο επιστημονικών κλάδων έγκειται στο εξής:

- Στη Θραυστομηχανική το σώμα που μελετάται εμπεριέχει κατασκευαστικές ατέλειες (βλάβες, εσωτερικές ατέλειες και ρωγμές)
- Στη Αντοχή Υλικών μελετώνται τα σώματα με την παραδοχή ότι το υλικό τους είναι ιδανικό, δίχως να παρουσιάζει ατέλειες εκ κατασκευής.

Απ' αυτή τη βασική διαφορά των δυο συναφών κλάδων πηγάζει και η διαφορετική πορεία μελέτης των σωμάτων που ακολουθεί η Μηχανική των Θραύσεων. Οι κύριοι στόχοι αυτής της πορείας μελέτης είναι οι εξής:

- Η αναζήτηση των αιτιών δημιουργίας μικρορωγμών
- Η ανάλυση της εξέλιξης των ρωγμών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός μηχανικού συστήματος
- Η διατύπωση θεμελιωδών αρχών που αφορούν τη συμπεριφορά ρωγμών υπό την επίδραση εξωτερικών καταπονήσεων.

Ενώ ο τελικός σκοπός της Θραυστομηχανικής θεωρείται ότι είναι:

- Η κατανόηση των βασικών μηχανισμών θραύσης ενός δομικού στοιχείου
- Ο καθορισμός των κύριων παραμέτρων θραύσης του υλικού ενός δομικού στοιχείου
- Ο καθορισμός κανόνων-κριτηρίων, ώστε ένας μηχανικός να μπορεί να προβλέψει κρίσιμες καταστάσεις που θα οδηγήσουν ένα δομικό στοιχείο σε καταστροφική αστοχία και να μπορεί αυτός να σχεδιάζει δομές ικανές να παραλάβουν με ασφάλεια τα φορτία λειτουργία τους. Στις περιπτώσεις που τα εξωτερικά φορτία μεταβάλλονται με το χρόνο ο κύριος στόχος επικεντρώνεται στο καθορισμό κανόνων και κριτηρίων για τη πρόβλεψη της εξέλιξης των ρωγμών και για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής

Με την ανάπτυξη της πειραματικής και θεωρητικής τεκμηρίωσης της Θραυστομηχανικής έγινε δυνατή η περιγραφή της συμπεριφοράς των ρωγμών που υπάρχουν στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής, σε συνθήκες στατικής καταπόνησης και σε συνθήκες κόπωσης, καθώς και στη διατύπωση απλών κανόνων για την επίλυση πρακτικών εφαρμογών. Στην Αντοχή των Υλικών για την αξιολόγηση της

συμπεριφοράς ενός δομικού στοιχείου υπό εξωτερικές καταπονήσεις προσδιορίζονται οι οριακές τιμές ορισμένων μεγεθών όπως τάση, όριο διαρροής ή όριο θραύσης. Στην Μηχανική των Θραύσεων τέτοια μεγέθη είναι ο συντελεστής έντασης τάσεων K , το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής δ , ή το J - ολοκλήρωμα και οι αντίστοιχες οριακές τους τιμές. Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται και ως κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη μιας ρωγμής και οι αντίστοιχες κρίσιμες τους τιμές K_{cr} , δ_{cr} ή J_{cr} ως αντίσταση θραύσης του υλικού.

Ο **Συντελεστής Έντασης Τάσεων (Stress Intensity Factor - SIF)** είναι μια έννοια της Μηχανικής των Θραύσεων που εισήχθη για να περιγράψει το πεδίο τάσεων στη γύρω περιοχή μιας ρωγμής το οποίο επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά της ρωγμής.

Η μηχανική των θραύσεων συνεισέφερε πολλά στη δυνατότητα δημιουργίας της νέας φιλοσοφίας σχεδιασμού των κατασκευών με «Ανοχή στη Βλάβη». Σήμερα, σύμφωνα με τη μοντέρνα αυτή φιλοσοφία σχεδιασμού, επιτρέπονται μέχρις ενός βαθμού ατέλειες (βλάβες ή ρωγμές) σε μια κατασκευή, αρκεί να γίνεται συνεχής παρακολούθηση της εξέλιξής τους, μέσα από τη συντήρηση της κατασκευής.

1.2.1 Η έννοια του Συντελεστή έντασης τάσεων (SIF)

Ο συντελεστής SIF μπορεί να ληφθεί ως μέτρο ενεργοποίησης των μακρομηχανισμών θραύσης του υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη λύση τεχνολογικών προβλημάτων. Η μαθηματική σχέση που μας δίνει τον SIF είναι της μορφής:

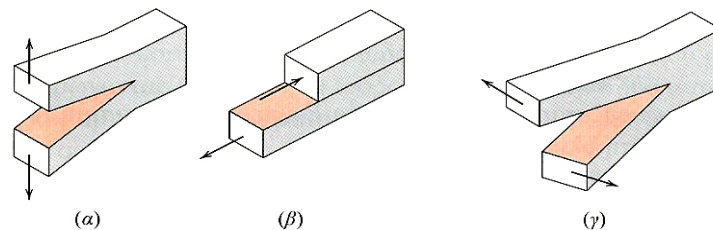
$$K_I = \sigma_0 \times \sqrt{\pi a} \times Y\left(\frac{a}{w}\right) \text{ [MPa}\sqrt{\text{m}} \text{]}$$

Ο συντελεστής αυτός K σχετίζεται άμεσα με την τάση (MPa), το μήκος της ρωγμής ($\sqrt{\text{m}}$) και το είδος της φόρτισης επί του κατασκευαστικού στοιχείου που φέρει τη ρωγμή. Στη παραπάνω εξίσωση είναι:

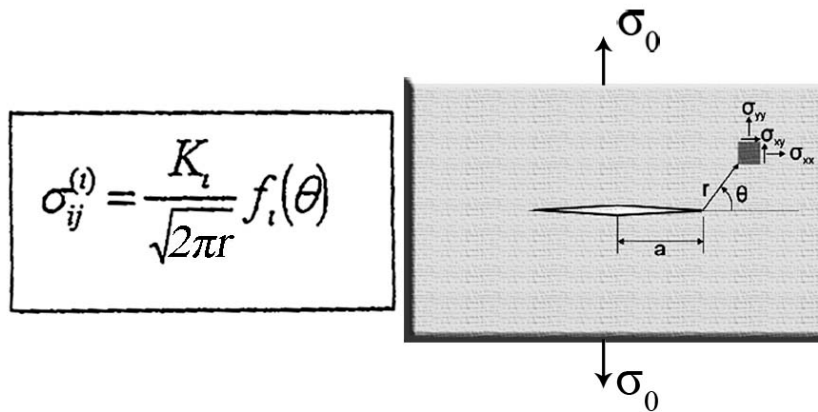
σ_0 η εφαρμοσμένη ονομαστική τάση, a το μήκος της ρωγμής σε mm, και $Y(a/w)$ μια διορθωτική συνάρτηση η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του δομικού στοιχείου w (συνήθως το πλάτος ενός επίπεδου δίσκου με ρωγμή με τον οποίο πειραματιζόμαστε) και το μήκος της ρωγμής a . Οι διορθωτικοί συντελεστές λαμβάνονται από πίνακες για τυπικές περιπτώσεις ρωγμών και γεωμετρίας που χρησιμοποιούνται ευρέως στη πράξη.

Ο Irwin [2] πειραματιζόμενος σε ελαστικά σώματα που φέρουν ρωγμή έδειξε ότι υπάρχουν τρία είδη βασικής καταπόνησης του σώματος οι οποίες οδηγούν σε χαρακτηριστικές παραμορφώσεις της ρωγμής. Κάθε είδος καταπόνησης δημιουργεί στη κορυφή της ρωγμής ένα πεδίο τάσεων (εντατικό πεδίο). Η ένταση του τασικού αυτού πεδίου στη κορυφή της ρωγμής μπορεί να εκφρασθεί με τη παράμετρο K_i , που ονομάστηκε από αυτό το λόγο Συντελεστής Έντασης Τάσεων. Ο δείκτης i στη παραπάνω εξίσωση δείχνει το είδος της καταπόνησης I, II, III. Κατά Irwin οι τρεις βασικές καταπονήσεις που επηρεάζουν τη ρωγμή, που φαίνονται και στο Σχήμα 1-1, είναι:

- Opening mode I: Η ρωγμή ανοίγει εξ' αιτίας του φορτίου ως εξής: Οι επιφάνειες της μετατοπίζονται κάθετα προς την ακμή της ρωγμής (Σχήμα 1-1α)
- Shearing mode II: Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη κάθετα στην ακμή της ρωγμής. Χαρακτηρίζεται ως διάτμηση της ρωγμής (Σχήμα 1-1β)
- Tearing mode III: Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη σε διεύθυνση παράλληλη στην ακμή της ρωγμής. Χαρακτηρίζεται ως στρέψη της ρωγμής (Σχήμα 1-1γ).



Σχήμα 1-1: Βασικές μορφές καταπόνησης ρωγμών [3]



Σχήμα 1-2: Τασικό πεδίο γύρω από τη κορυφή μιας ρωγμής στο κέντρο του στοιχείου (κατά IRWIN)

Ο συντελεστής K_i έχει σπουδαία σημασία, γιατί ελέγχει το τοπικό εντατικό πεδίο γύρω από τη κορυφή της ρωγμής και εκτός των άλλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος σχεδιασμού. Οι μηχανισμοί θραύσης ενός ρηγματωμένου υλικού και οι τάσεις σ_{ij} που εμφανίζονται, στη περιοχή γύρω από τη κορυφή της ρωγμής (με εξαίρεση τη ίδια τη κορυφή), προσδιορίζονται αν μετρηθεί το μέγεθος του συντελεστή αυτού και κυρίως από τη κρίσιμη τιμή του, K_{cr}^i . Το μέγεθος του κρίσιμου συντελεστή K_{cr}^i ενός ρηγματωμένου υλικού βρίσκεται με πειραματικές διαδικασίες και αποτελεί πολύ καλό κριτήριο προκειμένου να ελεγχθεί αν μια υπάρχουσα ρωγμή σε ένα δομικό στοιχείο θα αρχίσει να μεγαλώνει ή όχι κάτω από την επίδραση μιας στατικής φόρτισης σ_0 . Ο σχεδιασμός για ένα ρηγματωμένο δομικό στοιχείο απαιτεί να ισχύει η μαθηματική σχέση:

$$K_i \leq K_{cr}^i$$

Αν η τιμή του συντελεστής K_i γίνει μεγαλύτερη από τη κρίσιμη τιμή τότε ξεκινά η εξέλιξη (συνήθως αύξηση μήκους) της ρωγμής του ρηγματωμένου στοιχείου.

1.2.2 Επίδραση ρωγμών στην αντοχή ρηγματωμένων μεταλλικών σωμάτων

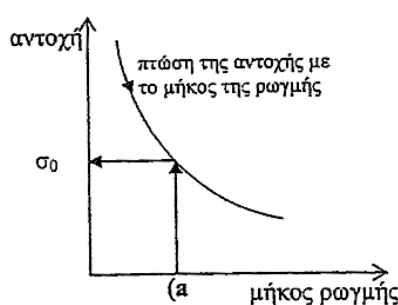
Οι ρωγμές σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο, π.χ. ενός αυτοκινήτου, στη άτρακτο αεροσκάφους κ.α., μειώνουν την αντοχή του και συχνά η κατασκευή καταρρέει σε μικρότερα στατικά φορτία από εκείνα που σχεδιάστηκαν. Έχει βρεθεί από πειράματα ότι η μέγιστη τάση $\sigma_{0,max}$ που μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα ρηγματωμένο δίσκο (δίσκο που περιέχει μια ρωγμή στο κέντρο του) εξαρτάται από μια μέγιστη κρίσιμη

τιμή του συντελεστή SIF κοντά στη κορυφή της ρωγμής, και επίσης μειώνεται εκθετικά με το μήκος της ρωγμής (Σχήμα 1-3), κατά τον τύπο:

$$\sigma_{0,max} = \frac{K_{kr}}{\sqrt{\pi a}}$$

όπου: K_{kr} = η κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων πάνω από την οποία η ρωγμή αρχίζει να αυξάνει.

Από το διάγραμμα του Σχήμα 1-3 φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες ρωγμές επηρεάζουν τη στατική αντοχή του ρηγματωμένου δομικού στοιχείου περισσότερο από ότι οι μικρότερες ρωγμές.



Σχήμα 1-3: Επίδραση του μήκους μιας ρωγμής στην αντοχή ενός ρηγματωμένου δίσκου

1.3 Διαφορές στις φιλοσοφίες σχεδιασμού («Διάρκεια ζωής με ασφάλεια» σε αντιπαράθεση με την «ανοχή στη βλάβη»)

Διάρκεια ζωής με ασφάλεια (safe life design) σημαίνει ότι ο σκελετός μιας κατασκευής σχεδιάζεται έτσι, ώστε να μπορεί να αντέξει μια ορισμένη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης, σε ώρες πτήσεις αν πρόκειται για αεροκατασκευή, για ένα δοσμένο εύρος φορτίου, χωρίς να απαιτείται επιθεώρηση.

Από τη στιγμή που η κατασκευή φθάνει στη σχεδιασθείσα διάρκεια ζωής και το εύρος φορτίου δεν έχει ξεπεραστεί, τότε το στοιχείο πρέπει να αντικατασταθεί, άσχετα με το γεγονός ότι δεν έχει συμβεί βλάβη μέχρι εδώ. Εάν τα φορτία έχουν ξεπεράσει το εύρος φορτίων, τότε το στοιχείο πρέπει να επαναξιολογηθεί. Αυτή μπορεί να περιοριστεί μόνο σε μια αριθμητική αποτίμηση που θα αποφέρει μια μειωμένη επιτρεπτή διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης ή μπορεί ακόμη να απαιτεί μια ειδική επιθεώρηση με χρήση διαδικασιών μη καταστρεπτικής δοκιμής.

Ο σχεδιασμός με ανοχή στη βλάβη επιτρέπει μια βλάβη να μεγαλώσει. Χωρίζεται σε δύο προσεγγίσεις. Στη πρώτη προσέγγιση (fail safe design) μια ρωγμή σε ένα δομικό στοιχείο επιτρέπεται να μεγαλώσει, σε οποιαδήποτε στιγμή, μέχρι ενός ορισμένου μήκους και μετά θα σταματήσει με ένα «κόφτη» ρωγμής (crack stopper), είτε το στοιχείο θα έχει θραυσθεί και τα φορτία που μεταφέρονται από αυτό το στοιχείο θα μεταφερθούν από κάποιο άλλο (διαδρομή πολλαπλών φορτίων - multiply load path). Στη δεύτερη προσέγγιση, ο σχεδιασμός με ανοχή στη βλάβη βασίζεται στην υπόθεση ότι μια ρωγμή υφίσταται σε μια θέση που δύσκολα επιθεωρείται και προσδιορίζει πόσο πολύ επιτρέπεται η ρωγμή να αυξηθεί μέχρι τελικώς να φθάσει σε ένα κρίσιμο μέγεθος (slow crack propagation).

Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στην αστοχία λόγω κόπωσης υλικού στα δομικά στοιχεία των αεροπορικών κατασκευών γιατί εκτιμάται από του μηχανικούς ότι η κόπωση είναι η αιτία για το 90 % των καταστροφών που έχουν συμβεί.

1.4 Κόπωση υλικού

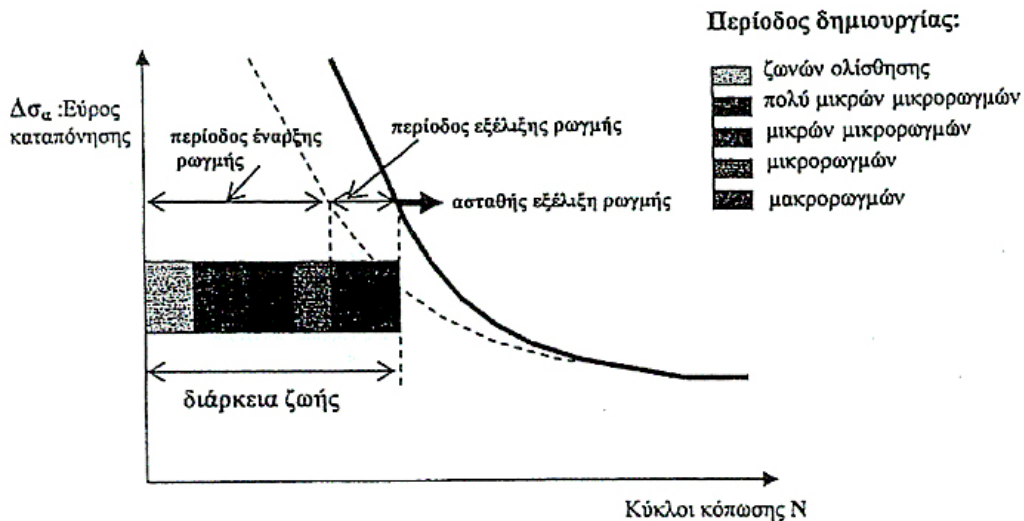
Κόπωση είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει σε ένα δομικό στοιχείο όταν φορτίζεται επαναληπτικά (δηλ. καταπονείται από φορτίο που μεταβάλλεται χρονικά). Από μηχανική άποψη η εναλλαγή των καταπονήσεων που υφίσταται το στοιχείο δημιουργεί ραβδώσεις στους κόκκους του μεταλλικού υλικού οι οποίες μετά δημιουργούν το πυρήνα μιας ρωγμής που σε ένα ορισμένο μέγεθος της μπορεί να ανιχνευθεί, με τη βοήθεια μιας μη καταστρεπτικής δοκιμής. Οι μικρορωγμές εξελίσσονται με το χρόνο σε μακρορωγμές, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τελικά οδηγούν σε αστοχία. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης (καταπόνησης) σε ένα ορισμένο εύρος φορτίου είναι το χαρακτηριστικό για τη **διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης** ενός κατασκευαστικού στοιχείου. Σε κάθε κύκλο καταπόνησης ένα ποσοστό της ενέργειας παραμόρφωσης του υλικού αποδίδεται στο περιβάλλον υπό μορφή θερμότητας με συνέπεια το υλικό να υφίσταται **γήρανση**, η οποία εξαρτάται κυρίως από το εύρος των μεταβολών των τάσεων, και το είδος της καταπόνησης. Η κόπωση υποβαθμίζει την αντοχή του υλικού με τη πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα οι κατασκευές να αστοχούν σε πολύ χαμηλότερα φορτία από κείνα που σχεδιάστηκαν να παραλάβουν. Στο παρακάτω τυπικό διάγραμμα κόπωσης (διάγραμμα γνωστό ως S-N) του Σχήματος 1-4 φαίνεται η εξάρτηση της αντοχής ενός δοκιμίου από τον αριθμό των κύκλων επανάληψης μιας καταπόνησης.

Ο ρυθμός εξέλιξης της ζημιάς ή βλάβης (δηλ των ρωγμών και της γήρανσης) που υφίσταται το υλικό εξαρτάται:

- Από το ίδιο το υλικό
- Από το μέγεθος και το είδος των επιβαλλόμενων φορτίων
- Από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες μέσα στις οποίες λειτουργεί το δομικό στοιχείο, που είναι συνήθως η θερμοκρασία και η διάβρωση. Αυτά ενισχύουν τη κόπωση. Στα δομικά εξαρτήματα των αεροσκαφών σπουδαίο ρόλο παίζει η **κόπωση λόγω διάβρωσης**, δηλαδή μιλάμε για επιταχυνόμενη κόπωση ενός εξαρτήματος αεροσκάφους λόγω της επίδρασης της διάβρωσης.

Η βάση όλου του σχεδιασμού της κόπωσης είναι τα υλικά και τα δεδομένα των εξαρτημάτων. Ο σχεδιασμός της κόπωσης ενός δομικού στοιχείου συνήθως περιγράφεται με μια καμπύλη διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης χαραγμένη σε διάγραμμα τάσης (εύρος τάσεων S) και αριθμού κύκλων επανάληψης (N) της φόρτισης σε ημιλογαριθμική κλίμακα (γνωστό ως διάγραμμα $S-N$). Παρακάτω φαίνεται ένα τέτοιο διάγραμμα (Σχήμα 1-4). Στη καμπύλη $S-N$ του Σχήμα 1-4 φαίνεται το πρώτο στάδιο της διάρκειας ζωής κόπωσης το οποίο σχετίζεται με τη χρονική περίοδο έναρξης της ρωγμής, ενώ το δεύτερο στάδιο αφορά την εξέλιξη (αύξηση μήκους) της ρωγμής κατά τη διάρκεια του οποίου η ρωγμή προχωρεί αυξανόμενη με κάθε κύκλο τάσης. Στο σημείο αυτό η διαδιδόμενη ρωγμή αποκτά ένα κρίσιμο μέγεθος a_{cr} , αρχίζει η ασταθής εξέλιξη της και επέρχεται ξαφνικά η τελική αστοχία του δομικού στοιχείου. Το όριο μεταξύ μικρορωγμής και ρωγμής αυτό από το οποίο αρχίζει η εξέλιξη δεν είναι εύκολο να καθοριστεί. Στη πράξη λαμβάνεται ως ρωγμή όταν το μήκος της έχει γίνει 2 χιλ. Αυτό που ενδιαφέρει ένα μηχανικό είναι να ανακαλύψει με ποιο ρυθμό εξελίσσονται οι μικρορωγμές, ποιες απ' όλες εξελίσσονται και ποιες όχι, ποια είναι η στιγμιαία αντοχή και δομική ακεραιότητα των κατασκευαστικών στοιχείων και ποια η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής τους. Η **διάρκεια ζωής σε κόπωση** N_f θεωρείται ότι είναι ο συνολικός αριθμός κύκλων καταπόνησης ως την αστοχία και ισούται με το άθροισμα του αριθμού των κύκλων για την έναρξη της ρωγμής N_i και του αριθμού των κύκλων για την διάδοση της ρωγμής N_p [4] :

$$N_i = N_f + N_p$$



Σχήμα 1-4: Διάγραμμα S-N: Καμπύλη διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης [1]

Το μήκος της ρωγμής $a_{κρ}$, κατά τη στιγμή της αστοχίας, καταγράφεται σε διαφορετικούς αριθμούς κύκλων φόρτισης για δοκιμές που εκτελούνται σε διαφορετικά εύρη τάσεων.

Η καμπύλη S-N είναι ιδιαίτερη για κάθε υλικό και αφού μετρηθεί πειραματικά για ένα δοσμένο υλικό, κάποιος μπορεί να τη χρησιμοποιήσει για να απαντήσει στις εξής σχεδιαστικές ερωτήσεις:

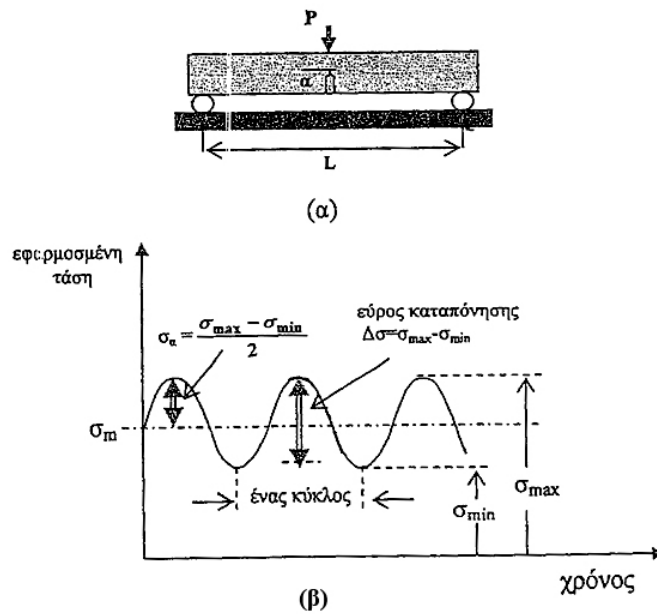
1. Αν γνωρίζει το εύρος των τάσεων που το καταπονούν, να προβλέψει τους κύκλους κόπωσης μέχρι την αστοχία
2. Αν ορίσει τους κύκλους κόπωσης μέχρι την αστοχία, να προσδιορίσει το επιτρεπόμενο εύρος τάσεων

1.4.1 Συμπεριφορά ρωγμής ενός λεπτού δίσκου σε κόπωση σταθερού εύρους τάσεων.

1.4.1.1 Χαρακτηριστικά της κόπωσης ρωγμών:

Στο προηγούμενο κεφάλαιο 1.2.2 είδαμε ότι η ύπαρξη ρωγμής μειώνει σημαντικά την αντοχή ενός εξαρτήματος σε σταθερή στατική φόρτιση (βλέπε και διάγραμμα στο Σχήμα 1-3). Η αντοχή του σώματος μειώνεται ακόμη περισσότερο όταν σ' αυτό επιδράσει ο μηχανισμός της κόπωσης (εναλλασσόμενη καταπόνηση). Αυτό θεωρείται ότι συμβαίνει γιατί εμφανίζεται ρωγμή που **εξελίσσεται με το χρόνο σε συνθήκες κόπωσης**, μέχρι να φθάσει ένα κρίσιμο μήκος, όπου συντελείται η αστοχία (θραύση).

Στα χαρακτηριστικά της καταπόνησης διακρίνουμε τα εξής μεγέθη (Σχήμα 1-5):



Σχήμα 1-5: Εναλλασσόμενη κυκλική φόρτιση [1]

Μέγιστη ονομαστική τάση σ_{\max} : Η μέγιστη (αλγεβρικά) τάση σε ένα κύκλο καταπόνησης

Ελάχιστη τάση σ_{\min} : Η μικρότερη (αλγεβρικά) τάση σε ένα κύκλο καταπόνησης

Λόγος τάσεων:

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

Μέση τάση:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2} * (1 + R)$$

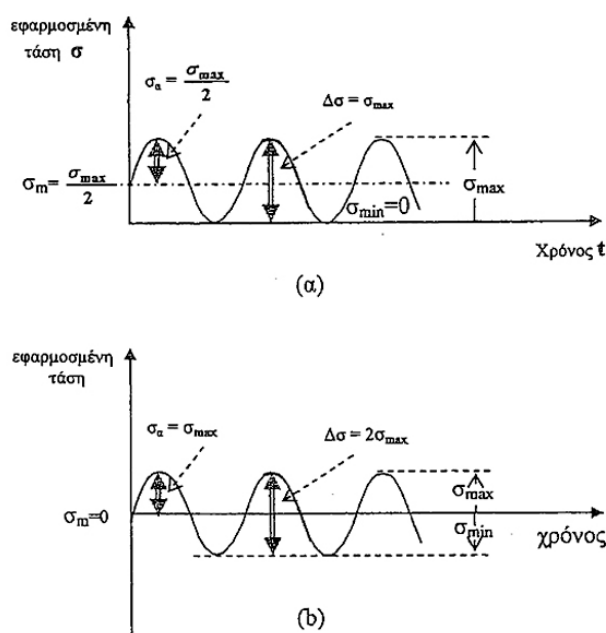
Εύρος τάσεων:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Επειδή $\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$ τα μεγέθη R και $\Delta\sigma$ είναι πάντα θετικά. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις κόπωσης είναι οι εξής (Σχήμα 1-6):

- Η πλήρης εναλλασσόμενη σε εφελκυσμό και θλίψη ($\sigma_m=0$, οπότε $R=-1$) (Σχήμα 1-6 b)
- Η εναλλασσόμενη σε εφελκυσμό καταπόνηση μεταξύ 0 και σ_{\max} ($\sigma_{\min}=0$, οπότε $R=0$) (Σχήμα 1-6α)

Οι περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον πειραματικό χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς των αεροπορικών υλικών γιατί προσομοιώνουν τις φορτίσεις που δέχονται τα κύρια δομικά στοιχεία των αεροσκαφών (άτρακτος, πτερύγια και κινητήρας).



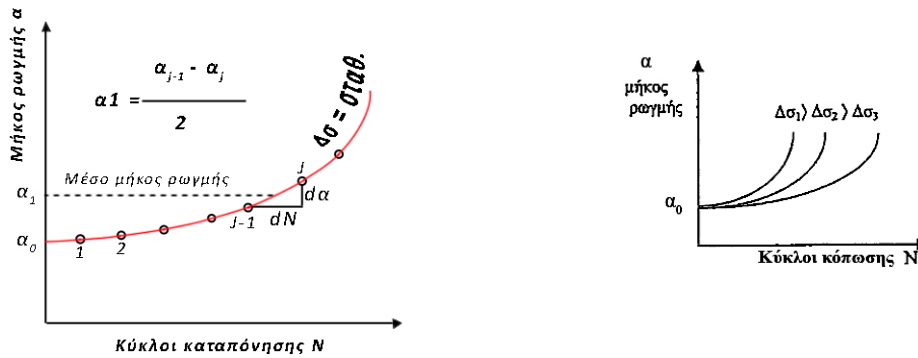
α) Εναλλασόμενη κυκλική καταπόνηση μεταξύ 0 και σ_{max} [1]

Σχήμα 1-6:

β) Πλήρης εναλλασόμενη κυκλική καταπόνηση [1]

1.4.1.2 Πείραμα κόπωσης ρωγμής βάσει κειμένων προδιαγραφών

Στα διαγράμματα του Σχήμα 1-7 εξετάζεται η εξέλιξη της ρωγμής σε συνθήκες κόπωσης. Στο αριστερό γράφημα φαίνεται μια τυπική καμπύλη αύξησης μιας ρωγμής αρχικού μήκους a_0 σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων καταπόνησης, σε σταθερό εύρος τάσεων $\Delta\sigma$. Η καμπύλη αυτή δημιουργήθηκε από τα δεδομένα ενός τυπικού πειράματος κόπωσης που εκτελείται βάσει κειμένων προδιαγραφών. Το δεξιό γράφημα δείχνει πως μεταβάλλεται η καμπύλη διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με διαφορετικά εύρη τάσεων $\Delta\sigma$.



Σχήμα 1-7: Εξέλιξη (αύξηση) ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης

Ένας ρηγματωμένος δίσκος- δοκίμιο (με ρωγή στη μέση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-8α) εκτίθεται σε εναλλασσόμενη κυκλική καταπόνηση υπό σταθερό εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-6. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η ένταση (Συντελεστής Έντασης Τάσεων K) γύρω από την κορυφή της ρωγμής εναλλάσσεται μεταξύ δυο τιμών K_{max} και K_{min} , που υπολογίζονται με τους τύπους:

$$K_{max} = \sigma_{max} \times \sqrt{\pi\alpha} \times Y \left[\frac{\alpha}{w} \right] \quad \text{και} \quad K_{min} = \sigma_{min} \times \sqrt{\pi\alpha} \times Y \left[\frac{\alpha}{w} \right]$$

Ενώ το εύρος των συντελεστών SIF είναι ίσο με:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta\sigma \times \sqrt{\pi\alpha} \times Y \left[\frac{\alpha}{w} \right]$$

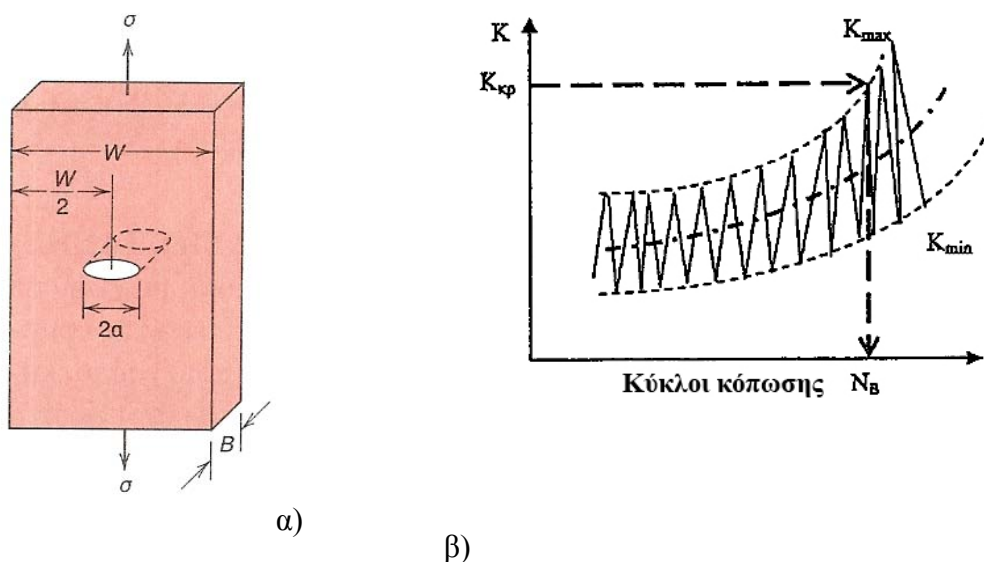
Όπου $Y (\alpha/w)$ είναι ο διορθωτικός συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου που χρησιμοποιείται και το μήκος ρωγμής, $\Delta\sigma$ το εύρος των ονομαστικών τάσεων που καταπονούν το δομικό στοιχείο και α το μήκος της υπάρχουσας ρωγμής.

Οι συντελεστές έντασης τάσεων K και οι σχετικοί με αυτούς διορθωτικοί συντελεστές Y μπορούν να βρεθούν σε εγχειρίδια και τα δεδομένα για την εξέλιξη της ρωγμής μπορούν να αποκτηθούν από εγχειρίδια, βιβλιογραφία και προγράμματα.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι το εύρος ΔK εξαρτάται τόσο από το αρχικό μήκος της ρωγμής α_0 και την γεωμετρία $Y (\alpha/w)$, όσο και από το εύρος της

εναλλασσόμενης καταπόνησης $\Delta\sigma$ και τη μέση τάση σ_m . Όμως από το διάγραμμα 1-7 φαίνεται ότι το μήκος a της ρωγμής αυξάνει με τους κύκλους καταπόνησης N .

Βγαίνει το συμπέρασμα ότι το εύρος ΔK των συντελεστών SIF γύρω από τη κορυφή της ρωγμής μεγαλώνει σύμφωνα με την αύξηση των κύκλων καταπόνησης, δηλαδή η ρωγμή καταπονείται με συνεχώς αυξανόμενο εύρος ΔK . Αυτό φανερώνεται και στο διάγραμμα 1-8β.



Σχήμα 1-8: Εύρος συντελεστή έντασης τάσεων K συναρτήσει του αριθμού κύκλων κόπωσης [2]

Από το διάγραμμα του Σχήμα 1-7 παρατηρούμε ότι για το ίδιο μέγεθος αύξησης Δa στην αρχή απαιτείται πολύ μεγαλύτερος αριθμός κύκλων ΔN από ότι αργότερα. Δηλαδή η ρωγμή, στην αρχή της διαδικασίας του πειράματος αυξάνει με πολύ αργό ρυθμό και στη συνέχεια με γρηγορότερο μέχρι να αστοχήσει. Γι' αυτό το λόγο εισάγεται η έννοια του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής da/dN και εκφράζουμε τον ρυθμό αυτό σε συνάρτηση με το εύρος των συντελεστών έντασης ΔK στη μορφή:

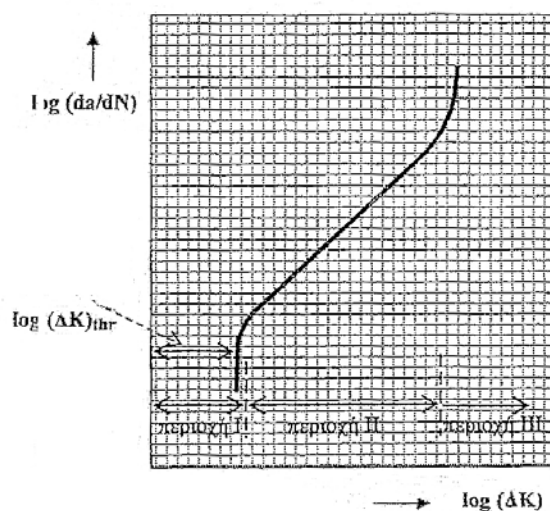
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$$

Η παραπάνω συνάρτηση εκφράζεται σχηματικά σε διπλή λογαριθμική κλίμακα με το Σχήμα 1-9. Σ' αυτό δείχνεται ότι ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής da/dN μεγαλώνει με το εύρος ΔK των συντελεστών έντασης. Είναι φανερό ότι και ο K , και το εύρος ΔK , και ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής, αυξάνονται σύμφωνα με τον αριθμό των

κύκλων καταπόνησης, παρόλο που διατηρείται σταθερό το εύρος καταπόνησης του δοκιμίου $\Delta\sigma$.

Η καμπύλη του διαγράμματος στο Σχήμα 1-9 χωρίζεται σε τρεις περιοχές που αντιστοιχούν σε τρεις φάσεις στην εξέλιξη της ρωγμής:

- Περιοχή I: Στη φάση αυτή (χαμηλές τάσεις / μικρά μεγέθη ρωγμών) δεν παρατηρείται (μακροσκοπικά) εξέλιξη της προϋπάρχουσας ρωγμής. Η φάση αυτή εκτείνεται μέχρις ότου το εύρος ΔK πάρει τη τιμή ΔK_{Thr} που είναι ένα κατώτατο όριο (κατώφλι) κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται εξέλιξη της ρωγμής
- Περιοχή II: Στη περιοχή αυτή ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής είναι σχεδόν σταθερός
- Περιοχή III: Ο ρυθμός εξέλιξης αυξάνει μη γραμμικά με τάση προς το άπειρο. Η ρωγμή εξελίσσεται με ασταθή τρόπο μέχρι την οριστική αστοχία του δομικού στοιχείου



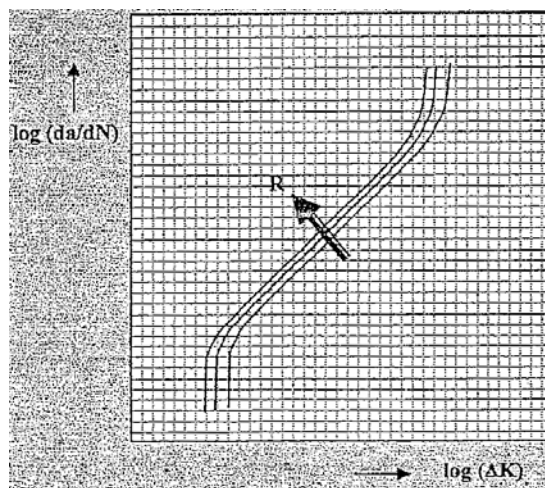
Σχήμα 1-9: Παράσταση σε λογαριθμική κλίμακα του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής da/dN σε συνάρτηση με το ΔK [1]

Έχουν διατυπωθεί πολλά εμπειρικά-πειραματικά μοντέλα που να εκφράζουν με μαθηματικούς τύπους τη συμπεριφορά της ρωγμής στη περιοχή II. Κατά το κανόνα Paris-Erdogan [5] η εξέλιξη της ρωγμής μπορεί να περιγραφεί με μια γραμμική εκθετική εξίσωση της μορφής:

$$\frac{da}{dN} = C \times (\Delta K)^m \quad [\text{mm} / \text{κύκλο}]$$

Όπου c και m είναι σταθερές (σταθερές Paris) που συχνά λέγονται και ως σταθερές του υλικού και δίνονται από πίνακες.

Επίσης τα πειράματα κόπωσης ρηγματωμένων δοκιμίων έδειξαν ότι ο ρυθμός εξέλιξης μιας ρωγμής επηρεάζεται σοβαρά από το μέγεθος της μέσης τάσης σ_m ή από το λόγο $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Στο Σχήμα 1-10 φαίνεται η επίδραση του λόγου R στη εξέλιξη της ρωγμής σε συνθήκες κόπωσης. Μεγαλύτερες τιμές του λόγου R οδηγούν σε μεγαλύτερους ρυθμούς στην αύξηση της ρωγμής, για το ίδιο μέγεθος ΔK .



Σχήμα 1-10: Σχηματική παράσταση της επίδρασης του λόγου R στο ρυθμό εξέλιξης της ρωγμής

[1]

1.5 Φιλοσοφίες Σχεδιασμού Δομικών Στοιχείων στις αεροπορικές κατασκευές

1.5.1 Κόπωση μεταλλικών δομικών στοιχείων αεροσκαφών

Η κόπωση των αεροκατασκευών έχει γίνει θέμα από τις αρχές του 20ου αιώνα. Τα αεροσκάφη σχεδιάζονταν ειδικά με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν τα φορτία για μια προσδιορισμένη διάρκεια ζωής χωρίς ορατές ρωγμές. Η πρόοδος που επετεύχθη στη Θραυστομηχανική από τότε, έχει ωφελήσει με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή η βλάβη (ρωγμές) μπορεί να επιτραπεί να είναι παρούσα στη δομή, υπό τον όρο ότι η διάδοση της μπορεί να ελεγχθεί. Αυτό έχει οδηγήσει σε σχεδίαση ελαφρότερου βάρους, που

είναι πάντοτε μια βασική αρχή σχεδίασης για αεροσκάφος, αλλά απαιτεί επίσης να γίνει περισσότερη προγραμματισμένη επιθεώρηση κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του [6].

Το ισοζύγιο μεταξύ του κέρδους δια μέσου του μικρότερου βάρους σε αντίθεση με τη σπατάλη που προκύπτει από την αυξημένη προσπάθεια επιθεώρησης έχει γίνει θετική σε σχέση με το άμεσο λειτουργικό κόστος. Έχει ήδη εδραιωθεί μια αποτελεσματική διαδικασία σχεδιασμού και συντήρησης που έχει παράγει κανόνες πρακτικής, σύνολο οδηγιών και εγχειρίδια τα οποία βελτιώνονται συνέχεια. Οι σχεδιαστές έχουν διδαχθεί πολλά από διάφορα αεροπορικά ατυχήματα που έχουν συμβεί στο παρελθόν πέρα απ' αυτά που έχω ήδη παρουσιάσει. Όλα αυτά τα ατυχήματα ήταν σχετικά με την μεταλλική δομή των αεροσκαφών. Παρόλο όμως την ύπαρξη αυτών των ατυχημάτων κύριο μέλημα των μηχανικών παραμένει η μείωση του άμεσου λειτουργικού κόστους ενός αεροσκάφους χωρίς συμβιβασμούς στην ασφάλεια και στην αξιοπιστία του. Οι επιλογές που υπάρχουν όσον αφορά το ισοζύγιο που αναφέρθηκε παραπάνω είναι δύο :

1. Να επιτραπεί περισσότερη ελεγχόμενη ανοχή στη βλάβη στην αεροδομή ελπίζοντας να επιτευχθούν παραπέρα μειώσεις του βάρους.
2. Να βελτιωθεί και να αυτοματοποιηθεί η επιθεώρηση με σκοπό να μειωθεί το κόστος της, η και τα δύο

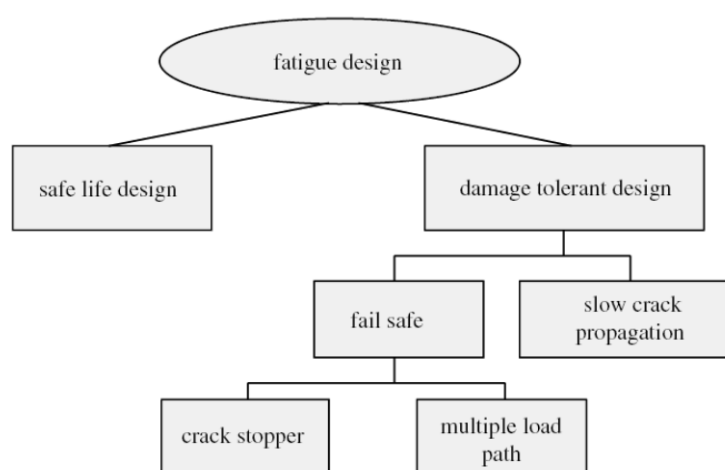
Ένας τρόπος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι η απόκτηση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τη συμπεριφορά της δομής των αεροσκαφών οι οποίες έπειτα θα βοηθήσουν [6]:

- Να προσδιορίζεται πολύ πιο συχνά το τρέχον στάδιο (εξέλιξη) μιας βλάβης σε ένα στοιχείο της αεροδομής
- Να επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της ζημιάς σε περιοχές στις οποίες ήταν προηγουμένως αδύνατο να γίνει λόγω οικονομικών όρων.
- Να εμβραθύνονται περισσότερο οι αναλυτικές διαδικασίες που επιτρέπουν τον υπολογισμό της συσσώρευσης της βλάβης και της αναλυσκόμενης διάρκειας ζωής.

Η κόπωση και η ανοχή στη βλάβη, στα οποία αναφερθήκαμε στις προηγούμενες ενότητες, είναι κυρίαρχοι παράγοντες και δεσπόζουν σε όλη τη διαδικασία του σχεδιασμού της δομής του αεροσκάφους και της επακόλουθης ζωής συντήρησης.

Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να ικανοποιηθούν πλήρως όταν είναι γνωστά τα εξής: οι συνθήκες φόρτισης που υφίσταται το αεροσκάφος κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, η κατανομή των τάσεων που προκύπτουν και οι ιδιότητες των υλικών.

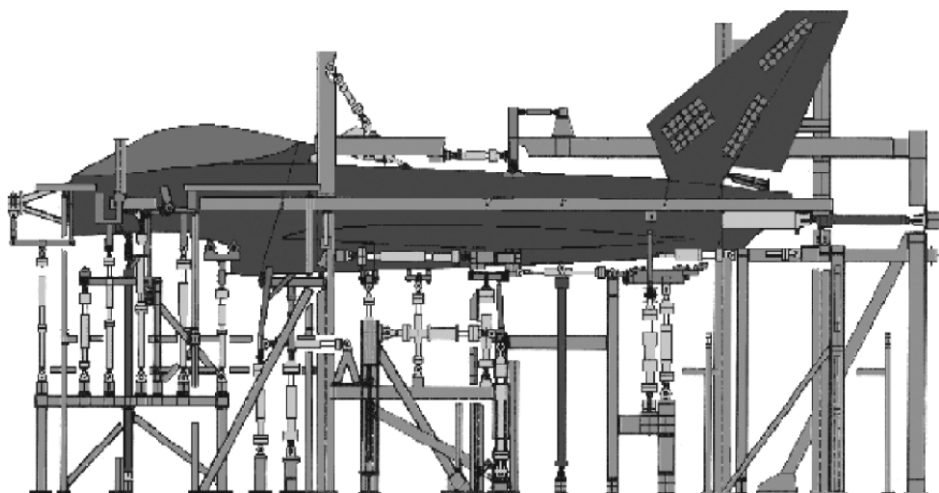
Η σχεδιαστική φιλοσοφία είναι συνδεδεμένη με αυτό, το οποίο εξαρτάται κυρίως από τη δυνατότητα και ικανότητα επιθεώρησης των δομικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της συντήρησης και από τη δυνατότητα επιδιόρθωσης ή αλλαγής τους σε περίπτωση βλάβης ή τελικής αστοχίας. Η ικανοποίηση ή όχι αυτών των κριτηρίων εξαρτάται πολύ από την εφαρμοσθείσα σχεδιαστική μέθοδο. Στο Σχήμα 1-11 φαίνονται οι φιλοσοφίες σχεδιασμού του πλαισίου ενός αεροσκάφους που καταπονείται σε κόπωση, οι οποίες έχουν ήδη επεξηγηθεί στη παράγραφο 1.3 .



Σχήμα 1-11: Οι αρχές για τον σχεδιασμό των αεροκατασκευών σε κόπωση [6]

Από τη στιγμή που ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός τότε γίνεται η κατασκευή της δομής (μεταλλικού πλαισίου) του αεροπλάνου. Αλλά για να κατανοηθεί πλήρως πως αυτό το ολοκληρωμένο πλαίσιο συμπεριφέρεται σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης, θα πρέπει να αποτιμηθεί στο έδαφος σε μια κρίσιμη δοκιμή κόπωσης πλήρους κλίμακας (Σχήμα 1-12). Ο μεταλλικός σκελετός προσδένεται σε ένα μηχάνημα δοκιμής και φορτίζεται επαναληπτικά με τη βοήθεια διαφορετικών κυλίνδρων φόρτισης σύμφωνα με τις συνδυασμένες φορτίσεις και τη σειρά για την απαιτούμενη διάρκεια ζωής πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή ασφαλείας, π.χ. 6000 ώρες πτήσεων X 3=18000 ώρες πτήσης. Η μεταλλική δομή επιθεωρείται κανονικά και για

κάθε παρατηρούμενη ατέλεια ή ρωγμή τότε επανασχεδιάζεται ή γίνονται τροποποιήσεις στις διαδικασίες συντήρησης.



Σχήμα 1-12: Εγκατάσταση δοκιμής κόπωσης (κύριας κλίμακας) του σκελετού ενός μαχητικού [6]

1.5.2 Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των αεροσκαφών

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών είναι πρωτεύον θέμα για την κοινότητα των μηχανικών. Αυτή η ανάγκη είναι ακόμη περισσότερο έντονη στη περίπτωση της γήρανσης των αεροσκαφών και στις πολιτικές κατασκευές πολλές από τις οποίες λειτουργούν καλά πέραν της αρχικής τους σχεδιαστικής ζωής. Η τρέχουσα φιλοσοφία σχεδιασμού με ανοχή στη βλάβη απαιτεί ότι μια δομική κατασκευή είναι ικανή να αντέχει μικρή ζημιά (βλάβη) χωρίς να αστοχήσει, και ότι θα θεσπισθεί ένα πρόγραμμα επιθεώρησης που θα ανιχνεύει αυτές τις ατέλειες πριν να μεγαλώσουν μέχρι ένα κρίσιμο όριο. Αυτή η προσέγγιση (ανοχή στη βλάβη) αναγνωρίζει το ακατόρθωτο της εξακρίβωσης τελείως του δομικού πλεονασμού- προϋπόθεση της φιλοσοφίας Fail Safe Design- και δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην επιθεώρηση για να εξασφαλισθεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία [7].

Η πολλαπλή βλάβη κόπωσης, οι κρυφές ρωγμές σε θέσεις της κατασκευής που δύσκολα προσεγγίζονται, οι ασυγκόλλητοι αρμοί, η διάβρωση και οξείδωση, είναι οι κύριες ατέλειες που συναντώνται στον σημερινό εκτεταμένο στόλο του γηράσκοντα αεροσκάφους, των γεφυρών, των κτιρίων και των οχημάτων μεταφοράς.

Παραδείγματα συνηθισμένων ατελειών που ευρέθησαν στη δομή των αεροπλάνων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες (Σχήμα 1-13). Αν και υπάρχουν εγκατεστημένες καλές διαδικασίες σχεδίασης και συντήρησης για να ανιχνεύσουν την επίδραση της δομικής κόπωσης, νέα απροσδόκητα φαινόμενα μπορεί να επιληφθούν με την εφαρμογή αναπτυγμένων μεθόδων ανίχνευσης ατελειών (ρωγμών).

Αναπτύσσονται συνεχώς καινοτόμες μέθοδοι για να υπερπηδήσουν ένα σωρό από εμπόδια στην επιθεώρηση, τα οποία πηγάζουν από περιορισμούς στη προσβασιμότητα, πολυσύνθετες γεωμετρίες, και τη θέση και το βάθος κρυμμένων ρωγμών [7]. Π.χ. νέοι αισθητήρες έχουν κατασκευασθεί το τελευταίο διάστημα .

Ο δυναμισμός στην ανάπτυξη των αισθητήρων στη τελευταία περίοδο οι οποίοι μεταξύ των άλλων τηρούν τις αρχές της μείωσης του μεγέθους, της λειτουργικότητας και της τιμής, συνδυασμένοι με την αξιοσημείωτη πρόοδο που επετεύχθη στην επεξεργασία του σήματος των αισθητήρων και τους αναβαθμισμένους αλγορίθμους έχει οδηγήσει σε ένα νέο κύμα ανάπτυξης τεχνολογίας δομής που ορίζεται με τον όρο «Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας» (structural health monitoring-SHM).



**Συνθετικό στρώμα φλοιού
ξεκολλημένο από τη κυψέλη**

Ρωγμή σε ενισχύσεις

**Διάβρωση συναρμογής
ήλωσης**

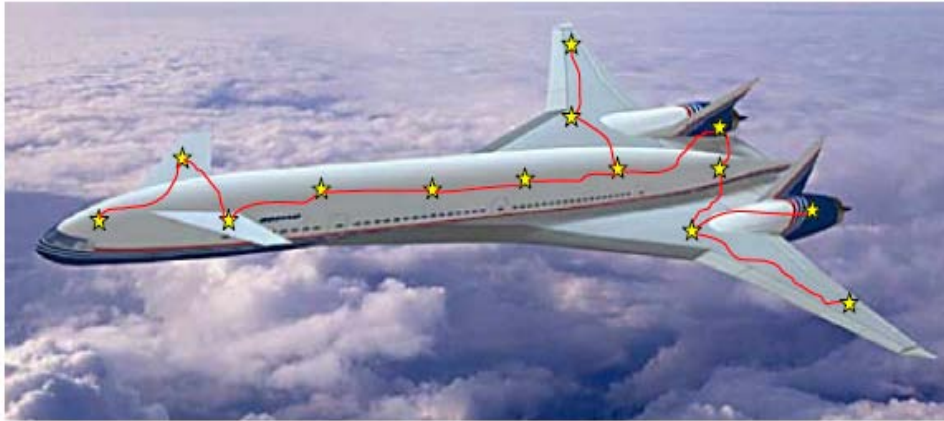
Σχήμα 1-13: Παράδειγμα ξεκολλήματος, ρωγμής και διάβρωσης στη δομή αεροσκάφους [7]

Σήμερα γίνεται η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των αεροσκαφών χωρίς μεγάλες διαφορές σε σχέση με τις τελευταίες δεκαετίες. Περισσότερο συντελείται με την οπτική επιθεώρηση υποστηριζόμενη και με άλλες τεχνικές μη καταστρεπτικών δοκιμών (non-destructive testing techniques - NDT), όπως υπερήχους και δινορεύματα. Η παρακολούθηση γίνεται στα προδιαγεγραμμένα χρονικά διαστήματα προσδιορισμένα από τις ασθενέστερες συνδέσεις στο σύστημα

του αεροπλάνου. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δημιουργείται ένας τεράστιος αριθμός πληροφοριών οι οποίες χρειάζονται να επεξεργασθούν άμεσα από το προσωπικό της συντήρησης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η πληροφορία είναι πάντα ή ίδια: "Δεν βρέθηκε βλάβη". Παραπέρα η μεγαλύτερη προσπάθεια για την απόκτηση των πληροφοριών αυτών αφορά την αποσυναρμολόγηση και το ξαναδέσιμο του πλαισίου του αεροπλάνου για να γίνει η πρόσβαση στο εξεταζόμενο εξάρτημα. Σε μερικές περιπτώσεις ακόμη αντικαθιστάται κάποιο εξάρτημα χωρίς να παρουσιάζει βλάβη, επειδή δεν έχει μελετηθεί κανένας άλλος τρόπος (μέσο) να ληφθεί περισσότερο συνεχόμενη πληροφορία από αυτά τα εξαρτήματα [6].

Το πρόβλημα αυτό φαίνεται ότι το λύνει η νέα τεχνική της ενσωμάτωσης αισθητήρων στη δομή-σκελετό του αεροσκάφους ώστε να συλλέγεται αποτελεσματικότερη πληροφορία. Το σύστημα αυτό της ενσωμάτωσης αισθητήρων αποκαλείται ως «advanced aircraft SHM» [6].

Έτσι με το τελευταίο αυτό αναβαθμισμένο σύστημα η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας (SHM) ενός αεροσκάφους μελετάται σήμερα ώστε οι αισθητήρες να ενσωματωθούν στα στοιχεία του σκελετού για να επιτευχθεί η συνεχής παρακολούθηση της δομής και να συνδυαστεί αυτή η λειτουργία με την αναβαθμισμένη αυτοματοποιημένη επεξεργασία του σήματος. Στηρίζεται στις αρχές του μηχανικού σχεδιασμού που εφαρμόζονται και προσπαθεί να αυτοματοποιήσει και να επεκτείνει τη διαδικασία της παρακολούθησης προς όφελος του μηχανικού συστήματος που μελετάται. Έτσι διατηρεί τη συνεκτικότητα με τον υπάρχοντα σχεδιασμό στη μηχανική. Χρησιμοποιεί αισθητήρες όπως οπτικές ίνες, πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα (MEMS) ή ενδεχομένως ακόμη νανοδομές. Αυτοί οι αισθητήρες επιτρέπουν τη παρακολούθηση των τάσεων, ηλεκτρικών πεδίων, ακουστικών κυμάτων, θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, χημικών, κ.α. Η πληροφορία μεταδίδεται είτε ενσύρματα είτε, τελευταία όλο και περισσότερο, ασύρματα. Το Σχήμα 1-14 απεικονίζει ένα δίκτυο αισθητήρων που αναπτύσσεται σε κατάλληλες θέσεις του αεροσκάφους (άτρακτος και πτερύγια) για να παρακολουθεί κρίσιμα σημεία επάνω στην επιφάνεια.



Σχήμα 1-14: Απεικόνιση δικτύου κατανεμημένων αισθητήρων για παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας αεροσκάφους [7]

1.5.2.1 Ποια μεγέθη μπορούν να παρακολουθούνται;

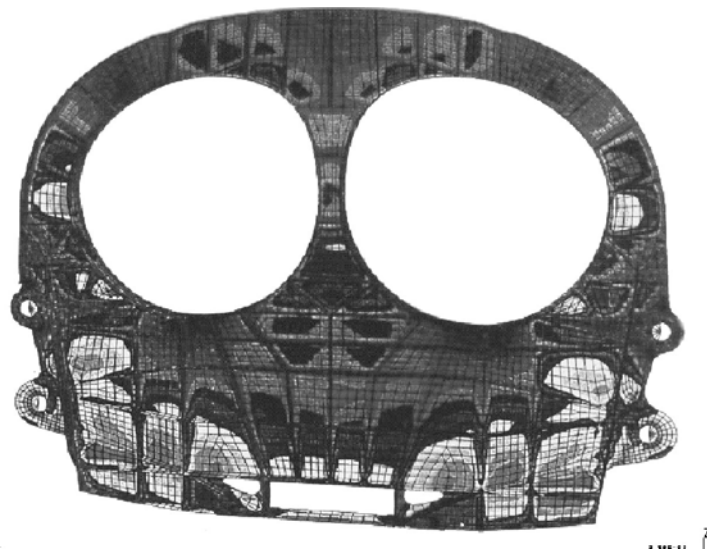
Όλος ο σχεδιασμός της δομής βασίζεται στα φορτία (στατικά και εναλλασσόμενα) που καταπονούν το αεροπλάνο κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, τα οποία όμως πρέπει να θεωρηθούν δεδομένα πριν τον σχεδιασμό. Τα φορτία αυτά δεν περιορίζονται μόνο στα μηχανικά. Περιλαμβάνουν και τα περιβαλλοντολογικά φορτία όπως η θερμοκρασία, υγρασία, χημικές διαβρώσεις κ.α. Έτσι ορίζεται ένας συντελεστής ασφαλείας που καλύπτει όλες τις αβεβαιότητες που υπάρχουν με αυτά τα φορτία. Εάν μπορούσαμε όμως να πληροφορηθούμε πότε και ποια φορτία συμβαίνουν (τη πραγματική σειρά φόρτισης), θα ήταν δυνατό να μειωθεί ο αρχικός συντελεστής ασφαλείας επειδή η ασφάλεια της κατασκευής θα καλυπτόταν από τη πρόσθετη διατιθέμενη πληροφορία. Αυτό θα επέτρεπε ελαφρότερες κατασκευές χωρίς μείωση της ασφάλειας. Έτσι η παρακολούθηση των φορτίων που καταπονούν τη δομή του αεροσκάφους είναι αναγκαία. Το άλλο φαινόμενο που χρειάζεται παρακολούθηση σαν συνέπεια και του μηχανικού σχεδιασμού, είναι η βλάβη (φθορά, ρωγμές, ατέλειες). Η βλάβη παρακολουθείται για τους εξής λόγους [6]:

- Τα φορτία λειτουργίας και οι ιδιότητες των υλικών παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά τιμών που επιδρά σημαντικά στον χρόνο έναρξης της βλάβης αλλά και στη περίοδο της εξέλιξής της
- Η πραγματική καταπόνηση της δομής μπορεί να ξεπεράσει την σχεδιαστικά επιτρεπόμενη (φαινόμενο υπερφόρτωσης) είτε απρόβλεπτα, είτε εσκεμμένα όσον αφορά στις βελτιώσεις ή στις παρατάσεις ζωής, και

- Η βλάβη επιτρέπεται να συμβεί σύμφωνα με τη πιο πρόσφατη φιλοσοφία σχεδίασης, αλλά πάντα ελέγχοντας την εξέλιξη της (π.χ. έλεγχος της αύξησης μιας επικίνδυνης ρωγμής)

Η παρακολούθηση των φορτίων γίνεται σήμερα με χρήση ηλεκτρομηκυνσιόμετρων (strain gauges) σε επιλεγμένες θέσεις. Η πληροφορία καταγράφεται και δρομολογείται στο έδαφος και τροφοδοτεί ένα ψηφιακό μοντέλο που είναι κυρίως το μοντέλο τάσεων της δομής του αεροσκάφους που λειτουργεί με βάση ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (FE). Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της βλάβης που συσσωρεύτηκε σε οποιαδήποτε θέση της δομής [6].

Τα υπάρχοντα πρόσφατα προγράμματα ανάλυσης επιτρέπουν τη χαρτογράφηση της δομής όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των τάσεων και πιέσεων καθώς και της βλάβης που έχει συσσωρευτεί. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή έγχρωμων εικόνων κατανομής τάσεων. Ένα παράδειγμα (η εικόνα μετατράπηκε σε A/M) φαίνεται στο Σχήμα 1-15.



Σχήμα 1-15: Εικόνα κατανομής τάσεων σε ένα πλαίσιο ατράκτου [6]

Αυτές οι εικόνες επιτρέπουν να επιλέξουμε και να αποφασίσουμε τις θέσεις που αξίζει να παρακολουθήσουμε όσον αφορά την αλληλουχία φορτίων τους, τα οποία έπειτα εισάγονται για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και επακόλουθο υπολογισμό

της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης. Ένας περιορισμός στη χρήση των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων είναι η σχετικά μεγάλη ποσότητα της καλωδίωσης που απαιτείται. Δυο καλώδια χρειάζονται για κάθε αισθητήρα.

Για αυτό πιο αποτελεσματική είναι η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών (FO). Οι αισθητήρες αυτοί είναι πιο ελαφροί, δουλεύουν σε χαμηλή ισχύ, δεν επηρεάζονται από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, έχουν υψηλή ευαισθησία και εύρος συχνοτήτων και είναι συμβατοί με τη οπτική μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων. Γενικά, αλλαγές στις ιδιότητες του φωτός διαμορφώνουν τη βάση στην οποία στηρίζεται η τεχνολογία αισθητήρων οπτικών ινών. Με κόλληση ή εμφύτευση μιας **οπτικής ίνας** σε κατασκευή και παρακολουθώντας την αλλαγή στην ένταση του φωτός, τη φάση ή το μήκος κύματος στην έξοδο, προκύπτει πληροφορία για τη δομική κατάσταση της κατασκευής.

Με ένα μόνο αποδιαμορφωτή (optical interrogator) σήματος ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιείται από πολλούς αισθητήρες, το κόστος σύνδεσης κάθε αισθητήρα μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Επίσης, είναι δυνατό να μετρηθούν ταυτόχρονα δύο μεγέθη (πχ. αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις) από τον ίδιο αισθητήρα. Επιπλέον, με τις οπτικές ίνες, μπορεί να σχεδιασθούν κατανεμημένοι αισθητήρες, οι οποίοι παρακολουθούν μεταβολές στην τιμή ενός μεγέθους κατά μήκος της οπτικής ίνας.

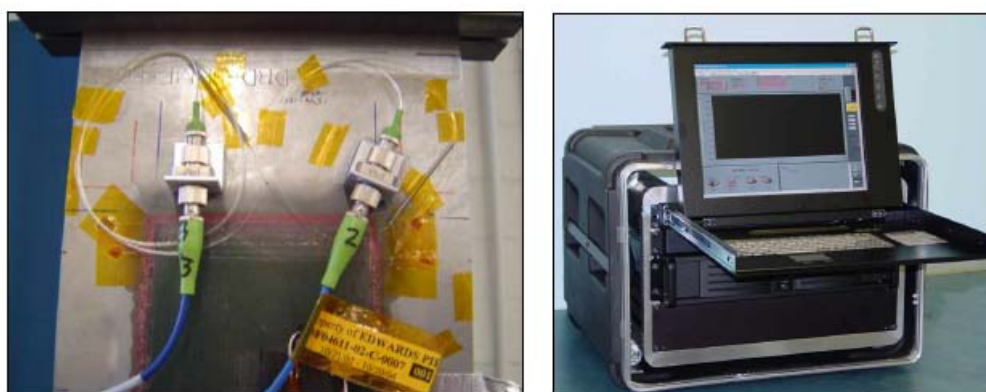
Τελευταία τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων FO, που χρησιμοποιούνται ειδικότερα, είναι οι αισθητήρες οπτικών ινών FBG (fibre Bragg grating). Αυτοί είναι οπτικές ίνες στις οποίες έχουν δημιουργηθεί μια ή περισσότερες ζώνες από ανάγλυφα φράγματα (πλέγματα) διάθλασης (Bragg gratings), που είναι περιοδικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της ίνας σε κλίμακα μήκους οπτικού κύματος.

Η τροποποιημένη τοπική ζώνη της ίνας λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο, αντανακλώντας έντονα το φως μήκους κύματος ίδιου με της περιόδου των φραγμάτων, που είναι γνωστή από την κατασκευή του FBG, επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως (άλλες συχνότητες) να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα. Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στην τάση εφελκυσμού και στις μεταβολές θερμοκρασίας. Όταν η ίνα επιμηκύνεται, οπότε αυξάνεται το βήμα των φραγμάτων διάθλασης, αντίστοιχα το μέγιστο στην έξοδο μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Δημιουργώντας φράγματα διάθλασης με διαφορετικές περιόδους μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε διαφορετικές τοπικές ζώνες της οπτικής ίνας μπορούμε να εντοπίσουμε τις τυχόν επιμηκύνσεις της ίνας, άρα και της

κατασκευής. Εφαρμογή μικρής τάσης εφελκυσμού ή μεταβολή της θερμοκρασίας μεταβάλλουν τη συχνότητα του ανακλώμενου φωτός. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ασκούμενης τάσης ή της θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστοιχα.

Το ακαταμάχητο πλεονέκτημα των αισθητήρων FBG είναι ότι μπορούν να παραταχθούν σαν σειρές από εκατοντάδες ή ακόμη χιλιάδες αισθητήρων κατά μήκος μιας απλής οπτικής ίνας και καθένας δύναται ακόμη να αναγνωριστεί εξ' αιτίας του διαφορετικού τους τύπου πλέγματος (πολυπλεξία οπτικής ίνας). Η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου έχει επαληθευθεί σε πολλές περιπτώσεις οι οποίες έχουν περιγραφεί σε πραγματικές δοκιμές σε δομές αεροσκαφών. Οι αισθητήρες FBG μπορούν ακόμη να παρακολουθήσουν τη θερμοκρασία και τη πίεση.

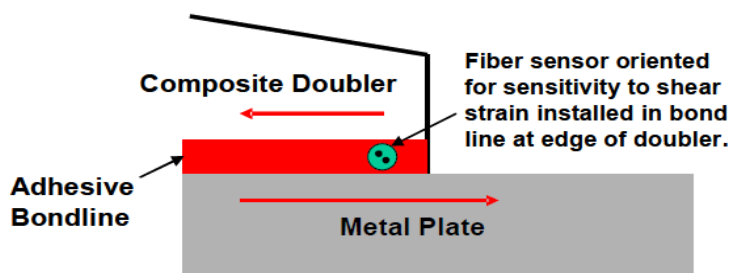
Το Σχήμα 1-16 δείχνει ένα κοντινό πλάνο δύο τυπικών αισθητήρων FBG με τους ακροδέκτες τους καθώς αυτοί εισάγονται και εξάγονται στην κόλλα σε μια επισκευή με επίθεμα, με σκοπό τον έλεγχο των διατμητικών τάσεων σε ένα τυπικό πείραμα. Φαίνεται επίσης μια τυπική συσκευή λήψης δεδομένων (interrogator) για να παρακολουθεί τους FBG αισθητήρες.



Σχήμα 1-16: FBG αισθητήρες οπτικών ινών και συσκευή παρακολούθησης FO [7]

Για την εκτέλεση του πειράματος, η οπτική ίνα πιέζεται προς τη μεταλλική δομική επιφάνεια πριν από την εφαρμογή της κόλλησης και του επιθέματος. Στο Σχήμα 1-17 φαίνεται από άλλη όψη η εμφυτευμένη ίνα του FBG αισθητήρα στην επιφάνεια κόλλησης και στην άκρη του σύνθετου μπαλώματος, στο σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη διατμητική τάση (Σχήμα 2-3, παράγ. 2.2). Τα φράγματα διάθλασης της ίνας προσανατολίζονται ώστε ο άξονας πόλωσης της να βρίσκεται σε γωνία 45° ως προς

το επίπεδο της μεταλλικής δομής, με σκοπό την ευαισθησία της στη διατμητική τάση [7].



Σχήμα 1-17: Αισθητήρας FBG εμφυτευμένος στο στρώμα της κόλλας με ίνα προσανατολισμένη για τη μέγιστη ευαισθησία στη διατμητική τάση [7]

Άλλος τύπος αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση των φορτίων είναι οι MEMS. Αυτοί είναι μικροαισθητήρες σε βάση πυριτίου που επιτρέπουν τη μετατροπή της ενέργειας (θερμικής, μηχανικής, μαγνητικής ή ηλεκτροστατικής) σε ηλεκτρικά σήματα και έτσι επιτρέπουν τη παρακολούθηση πολλών παραμέτρων όπως η ένταση, θερμοκρασία, κραδασμοί, υγρασία, πίεση και ακόμη διαφορετικούς τύπους υγρών. Μέχρι τώρα έχουν αναπτυχθεί ειδικά για παρακολούθηση της χημικής διάβρωσης [6].

1.5.2.2 Η παρακολούθηση των βλαβών (ρωγμών)

Οι αισθητήρες που εμφυτεύονται πλήρως ή αυτοί που προσαρμόζονται στη δομή που θα ελεγχθεί, οι οποίοι εκπέμπουν μακριά το σήμα ελέγχου μετά από εντολή του χρήστη, μπορούν να βοηθήσουν να μειωθεί η προσπάθεια που απαιτείται για την αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση για επιθεωρήσεις σε μια θέση της δομής όπου η βλάβη ανιχνεύθηκε πραγματικά και η επιδιόρθωση είναι αναπόφευκτη.

Για να καθορισθεί σε ποιες θέσεις της δομής είναι χρήσιμη η ενσωμάτωση αισθητήρων και σε ποιες πρέπει να αποφεύγεται, απαιτείται να έχει συνταχθεί πρώτα ο χάρτης κατανομής των τάσεων, όπως φαίνεται παραπάνω στο Σχήμα 1-15 και ειδικότερα ο χάρτης κατανομής της βλάβης της επιφάνειας που εξετάζεται.

Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη και οποιαδήποτε σχετιζόμενη καταγραφή υπάρχει στη σχεδιασθείσα συντήρηση που επιτρέπει τον εμπλουτισμό της πληροφορίας. Με τους ενσωματωμένους στη δομή αισθητήρες μπορεί να γίνει η παρακολούθηση διαφόρων φυσικών παραμέτρων. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές παρακολούθησης

σήμερα είναι οι υπέρηχοι¹ και τα δινορεύματα² (eddy currents), οι οποίες διατηρούν και τη συμβατότητα με τις μη καταστρεπτικών δοκιμών τεχνικές (NDT) της αεροναυτικής.

Οι υπέρηχοι και τα ακουστικά κύματα μπορούν να εκπεμφθούν στις δομές με τη προσάρτηση ή ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μέσα σε ένα τμήμα της κατασκευής. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι αισθητήρες-μετατροπείς (Piezoelectric Transducers – PZT) που έχουν την ικανότητα να δουλεύουν σε δύο λειτουργίες, σαν πομποί σημάτων (transmitters) και σαν δέκτες (receptors). Σαν πομποί παράγουν ελαστικά κύματα³ που διαδίδονται στο περιβάλλον δομικό υλικό. Σαν δέκτες δέχονται ελαστικά κύματα και τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα. Σαν ενεργά στοιχεία χρησιμοποιούν λεπτά πιεζοηλεκτρικά πλακίδια. Οι υπέρηχοι και τα ηχητικά κύματα εκπέμπονται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και σαρώνουν μεγάλες περιοχές της δομής για να εντοπίσουν εσωτερικές ή επιφανειακές ατέλειες και ρωγμές οι οποίες προκαλούν αλλαγές στις ιδιότητες αυτών των κυμάτων (ταχύτητα μετάδοσης του κύματος, γωνία φάσης, συχνότητα, μήκος διαδρομής), ως και ανακλάσεις που δημιουργούνται στο χώρο που υπάρχει βλάβη (μετρείται η γωνία εκτροπής της ανάκλασης ή διάθλασης του ήχου). Συνήθως εκπέμπουν τα λεγόμενα Lamb/Love κύματα που είναι ένα από τα περισσότερο αποδοτικά, επειδή λειτουργούν σαν καθοδηγούμενα κύματα. Το ανακλώμενο ή εκπεμπόμενο σήμα μπορεί έπειτα να καταγραφεί από ένα άλλο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και να προσδιοριστούν κατ' αυτό τον τρόπο οι αλλαγές που υφίσταται στις ιδιότητες του, οι οποίες στη συνέχεια μεταφράζονται σε αποκάλυψη της θέσης και του εύρους της βλάβης.

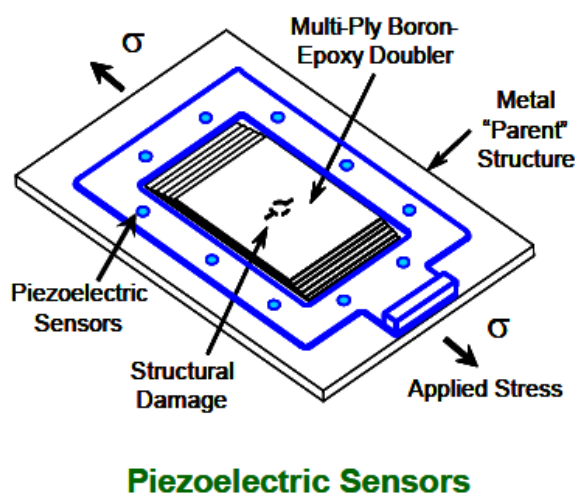
Στο Σχήμα 1-18 φαίνεται ένα δίκτυο αισθητήρων PZT που χρησιμοποιούνται σε τυπικές δοκιμές για την αξιολόγηση κολλητών ενώσεων και την εκτίμηση της εξέλιξης μιας ρωγμής σε μια επισκευή της μεταλλικής δομής με σύνθετο μάλωμα (doubler). Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι διαμοιρασμένοι γύρω από τη ρηγματωμένη δομή που παρακολουθείται και βρίσκονται ενσωματωμένοι σε ένα φίλμ

¹ Είναι ηχητικά κύματα (ταλαντώσεις) με υψηλές συχνότητες, μεγαλύτερες από το ακουστικό φάσμα (20 Hz έως 20 KHz)

² Είναι η ηλεκτρική ροή που αναπτύσσεται σε ένα αγωγίμο υλικό όταν αυτό εκτίθεται σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

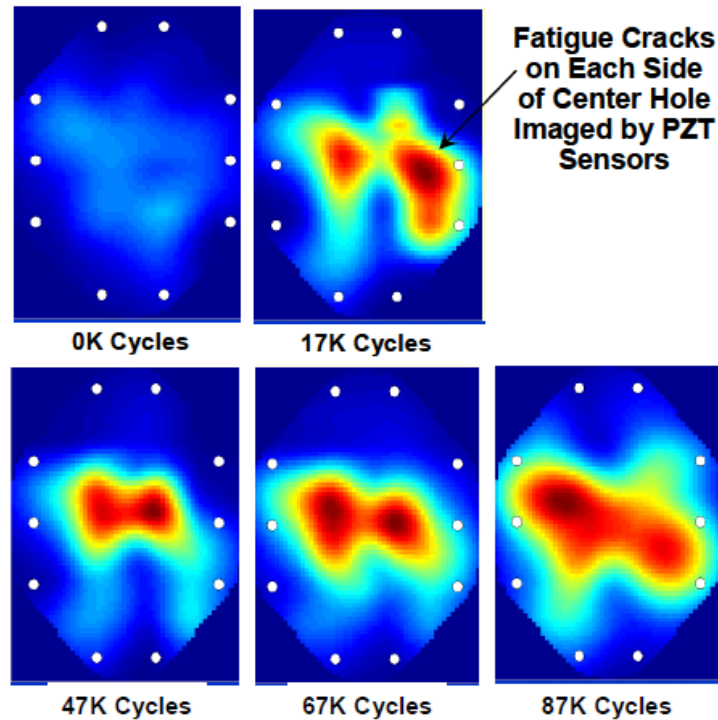
³ Ελαστικά είναι όλα τα ηχητικά κύματα που διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο (στερεό)

από πολυαμίδιο το οποίο επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση του δικτύου. Το δοκίμιο που περιέχει μια κεντρική ρωγμή και μηχανικές ατέλειες υπόκειται σε φορτίο κόπωσης σταθερού εύρους. Με διάφορους μεθόδους μελετάται η μετάδοση των ηχητικών κυμάτων καθώς αυτά ταξιδεύουν από κάθε ενεργό αισθητήρα προς τους υπόλοιπους δέκτες. Για να βελτιστοποιηθεί η ανίχνευση των ατελειών χρησιμοποιούνται διεγέρσεις διαφόρων συχνοτήτων από υπέρηχους 50 KHz έως 500 KHz . Η εξέλιξη της ρωγμής παρακολουθείται καλύτερα στη μέγιστη διέγερση των 500 KHz. Το σύνολο των δεχόμενων δεσμών σημάτων αναλύεται με ειδικά προγράμματα και κατόπιν προσδιορίζεται η παρουσία και η θέση των ατελειών με τη χρήση χρονικών στοιχείων και τριγωνομετρικών μεθόδων. Το τελικό στάδιο είναι η παραγωγή δισδιάστατης εικόνας των ατελειών και των ρωγμών λόγω κόπωσης.



Σχήμα 1-18: Σειτ πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για τη παρακολούθηση της διάδοσης ρωγμής και των ατελειών σε ένα σύνθετο μάλωμα κολλημένο σε μεταλλικό δίσκο [7]

Μια ομάδα από εικόνες που παράγονται από το PZT δίκτυο αναπαρίστανται στο Σχήμα 1-19. Η εξέλιξη της ρωγμής (δύο ρωγμές κόπωσης εκπορευόμενες από μια κεντρική οπή) φαίνεται καθαρά σε διάφορους κύκλους καταπόνησης κόπωσης. Τα δεδομένα της εξέλιξης αναλύονται περισσότερο για να παραχθούν προβλέψεις του μήκους της ρωγμής.



Σχήμα 1-19 : Έγχρωμες εικόνες προερχόμενες από δίκτυο PZT που δείχνουν την εξέλιξη των ρωγμών (εκατέρωθεν της κεντρικής οπής) με τους κύκλους κόπωσης [7]

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν επίσης να ρυθμιστούν για τη παρακολούθηση της εξέλιξης της ρωγμής και της διάβρωσης στις πολιτικές και αεροδιαστημικές δομές. Ειδικά οι FBG αισθητήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιοχές όπου η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ενοχλεί ή όπου και άλλοι παράμετροι είναι χρήσιμο να ελεγχθούν με τον ίδιο αισθητήρα (π.χ. ένταση ή θερμοκρασία). Η παρουσία της ρωγμής μπορεί να προσδιοριστεί παρακολουθώντας τις αλλαγές στη μεγέθυνση και τη φάση του επιστρεφόμενου φωτός στην οπτική ίνα.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που αφορά τις επισκευές ρηγματωμένων ελασμάτων με κόλληση σύνθετων και μεταλλικών επιθεμάτων

2.1 Σε επισκευές ρωγμών

Όταν ανιχνευθεί σημαντική υποβάθμιση στη δομή ενός αεροσκάφους το επόμενο βήμα είναι να κριθεί η ανάγκη για μια επισκευή. Χρειάζεται να παρθεί μια από τις ακόλουθες αποφάσεις [8] :

- Δεν χρειάζεται καμιά επισκευή
- Απαιτείται μια ελαφριά επισκευή (διακοσμητική ή στεγανοποίησης) για τη διόρθωση μικροβλαβών.
- Είναι απαραίτητη μια δομική επισκευή, εάν μπορεί αυτή να πραγματοποιηθεί, γιατί η αντοχή του δομικού στοιχείου έχει μειωθεί κάτω από τα σχεδιαστικά όρια ή είναι ενδεχόμενο να μειωθεί μέχρι την επόμενη συντήρηση.
- Η επισκευή δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα και το υποβαθμισμένο δομικό εξάρτημα θα αντικατασταθεί.

Υπάρχουν όμως και πρόσθετες σπουδαίες απαιτήσεις όσον αφορά την υλοποίηση μιας επισκευής [8]:

- Ο χρόνος παραμονής του αεροσκάφους στο έδαφος να είναι ο ελάχιστος
- Η χρησιμοποίηση υλικών τα οποία είναι διαθέσιμα άμεσα (χωρίς καθυστέρηση) και με δυνατότητα εύκολης αποθήκευσης
- Η ελαχιστοποίηση της υποβάθμισης ή βλάβης στη περιβάλλουσα περιοχή γύρω από τη βλάβη
- Να πραγματοποιείται μόνο με απλές διαδικασίες ή εξοπλισμό
- Η απομάκρυνση όσο το δυνατόν λιγότερου υγιούς υλικού

Γενικά το σχέδιο επισκευών για την δομική αποκατάσταση οφείλει να είναι το απλούστερο, να μην επηρεάζει αρνητικά την υπόλοιπη δομή και να επαναφέρει τη δομική ικανότητα στο απαιτούμενο επίπεδο. Δεν πρέπει να απεμπολεί άλλες

λειτουργίες του στοιχείου ή της κατασκευής όπως την ανοχή (διάκενο) στα κινούμενα εξαρτήματα, την αεροδυναμική ομαλότητα και την ισορροπία.

Οι επισκευές για την αποκατάσταση της δομικής ικανότητας χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: α) στις διαδικασίες που υλοποιούνται χωρίς επίθεμα (μπαλώμα) οι οποίες εφαρμόζονται σε δευτερεύοντες βλάβες, και β) στις διαδικασίες ενίσχυσης με χρήση μπαλώματος.

Οι επιθεματικές επισκευές επαναφέρουν ιδανικά τη διαδρομή φόρτισης που αδυνάτισε ή απομακρύνθηκε μέσω της βλάβης ή ρωγμής, χωρίς να αλλάζει σημαντικά η κατανομή του αρχικού φορτίου. Ενισχύσεις ή μπαλώματα χρησιμοποιούνται για να αναπληρώνουν τη χαμένη αντοχή ή δυσκαμψία (για παράδειγμα μετά την αφαίρεση της σκουριάς), να διορθώνουν σχεδιαστικά λάθη ή να βελτιώνουν τη λειτουργία και απόδοση. Οι επισκευές της δομής με χρήση επιθέματος που συνήθως προτείνονται από τους κατασκευαστές των αεροσκαφών, στα εγχειρίδια επισκευών τους, στηρίζονται, σε γενικές γραμμές, στη χρήση κοχλιωτών ή ηλωτών μεταλλικών ελασμάτων παρόμοιου κράματος με το αρχικό υλικό.

Οι επισκευές χωρίς επιθέματα για περιπτώσεις διάβρωσης, όπως η δημιουργία κρατήρων και οι απολεπίσεις στο αλουμινένιο πλαίσιο του αεροσκάφους, γενικά περιλαμβάνουν την αφαίρεση της ορατής βλάβης με τρόχισμα ακολουθούμενο από ακριβή αφαίρεση υλικού για να διασφαλισθεί ότι απομακρύνθηκε όλη η σκουριά. Έπειτα η περιοχή υποβάλλεται σε βελτιωτική επεξεργασία, ασταρώνεται και βάφεται. Σε περίπτωση σοβαρών διαβρώσεων, το πάχος του υλικού μπορεί να έχει μειωθεί κάτω από την επιτρεπόμενη τιμή (σύμφωνα με το εγχειρίδιο επισκευών) και πρέπει να ενισχυθεί για να γίνει κατάλληλο για πτήση.

Οι απλές επισκευές ρωγμών χωρίς επιθέματα περιλαμβάνουν μια διαδικασία που ονομάζεται «διάτρηση τερματισμού ρωγμής» (stop drilling). Κατ' αυτήν δημιουργείται μια μικρή οπή στην κορυφή της ρωγμής για τη παρεμπόδιση της διάδοσής της. Αυτό είναι, όμως, προσωρινό και σχετικά αναποτελεσματικό μέτρο, εφόσον είναι δύσκολο να βρεθεί η κορυφή της ρωγμής. Ακόμα κι αν βρεθεί, όμως, συνήθως η ρωγμή ξαναρχίζει να διαδίδεται πολύ σύντομα μετά την οπή τερματισμού λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων που συσχετίζονται με τη κόψη της ρωγμής.

Μια πολύ ανώτερη προσέγγιση είναι η διάνοιξη οπής τερματισμού και έπειτα η επέκτασή της, για να αναπτυχθούν θλιπτικές τάσεις που μειώνουν ή εμποδίζουν το άνοιγμα της ρωγμής. Αυτή η προσέγγιση είναι συχνά πολύ αποτελεσματική για να

σταματήσει την επέκταση της ρωγμής, όμως δεν ανήκει στη φιλοσοφία της «ανοχής σε βλάβη» γιατί όταν η ρωγμή τελικά επεκταθεί μέσα στη θλιπτική ζώνη η διάδοσή της γίνεται ασταθής και ταχεία χωρίς να μπορεί να ελεγχθεί.

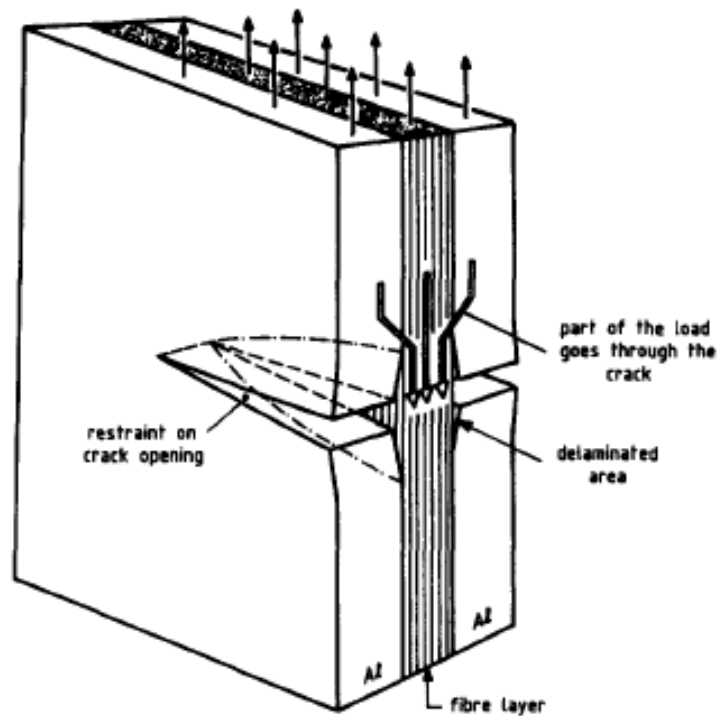
2.1.1 Σύγκριση σύνθετων και μεταλλικών επιθεμάτων

Τα σύνθετα επιθέματα από ίνες άνθρακα ή βορίου σε εποξειδική ρητίνη [graphite/epoxy (gr/ep) και boron/epoxy (b/ep)] παρουσιάζουν κατά τη χρήση τους υψηλή απόδοση και τα πλεονεκτήματά τους, όταν συγκρίνονται με τα επιθέματα από μεταλλικά κράματα, περιλαμβάνουν [8]:

- Υψηλής κατευθυντικότητας δυσκαμψία, η οποία επιτρέπει τη χρήση λεπτού επιθέματος (σημαντικό για εξωτερικές επισκευές) και επιτρέπει να εφαρμοστεί η ενίσχυση μόνο στα επιθυμητά σημεία.
- Υψηλή αντοχή και διάρκεια ζωής σε συνθήκες κόπωσης, το οποίο ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο να αστοχήσει το επίθεμα ακόμα και σε αρκετά υψηλά επίπεδα ελαστικών τάσεων στην αρχική μεταλλική κατασκευή.
- Χαμηλή πυκνότητα.
- Ευελιξία που επιτρέπει την χαμηλού κόστους κατασκευή των επιθεμάτων με πολύπλοκα σχήματα.

Η προεπεξεργασία της επιφάνειας του ελάσματος πριν κολληθούν τα σύνθετα επιθέματα (με θερμοσκληρυνόμενες μήτρες) είναι πολύ λιγότερο επίπονη από αυτή που απαιτούν τα μεταλλικά επιθέματα.

Το κύριο μειονέκτημα της χρήσης αυτών των σύνθετων επιθεμάτων προκύπτει από τον αταίριαστο θερμικό συντελεστή διαστολής μεταξύ του σύνθετου υλικού και του μετάλλου. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες παραμένουσες τάσεις (εφελκυστικές στο μέταλλο και θλιπτικές στο σύνθετο) μετά την κόλληση. Τα τελευταία χρόνια αυτό έχει λυθεί με την ανάπτυξη των επιθεμάτων GLARE® για επισκευές σε λεπτές δομές της ατράκτου. Το GLARE® είναι πολυστρωματικό υλικό αποτελούμενο από στρώσεις κράματος αλουμινίου με ενδιάμεσες στρώσεις εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένης με ίνες γυαλιού. Το GLARE® έχει περίπου την ίδια θερμική διαστολή με το αλουμίνιο και συγχρόνως παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στη διάδοση ρωγμών σε σχέση με τα απλά αλουμινένια επιθέματα. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του ότι οι ίνες γυαλιού γεφυρώνουν τις δύο επιφάνειες της ρωγμής με αποτέλεσμα το μικρότερο άνοιγμα της ρωγμής (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-1: Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της γεφύρωσης της ρωγμής από τις ίνες γυαλιού του επιθέματος GLARE®

2.1.2 Οι εφαρμογές των επισκευών με σύνθετα υλικά

Οι επισκευές με κολλημένα σύνθετα υλικά θεωρούνται ως ευέλικτες και χαμηλού κόστους μέθοδοι για την επισκευή, την αύξηση αντοχής ή την αναβάθμιση ανεπαρκών μεταλλικών κατασκευών.

Οι δυναμικές εφαρμογές χρήσης των κολλητών σύνθετων επιθεμάτων συνοψίζονται ως εξής [8]:

1. Εφαρμογές για τη μείωση των συντελεστών έντασης των τάσεων:
 - σε περιοχές με ρωγμές λόγω κόπωσης
 - σε περιοχές με ρωγμές λόγω διάβρωσης υπό φορτίο
 - για να αυξηθεί η ανοχή στη βλάβη (παρέχει χαρακτηριστικά αργής εξέλιξης της ρωγμής) σε κατασκευές που σχεδιάστηκαν με την προσέγγιση της ασφαλούς διάρκειας ζωής ή σε κατασκευές με πολλαπλή βλάβη

2. Για την επαναφορά της αντοχής και της δυσκαμψίας:
 - μετά από αποκατάσταση βλάβης διάβρωσης ή οποία έφθειρε το στοιχείο κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια
 - μετά από αφαίρεση ατελειών
 - μετά από επαναδιαμόρφωση (μορφοποίηση) περιοχής για την ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης των τάσεων
 - μετά από βλάβη λόγω θερμότητας
 - μετά από αστοχία μιας διαδρομής φορτίου σε μια κατασκευή με πολλαπλές διαδρομές φόρτισης

3. Για την αύξηση της δυσκαμψίας μη καλώς σχεδιασμένων περιοχών:
 - για να μειωθεί η συγκέντρωση των τάσεων
 - για να μειωθεί η δευτερεύουσα κάμψη
 - για να μειωθούν οι ταλαντώσεις (δονήσεις)

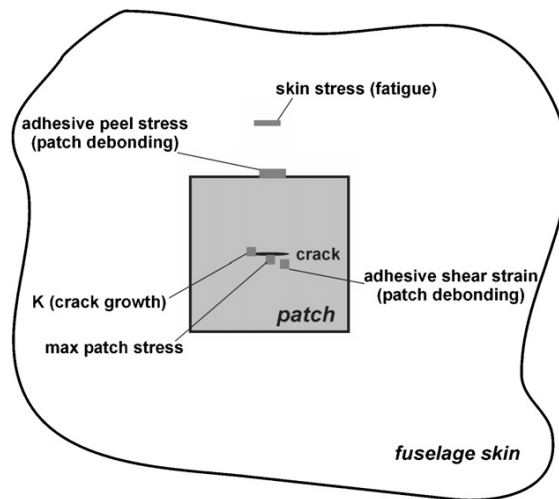
2.2 Βελτίωση επισκευών ρηγματωμένων δομικών στοιχείων στις αεροκατασκευές.

Για να βελτιωθεί η διαδικασία συντήρησης των αεροκατασκευών, ένας καλός τρόπος είναι να βελτιωθούν οι υπάρχουσες τεχνικές στην επισκευή και επιδιόρθωση βλαβών και να αναπτυχθούν νέες. Τα σύνθετα επιθέματα που ενώνονται με κόλληση έχουν εδραιωθεί σαν οι περισσότερο αποτελεσματικές μέθοδοι επιδιόρθωσης ρηγματωμένων ή διαβρωμένων αεροδομών και προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα πάνω από τη παραδοσιακή μέθοδο των μηχανικά στερεωμένων επιθεμάτων (με συνδέσμους) που περιλαμβάνει βελτιωμένη συμπεριφορά στη καταπόνηση σε κόπωση, αντίσταση στη διάβρωση και ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης τάσεων [9].

Αν και οι εφαρμογές επιδιορθώσεων με κόλληση σύνθετων ξεκίνησαν πριν 30 χρόνια από την Βασιλική Πολεμική Αεροπορία της Αυστραλίας, ακόμη και σήμερα αυτές οι επισκευές είναι πιστοποιημένες για χρήση μόνο σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία του πλαισίου. Για να επεκταθεί η χρήση τους και στα πρωτεύοντα στοιχεία της δομής χρειάζεται μια λεπτομερειακή γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς υπό την

επίδραση διαφόρων συνθηκών φόρτισης. Στη παρούσα χρονική περίοδο το καθήκον αυτό πραγματοποιείται με πειραματικά προγράμματα πολύ δαπανηρά και χρονοβόρα από τις αεροπορικές εταιρείες και ερευνητικά ινστιτούτα. *Η αριθμητική ανάλυση είναι ένα δυναμικό εργαλείο που παρέχει πολύ χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τη μηχανική επίδοση των επισκευών με κολλητές ενώσεις.* Τα αριθμητικά μοντέλα μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο για υπολογισμό του πεδίου τάσεων των επισκευών και για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του επιθέματος (μπαλώματος) σχετικά με τη μείωση του συντελεστή SIF. *Ένας ενδιαφέροντας τομέας που έχει παραβλεφθεί είναι η ανάλυση σφαλμάτων των επισκευών.* Σχεδιάσεις που αγνοούν βεβαιωμένους κρίσιμους τρόπους αστοχίας μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερη βλάβη από την πρωταρχική βλάβη που σκοπεύουν να επιδιορθώσουν [9].

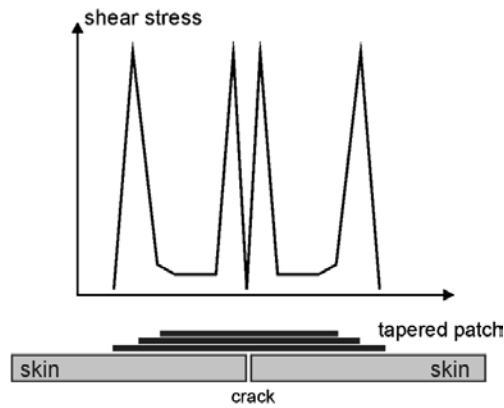
Το Σχήμα 2-2 απεικονίζει τους τρόπους αστοχίας που μπορούν να συμβούν σε μια κόλληση ενός ρηγματωμένου δομικού στοιχείου της ατράκτου [10]. Αυτοί είναι η αύξηση της ρωγμής, η αποκόλληση του μπαλώματος και δημιουργία νέων ρωγμών κόπωσης προς τα άκρα του επιθέματος. Οι σημαντικότεροι τρόποι είναι η αστοχία λόγω αύξησης της ρωγμής και λόγω αποκόλλησης του επιθέματος. Η αποκόλληση αυξάνει τη δυνατότητα εξέλιξης της ρωγμής στο επισκευασμένο τμήμα της δομής επειδή μειώνεται η ενεργή δραστική επιφάνεια του μπαλώματος και δια μέσου αυτής μειώνεται και η ποσότητα των τάσεων που μεταφέρονται από το ρηγματωμένο δομικό στοιχείο στο μάλωμα. Η αποκόλληση του επιθέματος με μηχανική ώθηση μπορεί να προκληθεί εξ' αιτίας υψηλών διατμητικών τάσεων ή υψηλών τάσεων ξεφλουδίσματος.



Σχήμα 2-2: Σχηματική των τρόπων αστοχίας που συμβαίνουν σε μια συγκολλητή επισκευή με επίθεμα ενός ρηγματωμένου τμήματος ατράκτου [10]

Στο Σχήμα 2-3 φαίνεται μια αναπαράσταση της κατανομής των διατμητικών τάσεων σε μια επισκευή κόλλησης στο φλοιό (skin). Οι τάσεις μεγιστοποιούνται σε κάθε πλευρά της ρωγμής και στα άκρα του μπαλώματος (tapered patch). Μια κοινή πρακτική για να μειωθούν οι τάσεις στα άκρα είναι η κωνική λέπτυνση των άκρων του επιθέματος.

Μέχρι σήμερα μόνο λίγες εργασίες έχουν μελετήσει την αποκόλληση σύνθετων μπαλωμάτων σε επισκευές με κόλληση. Ο Naboulsi και οι συνεργάτες του σε μια σειρά από άρθρα [11 – 13] χρησιμοποίησε την τεχνική τριών επιπέδων (δισδιάστατο μοντέλο FE συνιστάμενο από τρία επίπεδα) συνοδευόμενη με πειράματα για να διερευνήσουν τις επιδράσεις προϋπαρχουσών αποκολλήσεων διαφόρων μεγεθών και σε διαφορετικές θέσεις στην διάδοση της ρωγμής κόπωσης καθώς και στη διάρκεια ζωής των επισκευασμένων ρηγματωμένων δομών.



Σχήμα 2-3: Κατανομή των διατμητικών τάσεων σε μια επισκευή ρωγμής με συγκόλληση επιθέματος [10]

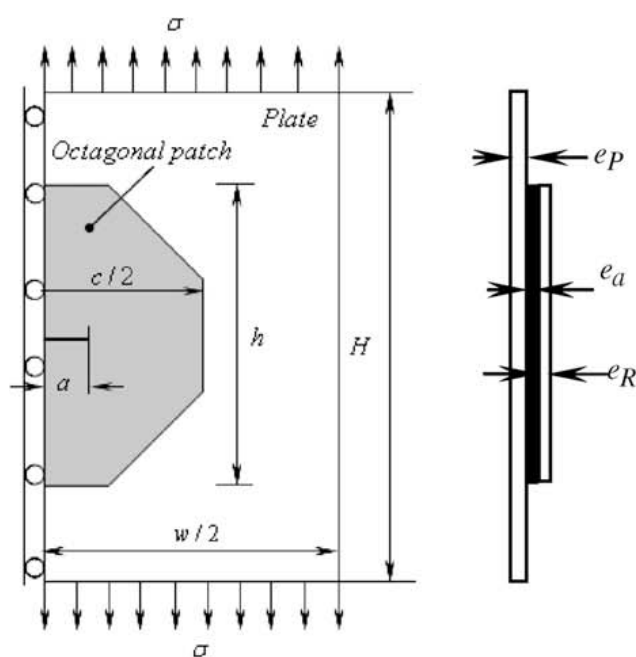
Τα αποτελέσματα της έρευνας τους έδειξαν μια ξεκάθαρη διακύμανση στη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης και στους συντελεστές SIF όταν μετέβαλλαν τη θέση και το μέγεθος της αποκόλλησης. Πρόσφατα οι Megueni et al. [14] και Ouinas et al. [15] χρησιμοποίησαν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FE) για να μετρήσουν το συντελεστή SIF σε ρωγμές οι οποίες είχαν επιδιορθωθεί με κόλληση σύνθετων επιθεμάτων και λαμβάνοντας υπόψη προϋπάρχουσα αποκόλληση. Επίσης ανακάλυψαν ότι η εμφάνιση αποκόλλησης αυξάνει σημαντικά τους συντελεστές SIF και συνεπώς επιδρά βαρυσήμαντα στη δραστικότητα (αποτελεσματικότητα) των επισκευών. Έχοντας εξακριβώσει τη σπουδαιότητα της αποκόλλησης του μπαλώματος το επόμενο βήμα είναι να βελτιωθούν οι επισκευές ώστε να αποφεύγονται οι αποκολλήσεις. Χρειάζεται να συλλεχθούν πληροφορίες για την έναρξη της αποκόλλησης, τον τρόπο που διαδίδεται και πως μερικά ειδικά χαρακτηριστικά της κόλλησης όπως η γεωμετρία και τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί μπορούν να επιδράσουν [10].

2.3 Η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην αντοχή μιας επισκευασμένης ρωγμής

Οι Ouinas et al. [16] πειραματίστηκαν με ένα ακόμη διαφορετικό από τα παραπάνω μοντέλο. Σ' αυτό το πείραμα εξετάστηκε ένα λεπτό έλασμα (δίσκο) από αλουμίνιο με τις ακόλουθες διαστάσεις: μήκος $H_p=203,2$ mm, πλάτος $w_p=152,4$ mm και πάχος $e_p=1$ mm. Θεωρήθηκε ότι το έλασμα έχει μια ρωγμή μήκους $2a=20$ mm

κάθετη στο φορτίο. Μετά το έλασμα υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό $\sigma = 120$ MPa. Η ρωγή επισκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα κολλητό μάλωμα από βόριο σε εποξειδική ρητίνη (b/ep), το οποίο θεωρείται σαν ένα ορθότροπο υλικό, έχοντας τις ακόλουθες διαστάσεις: $c=h=60$ mm και πάχος $e_R = 1$ mm (Σχήμα 2-4).

Οι ιδιότητες του υλικού του επιθέματος είναι: μέτρο ελαστικότητας E_R και λόγος ν_R . Οι ιδιότητες της κόλλας είναι: μέτρο διάτμησης G_a και το πάχος του στρώματος κόλλας $e_a = 0,127$ mm. Εξ' αιτίας της συμμετρίας του γεωμετρικού σχήματος της πλάκας και της φόρτισης, ήταν αρκετό να εξετασθεί η μισή δομή της πλάκας.

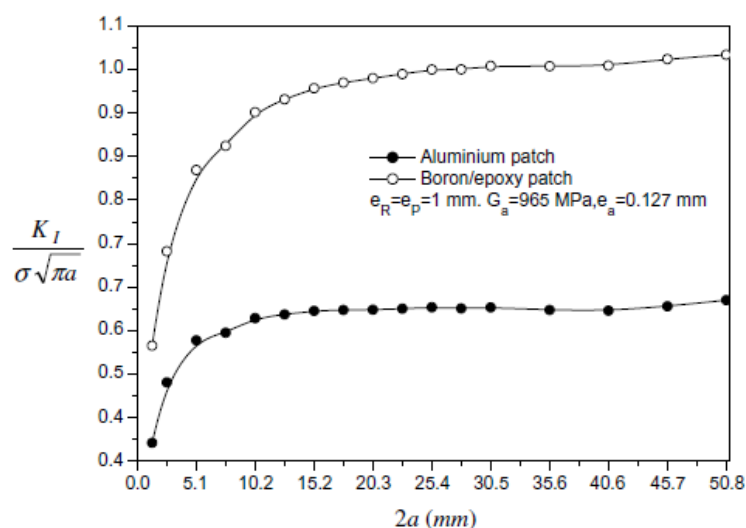


Σχήμα 2-4: Γεωμετρικό μοντέλο [16]

Για την αριθμητική μοντελοποίηση του πειράματος οι Ouinas et al. [16] χρησιμοποίησαν ένα κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για δισδιάστατη δομή με ονομασία FRANC2D/L. Παρακάτω θα αναφέρω τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του πειράματος αυτού όσο αφορά την επίδραση του μάλωματος και της κόλλας στην αποτελεσματικότητα της επισκευής του ρηγματωμένου στοιχείου, γιατί είναι χρήσιμα και για τη δική μου αριθμητική ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί στα επόμενα κεφάλαια αυτής της διπλωματικής.

2.3.1 Η επίδραση του υλικού του μπαλώματος

Η δυσκαμψία του μπαλώματος, το μέγεθος της συνδεόμενης επιφάνειας και η αντίσταση του υλικού της κόλας επιδρούν στις παραμέτρους θραύσης. Επίσης τα υλικά των επιθεμάτων επηρεάζουν αμέσως την διακύμανση των συντελεστών SIF. Για να αναδειχθεί η διαδικασία της επισκευής μιας κεντρικής ρωγμής επιλέχθηκαν δύο μπαλώματα που έχουν το ίδιο γεωμετρικό σχήμα, αλλά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η ανάλυση συνίσταται στη μεταβολή του μήκους της επισκευασμένης ρωγμής ενώ συγχρόνως διατηρούνται τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά του ελάσματος και του μπαλώματος. Το Σχήμα 2-5 απεικονίζει την επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων του μπαλώματος στη διακύμανση του συντελεστή SIF. Για μικρά μήκη ρωγμών ($2a=10$ χιλ.) ο SIF αυξάνει ταχέως. Για τιμές πάνω από αυτό το μήκος ο SIF συγκλίνει προς μια σταθερή τιμή. Η σύγκλιση αυτή όμως είναι ταχύτερη για ένα μεταλλικό μπάλωμα.



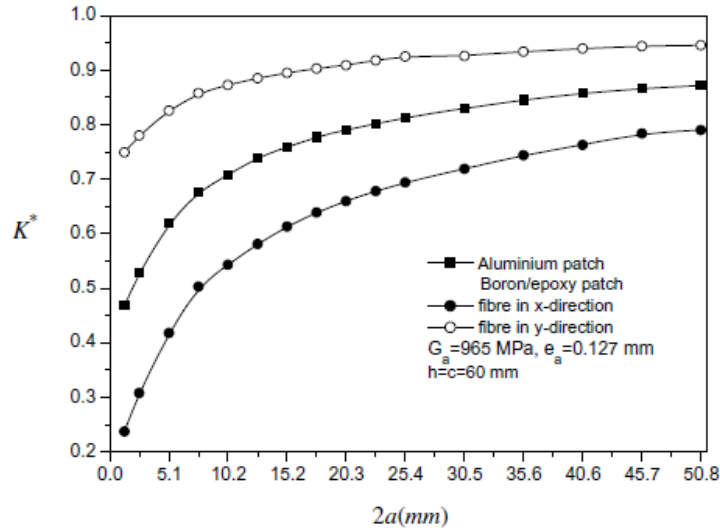
Σχήμα 2-5: Επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών του επιθέματος στη διακύμανση του SIF [16]

Στο Σχήμα 2-6 αναπαριστάται η αυξομείωση ενός αδιάστατου συντελεστή K^* (που εκφράζει την ελάττωση του συντελεστή SIF) σε αντιδιαστολή με το μήκος της ρωγμής. Αυτός ο συντελεστής ορίζεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$K^* = 1 - \frac{K_p}{K_u}$$

Όπου K_p είναι ο SIF για τον επισκευασμένο με μπάλωμα δίσκο και K_u ο SIF για το δίσκο χωρίς μπάλωμα. Ο K^* είναι ένας αδιάστατος αριθμός που εκφράζει την ελάττωση του συντελεστή SIF που γίνεται στην επισκευασμένη πλάκα σε σχέση με την ανεπισκευάστη (διαφορά του μειωμένου συντελεστή SIF στην επισκευασμένη πλάκα από τον αντίστοιχο SIF της πλάκας χωρίς επίθεμα). Το Σχήμα 2-6 δείχνει ότι το επίθεμα μειώνει πάρα πολύ την εξέλιξη της ρωγμής. Κάνοντας μια σύγκριση με την μη επισκευασμένη ρηγματωμένη πλάκα, η ελάττωση του SIF της μπαλωμένης ρωγμής, σε καταπόνηση mode I, με χρήση μεταλλικού μπαλώματος, ποικίλει από 46% έως 89%. Όμως στη περίπτωση της χρησιμοποίησης μπαλώματος b/ep, το ποσοστό μείωσης του SIF εξαρτάται από τον προσανατολισμό (διεύθυνση) των ινών του σε σχέση με τη ρωγμή.

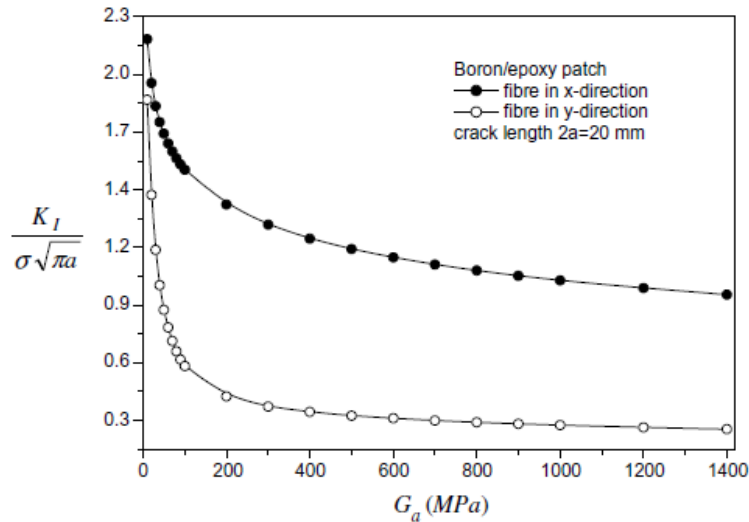
Η πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε συνίσταται στη κόλληση ενός επιθέματος προσανατολισμένου ώστε οι ίνες του να είναι παράλληλες στη ρωγμή (στη διεύθυνση κατά X). Στη δεύτερη περίπτωση αυτές οι ίνες είναι κάθετες (κατά Y διεύθυνση) στη διεύθυνση της ρωγμής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 2-6. Όταν οι ίνες του σύνθετου επιθέματος b/ep προσανατολίζονται κατά Y- διεύθυνση, η καμπύλη του συντελεστή SIF της επισκευασμένης ρωγμής συγκλίνει γρήγορα σε σύγκριση με την καμπύλη των μεταλλικών επιθεμάτων και των σύνθετων στα οποία οι ίνες είναι προσανατολισμένες στη X-διεύθυνση. Η μείωση του SIF γίνεται πολύ καλύτερα όταν ο προσανατολισμός των ινών είναι κάθετος (διεύθυνση Y) στην προώθηση της ρωγμής. Η μέγιστη μείωση του SIF όταν το σύνθετο υλικό είναι προσανατολισμένο κατά Y είναι περίπου 30% μεγαλύτερη σε σχέση με το μεταλλικό επίθεμα. Και διπλασιάζεται (η μείωση του SIF) σε σχέση με το σύνθετο επίθεμα που έχει προσανατολισμό ινών κατά X διεύθυνση. Ο συντελεστής SIF παίρνει μια ασύμπτωτη τιμή κλιμακούμενη βαθμιαία με την εξέλιξη της ρωγμής.



Σχήμα 2-6: Μείωση του SIF μιας επισκευασμένης ρωγμής και επίδραση του προσανατολισμού των ινών ενός επιθέματος, σε φόρτιση mode I [16]

2.3.2 Η επίδραση του μέτρου διάτμησης G_a της κόλλας

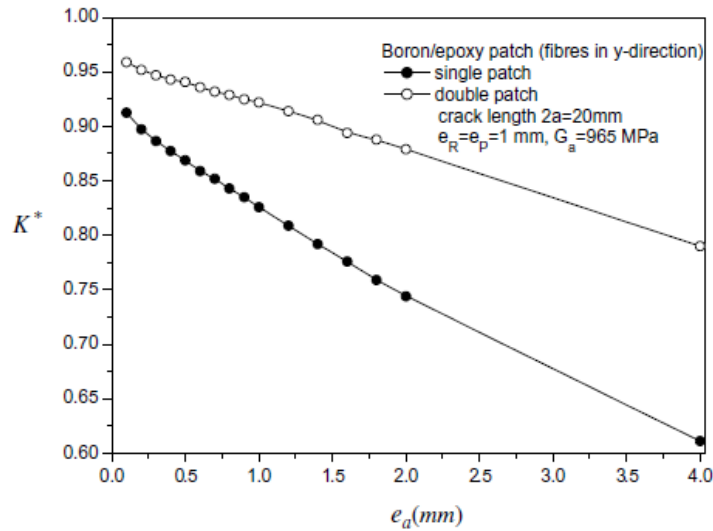
Στην επισκευές των ρωγμών ο σκοπός είναι να μεταφερθούν οι περισσότερες τάσεις προς την κόλλα και συνέχεια στο μάλωμα για να μειωθεί η ελαστική ενέργεια στη κορυφή (άκρη) της ρωγμής. Θεωρητικά είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν κόλλες που κατέχουν ένα υψηλό μέτρο διάτμησης για την επισκευή των ρωγμών ή ατελειών. Το Σχήμα 2-7 δείχνει την διακύμανση του συντελεστή SIF σαν συνάρτηση του μέτρου διάτμησης της κόλλας. Η μείωση του SIF είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την αύξηση του μέτρου διάτμησης της κόλλας. Η ελάττωση του SIF έχει την τάση να ακυρώνεται όταν η παράμετρος G_a αυξάνεται απεριόριστα.



Σχήμα 2-7: Η διακύμανση του SIF σε αντιπαράβολή με το μέτρο διάτμησης της κόλλας [16]

2.3.3 Η επίδραση του πάχους του στρώματος κόλλας

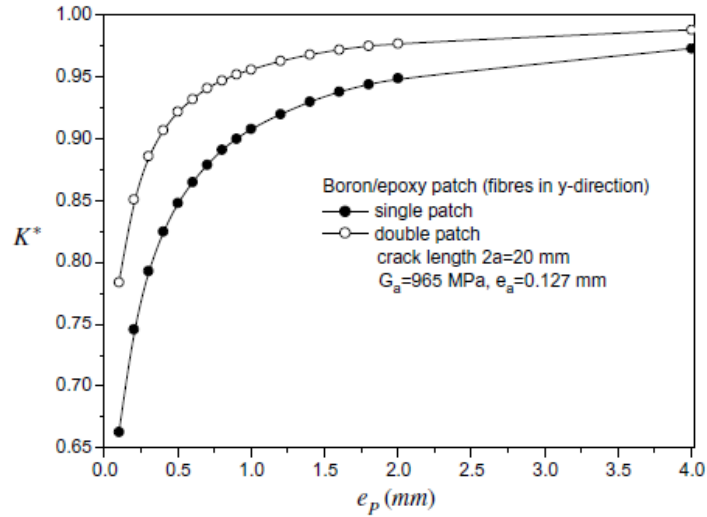
Η επίδραση του πάχους του στρώματος της κόλλας παίζει καθοριστικό ρόλο στη σταθερότητα των ρωγμών που είναι ενισχυμένες με μπάλωμα. Στο Σχήμα 2-8 φαίνεται η μείωση του συντελεστού SIF ως συνάρτηση του πάχους της κόλλας e_a για μονό και διπλό μπάλωμα και για συγκεκριμένο μήκος ρωγμής 20 mm, . Η διαδικασία μείωσης του πάχους της κόλλας επιφέρει την ελάττωση της τιμής του SIF, που σημαίνει ότι το μικρό πάχος στρώματος κόλλας αποτελεί επιθυμητή λύση στην επιδιόρθωση των ρωγμών. Ένα μεγάλο πάχος κόλλας ενισχύει τη πρόσφυση αλλά μικραίνει την ικανότητα του μπαλώματος για απορρόφηση των τάσεων. Στο Σχήμα 2-8 η καμπύλη του συντελεστή μείωσης (K^*) ελαττώνεται γραμμικά με την αύξηση του πάχους. Από μια πλευρά η μείωση του πάχους συνεπάγεται τη γρήγορη σύγκλιση του SIF. Από την άλλη πλευρά, ένα μικρό πάχος αυξάνει τη μεταβίβαση του φορτίου προς το μπάλωμα αλλά αυξάνει και το ρίσκο να υποστεί θραύση το στρώμα της κόλλησης. Όταν το πάχος του στρώματος κόλλας είναι $e_a=2$ mm, η επιτευχθείσα μείωση του SIF είναι της τάξης του 78% και 87% με τη χρήση ενός απλού και ενός διπλού μπαλώματος αντίστοιχα (ίνες κατά Y διεύθυνση). Αυτή η μείωση ξεπερνά το ποσοστό 85% όταν το πάχος κόλλας είναι μικρότερο από 0,5 mm ($e_a \leq 0,5$ mm).



Σχήμα 2-8: Επίδραση του πάχους της κόλλας στη διακύμανση του SIF [16]

2.3.4 Επίδραση του πάχους του μπαλώματος στις παραμέτρους της θραύσης

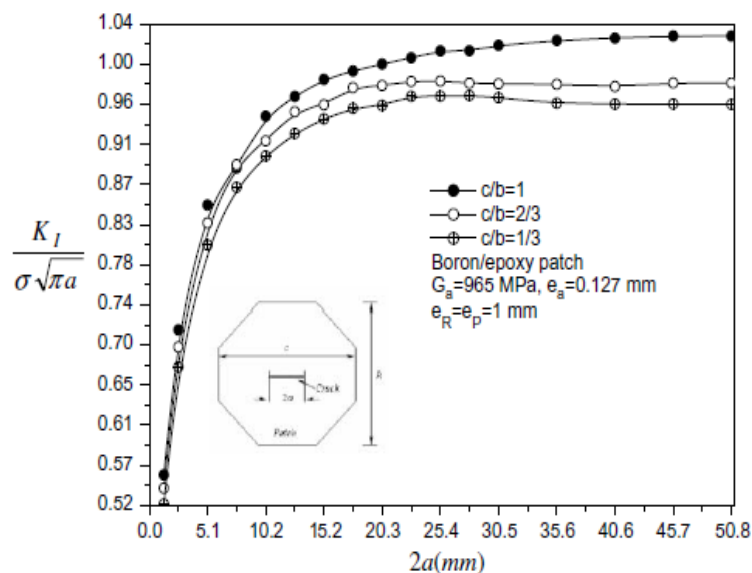
Το Σχήμα 2-9 δείχνει την επίδραση του πάχους του μπαλώματος στη διακύμανση του SIF σε ρωγμή που έχει επισκευασθεί με ένα απλό και με ένα διπλό μπάλωμα. Παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους του μπαλώματος μειώνει το συντελεστή SIF με αναλογικό τρόπο. Το διπλό μπάλωμα επιτρέπει καλύτερη μεταφορά των φορτίων που μεταφέρονται από τη ρωγμή σε σχέση με το απλό μπάλωμα. Το ποσοστό της μείωσης του SIF εξαρτάται όχι μόνο από το πάχος, αλλά και από τη φύση του μπαλώματος. Παρατηρούμε πως για πάχος μπαλώματος μικρότερο από 1,5 mm, προκύπτει μια μεγάλη μείωση στον SIF. Πάνω από αυτή τη τιμή, ο SIF φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητος από το πάχος του επιθέματος [16].



Σχήμα 2-9: Επίδραση του πάχους του επιθέματος στη διακύμανση του SIF [16]

2.3.5 Επίδραση της γεωμετρίας του μπαλώματος

Η γεωμετρία του μπαλώματος παίζει σπουδαίο ρόλο στη διακύμανση του SIF. Για να μελετηθεί η διαδικασία της επισκευής μιας κεντρικής ρωγμής με μήκος $2a$ επιλέχθηκαν τρία οκταγωνικά μπαλώματα με διαφορετικές γεωμετρικές μορφές. Το Σχήμα 2-10 απεικονίζει την γεωμετρική επίδραση του μπαλώματος στην διακύμανση του SIF. Οι καμπύλες του SIF αντιστοιχούν στα διάφορα μεγέθη των οκταγωνικών επιθεμάτων. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μικρά μήκη ρωγμών ($2a < 10$ mm) η διαφορά των τιμών SIF είναι σχεδόν μηδέν. Για μήκη ρωγμής $2a \geq 10$ mm η διαφορά εκτείνεται με την αύξηση του μεγέθους της ρωγμής. Τα αποκτηθέντα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο SIF στη κορυφή μιας επισκευασμένης ρωγμής με ένα μάλωμα ύψους $h = 2c/3$ μειώνεται κατά 5% σε σχέση με το επισκευασμένο με ένα οκταγωνικό μάλωμα μεγέθους c . Για ένα μάλωμα ύψους $h = c/3$ η ανώτατη ελάττωση είναι της τάξης του 7%.



Σχήμα 2-10: Επίδραση του μεγέθους του επιθέματος στη διακύμανση του SIF [16]

2.4 Άλλες πειραματικές μελέτες

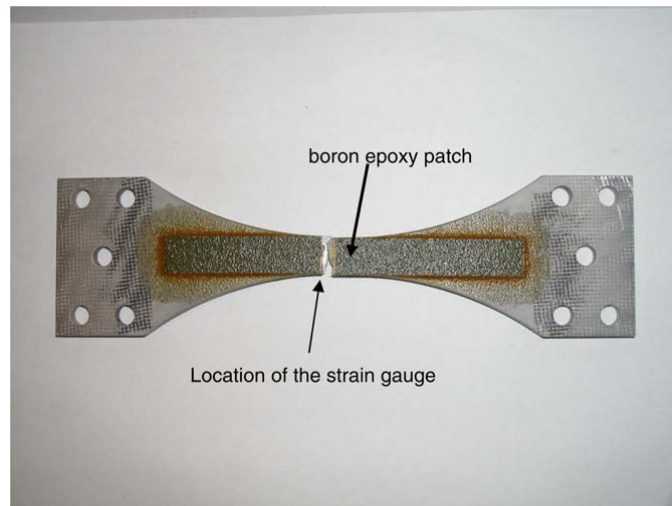
Ο αναλυτικός προσδιορισμός του συντελεστή SIF επιτυγχάνεται συνήθως με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το τρέξιμο διαφορετικών προσομοιώσεων μας επιτρέπει να αναλύσουμε την επίδραση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν αυτόν τον συντελεστή, όπως το μέγεθος και τις φυσικές ιδιότητες του στρώματος κόλλας, του μπαλώματος και του ελάσματος.

Οι Madani et al. (17) σε μελέτη τους το 2008 ανέλυσαν, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, τις απλές και διπλής όψης επισκευές με σύνθετα μπαλώματα που είχαν σχεδιασθεί να μειώσουν τη συγκέντρωση των τάσεων σε κυκλικές εγχοπές και ρωγμές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει μια σημαντική ελάττωση στην ασύμπτωτη τιμή των συντελεστών SIF και στις ορθές τάσεις στη κορυφή της ρωγμής. Η χρήση διπλού επιθέματος (και από τις δύο πλευρές του μεταλλικού στοιχείου της ατράκτου) υποβιβάζει το φαινόμενο της δευτερεύουσας κάμψης που οφείλεται στην εκκεντρότητα του απλού επιθέματος, που είναι κολλημένο μόνο στη μια πλευρά, και μειώνει τις διατμητικές τάσεις στο στρώμα της κόλλας.

Σε δική τους παρόμοια έρευνα το 2008 οι Ait Yala και Megueni [18] διερεύνησαν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων με σκοπό να πετύχουν βελτιστοποίηση της

λειτουργίας της επισκευής σε συνθήκες φόρτισης mode I. Κατάφεραν να προσδιορίσουν ποιες απ' αυτές τις παραμέτρους είναι πιο αποτελεσματικές για να πετύχουν το σκοπό τους και ποιες απ' αυτές θα έπρεπε να προσαρμοστούν για να βελτιωθεί η ποιότητα του μπαλώματος. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μια ασφαλής και ρεαλιστική τιμή για τον συντελεστή K είναι γύρω στα $8,38 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. Επίσης ότι οι βέλτιστες τιμές για το πάχος του σύνθετου μπαλώματος είναι 2 mm , για το πάχος της κόλλας $0,051 \text{ mm}$ και για το μέτρο διάτμησης της κόλλας είναι 550 MPa .

Ο Jones [19] το 2008 έδειξε ότι οι δημοσιευμένες προσεγγιστικές δισδιάστατες λύσεις για τον συντελεστή SIF, οι οποίες συσχετίζονται με ρηγματωμένα επίπεδα ελάσματα που είναι επισκευασμένα εξωτερικά με τη χρήση ενός σύνθετου μπαλώματος, είναι ασυνεπείς με τα πειραματικά δεδομένα, και ότι η επίδραση της γεφύρωσης των ινών του επιθέματος είναι συχνά δευτερεύουσας σημασίας για μικρές μέχρι μεσαίου μεγέθους ρωγμές (από $0,1$ έως 20 mm). Αυτή η ασυνέπεια της θεωρητικής δισδιάστατης προσομοίωσης με τις πειραματικές μελέτες οφείλεται στη τρισδιάστατη φύση του πεδίου τάσεων στο μάλωμα και στη συσσωρευθείσα βλάβη κόπωσης στη κόλλα κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης είναι ότι η πρόβλεψη της επίδρασης μιας σύνθετης επισκευής στη δομική ακεραιότητα των ρηγματωμένων στοιχείων που είναι επισκευασμένα με ένα εξωτερικό σύνθετο υλικό απλοποιείται εντυπωσιακά. Επίσης ο Jones αποδεικνύει ότι οι δομές που επισκευάζονται με μπαλώματα από GLARE αποδίδουν καλύτερα σε καταπόνηση κόπωσης από τις επισκευασμένες δομές που χρησιμοποιούν μπαλώματα από b/ep ή gr/ep (ανθρακονήματα). Τυπικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11. Σ' αυτό φαίνεται η μορφή του δοκιμίου, το κολλημένο επίθεμα από B/ep για την επισκευή του, καθώς και η θέση ενός μετρητή τάσης (strain gauge) που συνδέθηκε στο πλάι του δοκιμίου για να μπορεί να μετρηθεί η πραγματική τάση ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις με το θεωρητικό δισδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 2-11: Αστοχία δοκιμίου με κολλημένο επίθεμα από Βόριο [19]

3 Μοντελοποίηση του ρηγματωμένου δίσκου & του επιθέματος

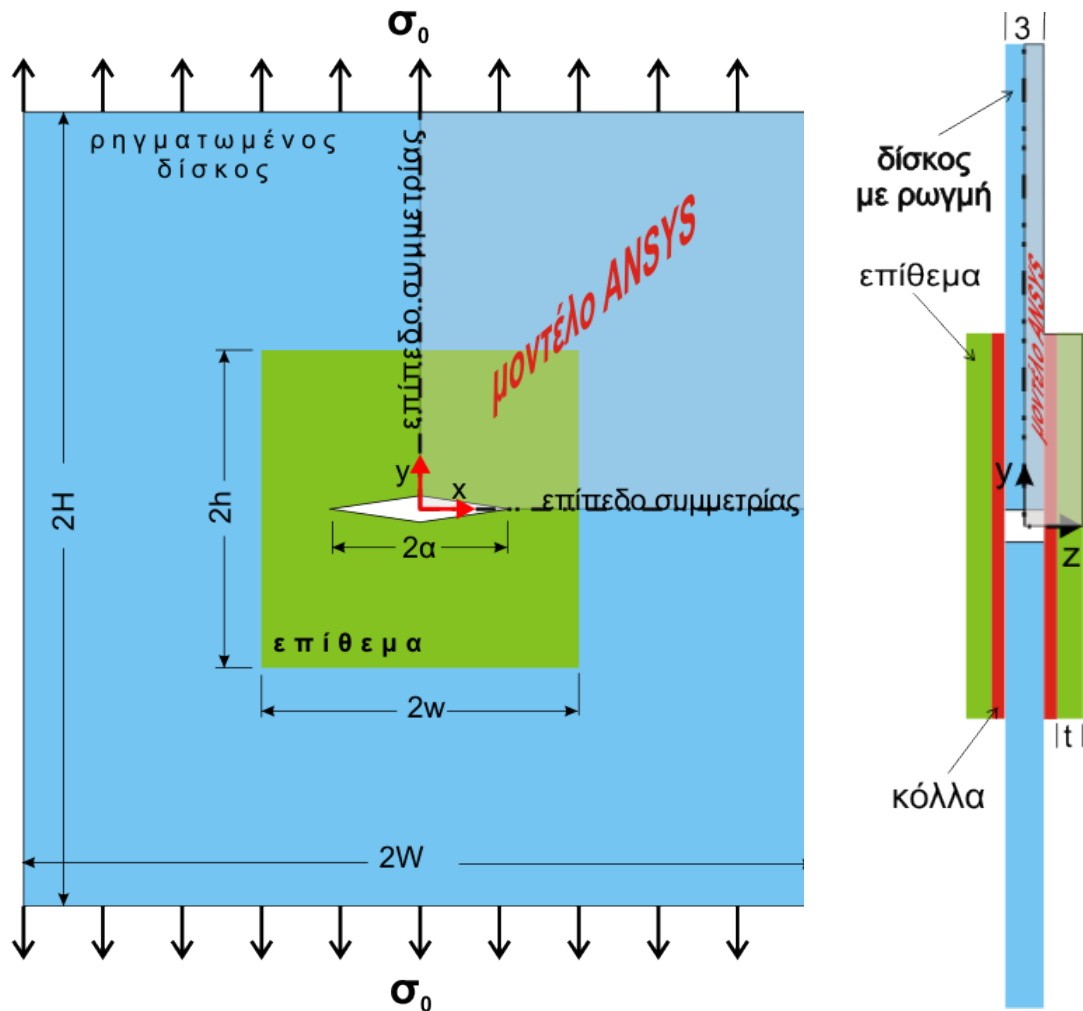
3.1 Γενικά:

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφεται η διαδικασία από τα πειράματα που εκτελέστηκαν με σκοπό την ανάλυση και τον σχεδιασμό μεταλλικών και σύνθετων επιθεμάτων σε ρηγματωμένα ελάσματα αλουμινίου. Οι δοκιμές έγιναν μοντελοποιώντας τη γεωμετρία μιας επισκευασμένης ρωγμής που προϋπάρχει στο μέσο ενός ελάσματος (δίσκου) με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS [20]. Μελετήθηκαν επίπεδα και καμπύλα ελάσματα, προσομοιώνοντας την άτρακτο ενός αεροσκάφους, και εξήχθησαν συγκριτικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια θεωρήθηκε ένας ρηγματωμένος δίσκος από κράμα αλουμινίου (Al_2O_{24}), ο οποίος έχει επισκευαστεί και από τις δύο πλευρές του με κόλληση, μεταλλικού ή σύνθετου επιθέματος. Οι διαστάσεις του δίσκου και το πάχος της κόλλας θεωρούνται σταθερά ($2W=300$ mm, $2H=300$ mm, $T=3$ mm και $T_a=0,1$ mm). Η ρωγμή θεωρείται διαμπερής, δηλαδή σχηματίζεται σε όλο το πάχος του ελάσματος.

Τα μεγέθη που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια των δοκιμών είναι οι διαστάσεις του επιθέματος (πλάτος $2w$, ύψος $2h$), το πάχος του επιθέματος t και το μήκος ρωγμής $2a$ καθώς και η ακτίνα καμπυλότητας στη περίπτωση του καμπύλου δίσκου. Αυτά επηρεάζουν και τις τιμές των συντελεστών έντασης των τάσεων γύρω από τη κορυφή της ρωγμής, όπως θα δούμε. Η εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση θεωρείται σταθερή ($\sigma_0=100$ MPa), και ασκείται κατά τον άξονα Y , κάθετα στο μήκος της ρωγμής.

Επειδή ο ρηγματωμένος δίσκος που εξετάστηκε είναι συμμετρικός και στους τρεις άξονες, απ' όλες τις απόψεις (γεωμετρία, φορτία, ιδιότητες υλικού, περιορισμοί) μοντελοποιήθηκε το 1/8 του δίσκου, χωρίζοντας τον σε τέσσερα ίσα τμήματα με δύο επίπεδα συμμετρίας στο επίπεδο XY και στο $\frac{1}{2}$ κατά το πάχος του με σκοπό να μειωθεί το μέγεθος και τα όρια δράσης του μοντέλου, χωρίς να χαθεί τίποτα από την ακρίβεια των αναλύσεων. Στο Σχήμα 3-1, αριστερά, απεικονίζεται σχηματικά ο δίσκος που μοντελοποιήθηκε, η ρωγμή μήκους $2a$ στο μέσο του, το επίθεμα, και το τμήμα

της γεωμετρίας που γίνεται μοντέλο για το ANSYS. Δεξιά (πλάγια όψη σε τομή) φαίνονται τα πάχη των ίδιων αντικειμένων.

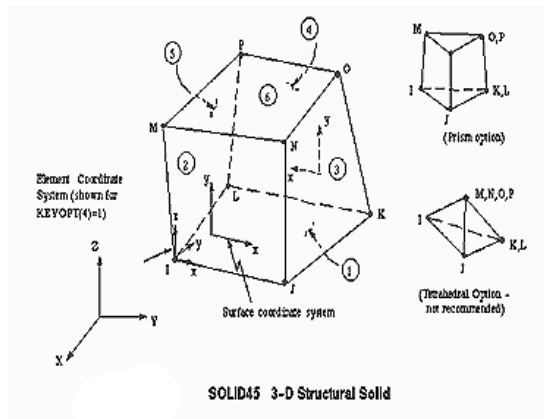


Σχήμα 3-1: Γεωμετρία του ρηγματωμένου δίσκου για την παραγωγή του μοντέλου της επισκευής

3.2 Πορεία και παράμετροι μοντελοποίησης

3.2.1 Τύπος στοιχείων, διακριτοποίηση, ιδιότητες και σταθερές

Για την κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο στοιχείο SOLID45, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2.

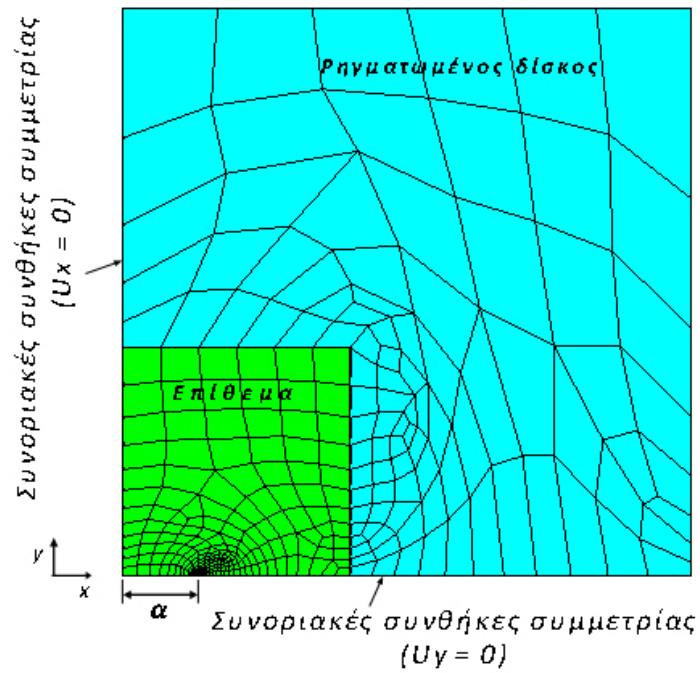


Σχήμα 3-2: Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου SOLID45

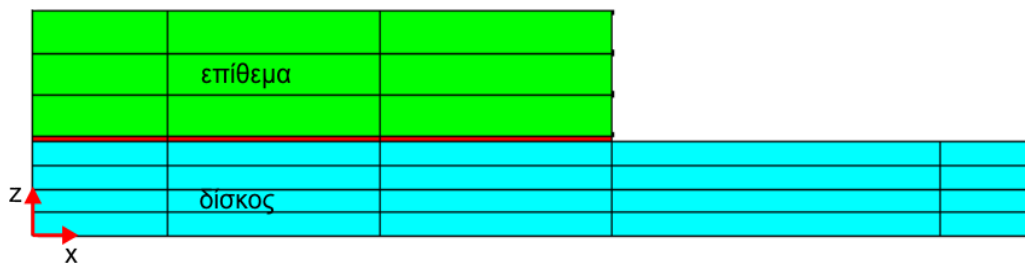
Το στοιχείο SOLID45 χρησιμοποιήθηκε για την διακριτοποίηση της κατασκευής, κατά την οποία η κατασκευή διασπάται (υποδιαιρείται) σε ένα πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων που είναι ανάλογο με την επιθυμητή ακρίβεια. Αυτά έχουν κοινά σημεία τις κορυφές τους που ονομάζονται κόμβοι. Στην κατασκευή που εξετάστηκε (επισκευασμένη ρωγμή) επιλέχθηκαν, κατά το πάχος (άξονας Z) και στο επίπεδο X-Y, σαν πλήθος στοιχείων τα εξής:

- Κατά το πάχος του ρηγματωμένου δίσκου: 4 στοιχεία
- Κατά το πάχος της κόλλας: ένα στοιχείο
- Κατά το πάχος του επιθέματος (μεταλλικού ή σύνθετου): 3 στοιχεία
- Στο επίπεδο XY και κυρίως στη περιοχή της κορυφής της ρωγμής χρησιμοποιήθηκε πυκνότερη διακριτοποίηση (πυκνότητα πλεγμάτων-mesh) για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του SIF.

Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται η διακριτοποίηση της επιφάνειας του μοντέλου όπως παράγεται από το πρόγραμμα ANSYS, οι συνοριακές συνθήκες συμμετρίας, το μισό μήκος της ρωγμής a , ενώ στη κορυφή της ρωγμής είναι φανερή η πυκνότερη διακριτοποίηση. Τα Σχήματα 3-4 και 3-7 δείχνουν τη διακριτοποίηση κατά τα πάχη των μοντελοποιημένων αντικειμένων. Επιπλέον στο Σχήμα 3-7 φαίνεται και η πυκνότερη διακριτοποίηση στη περιοχή της κορυφής K της ρωγμής.



Σχήμα 3-3: διακριτοποίηση του μοντέλου του επισκευασμένου δίσκου στο XY επίπεδο



Σχήμα 3-4: διακριτοποίηση μοντέλου κατά τον άξονα Z (πάχος)

Οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε στοιχείο παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 3-1. Για τα μεταλλικά υλικά (ρηγματωμένος δίσκος και μεταλλικό επίθεμα) καθώς και για την κόλλα δίνουμε ως δεδομένα το μέτρο ελαστικότητας E (Young's modulus) και τον λόγο Poisson ν (Poisson's Ratio). Για το σύνθετο επίθεμα χρησιμοποιήσαμε ορθότροπες ιδιότητες [7].

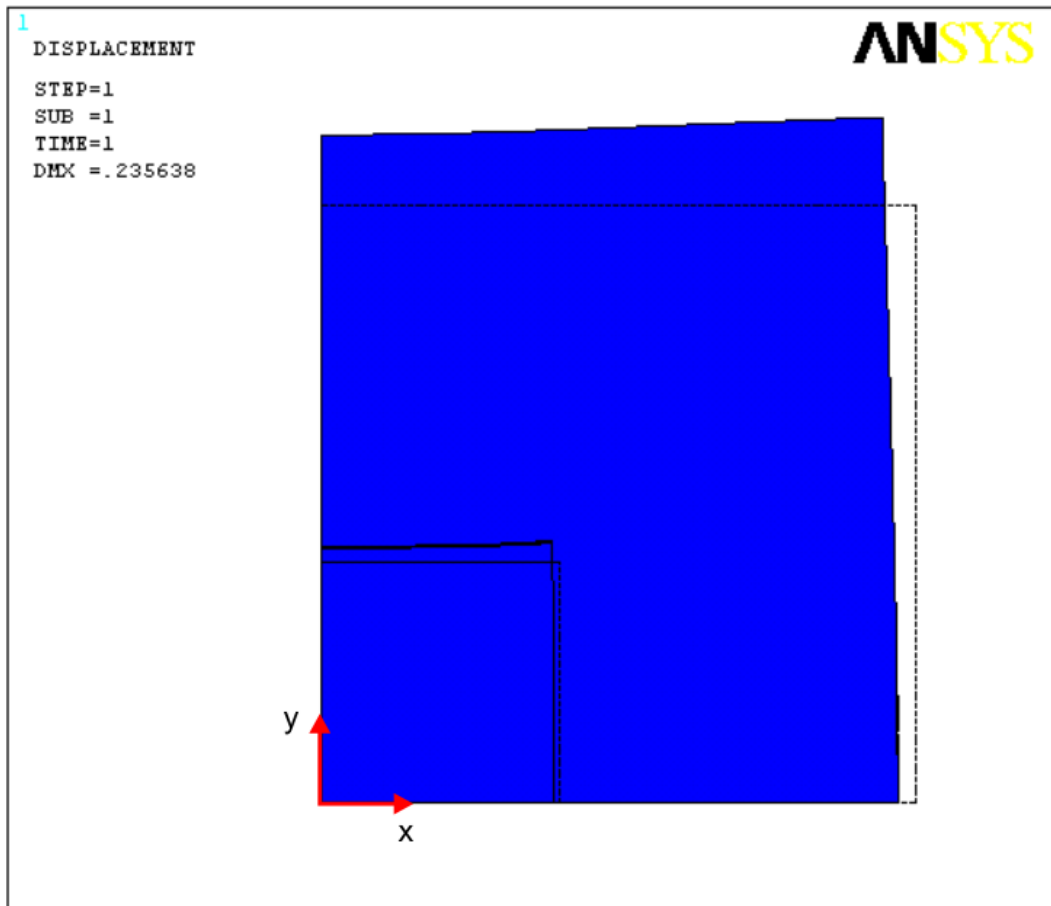
Αντικείμενο (object)	Στοιχείο (element)	Υλικό (material)	E (N/mm ²)	ν	G (N/mm ²)
Ρηγματωμένος δίσκος	Solid 45	Al ₂ O ₂₄ (ισότροπο)	70000	0,33	
Επίθεμα μεταλλικό	Solid 45	Al ₂ O ₂₄ (ισότροπο)	70000	0,33	
Επίθεμα σύνθετο	Solid 45	gr/ep (ορθότροπο)	E _x =10000 E _y =168000 E _z =10000	$\nu_{xy}=0,1$ $\nu_{xz}=0,48$ $\nu_{yz}=0,1$	G _{xy} =8000 G _{xz} =4000 G _{yz} =8000
κόλλα	Solid 45	FM73 (ισότροπο)	2200	0,35	

Πίνακας 3-1: Ελαστικές ιδιότητες των υλικών

3.2.2 Συνοριακές συνθήκες, φορτίσεις και παραμόρφωση μοντέλου

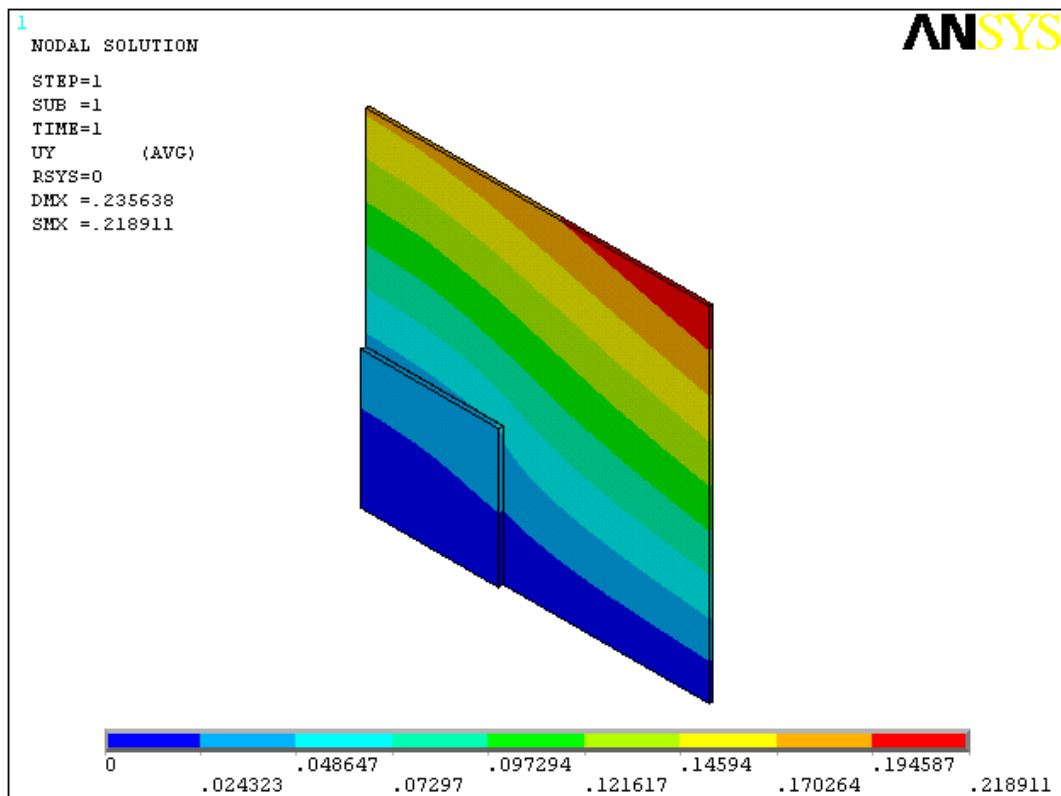
Στο Σχήμα 3-3 φαίνονται και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου οι οποίες εφαρμόζονται στα επίπεδα συμμετρίας (βλέπε και Σχήμα 3-1) του ρηγματωμένου δίσκου. Οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες για τα επίπεδα συμμετρίας είναι οι μετατοπίσεις στις διευθύνσεις X, Y και Z να είναι μηδέν, δηλαδή $U_x=0$ (για το επίπεδο συμμετρίας κάθετο στον άξονα X), $U_y=0$ (για το επίπεδο συμμετρίας κάθετο στον άξονα Y) και $U_z=0$ (για το επίπεδο συμμετρίας κάθετο στον άξονα Z). Με αυτό τον τρόπο ορίζεται η κατάλληλη στήριξη του μοντέλου ακριβώς στα επίπεδα συμμετρίας.

Το φορτίο (τάση σ_0) ασκείται κατανεμημένο στην πάνω και στη κάτω επιφάνεια του ρηγματωμένου δίσκου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Η παραμόρφωση της γεωμετρίας του παραγόμενου μοντέλου (με επίθεμα), λόγω μετατοπίσεων των κόμβων υπό την επίδραση του φορτίου, φαίνεται στο Σχήμα 3-5. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το περίγραμμα του μη παραμορφωμένου μοντέλου.



Σχήμα 3-5: Παραμόρφωση της γεωμετρίας του μοντέλου Ansys (επιφάνεια μπλέ)

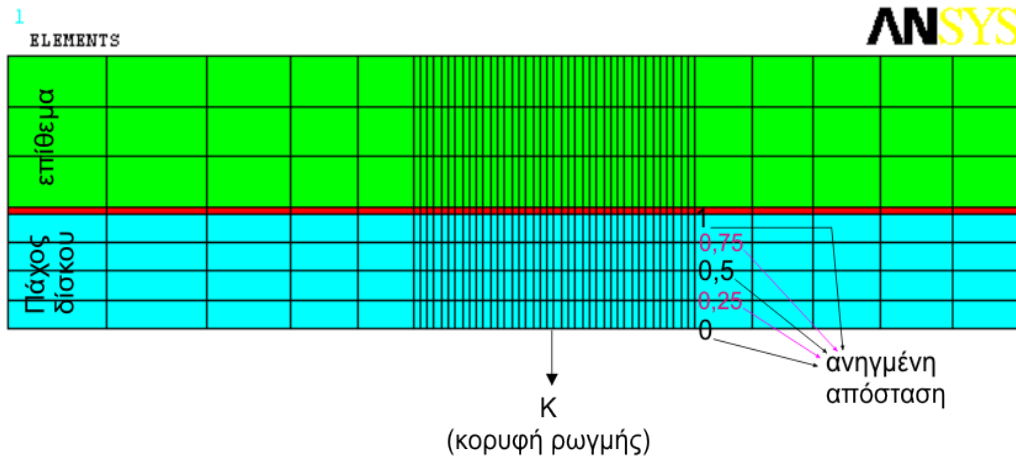
Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται η κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων U_y (σε mm) του μοντέλου του ρηγματωμένου δίσκου ο οποίος φέρει μεταλλικό επίθεμα $60 \times 60 \text{ mm}^2$ πάχους 2 mm. Η μεγαλύτερη μετατόπιση συμβαίνει στην επάνω δεξιά γωνία του μοντέλου (περιοχή με κόκκινο), γεγονός που διακρίνεται καθαρά και στο Σχήμα 3-5 που στο αντίστοιχο τμήμα έχει τη μεγαλύτερη γεωμετρική παραμόρφωση.



Σχήμα 3-6: Τυπική κατανομή των κατακόρυφων μετατοπίσεων U_y του μοντέλου (σε mm)

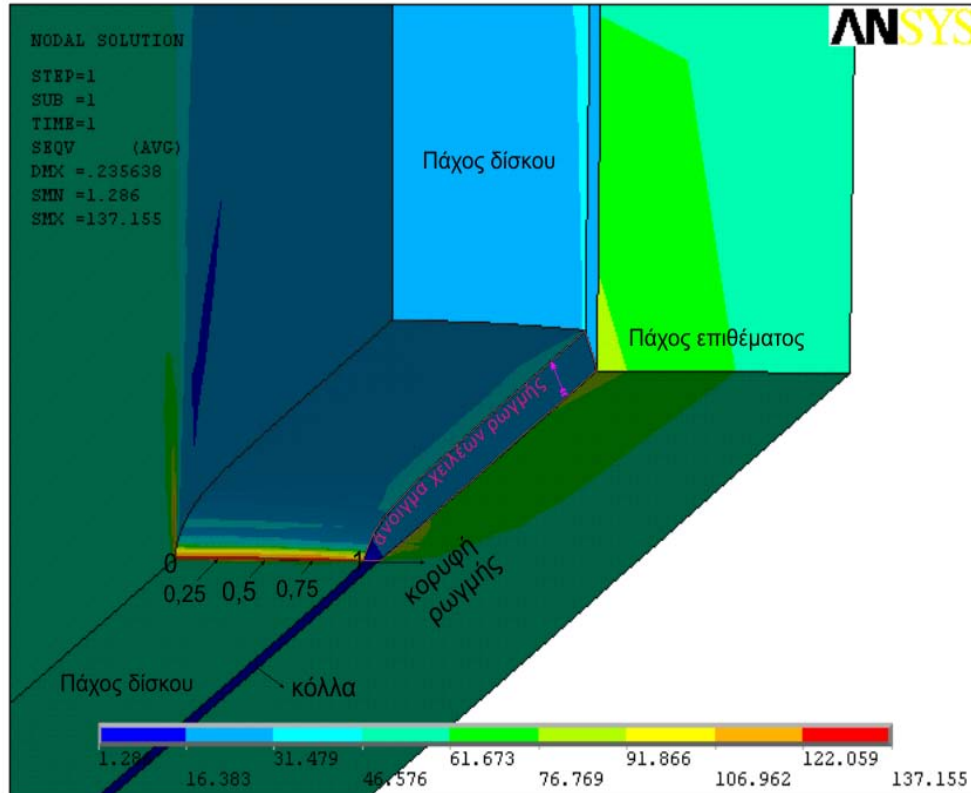
3.2.3 Υπολογισμός των τιμών του SIF στη ρωγμή

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που υπολογίζουμε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, εκτός από τις μετατοπίσεις, είναι οι τιμές του συντελεστή έντασης των τάσεων K . Ο SIF υπολογίζεται από τις μετατοπίσεις των χειλέων της ρωγμής στην περιοχή της κορυφής της και παίρνει διαφορετικές τιμές κατά το πάχος (άξονας Z) του δίσκου, λόγω της παρουσίας του επιθέματος. Το πρόγραμμα υπολογίζει κάθε φορά τον SIF σε πέντε διαφορετικά σημεία του πάχους (ανηγμένες αποστάσεις), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Η ανηγμένη απόσταση 0 αντιστοιχεί με τη μέση του πάχους του δίσκου, ενώ η ανηγμένη απόσταση 1 αντιστοιχεί με σημείο στην επιφάνεια του δίσκου που συνορεύει με τη κόλλα του επιθέματος.



Σχήμα 3-7: Ορισμός των θέσεων υπολογισμού του SIF κατά το πάχος του δίσκου

Τυπική κατανομή των τάσεων στην περιοχή της κορυφής της ρωγμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8 (τρισδιάστατη απεικόνιση) όπου φαίνεται και η παραμόρφωση (μισό άνοιγμα) των χειλέων της ρωγμής. Στο Σχήμα αυτό διακρίνεται η μεγάλη συγκέντρωση τάσεων (κόκκινη ζώνη) στην κορυφή της ρωγμής λόγω της ιδιομορφίας του εντατικού πεδίου και η μη ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο πάχος. Υπάρχουν μικρότερες τάσεις (μπλε και γαλάζια ζώνη) στην πλευρά του επιθέματος που οδηγεί και σε μικρότερες τιμές του συντελεστή έντασης των τάσεων.



Σχήμα 3-8: Κατανομή των ισοδύναμων τάσεων (von Mises) στην περιοχή της ρωγμής (παραμορφωμένη γεωμετρία)

3.2.4 Έλεγχος της ακρίβειας του μοντέλου

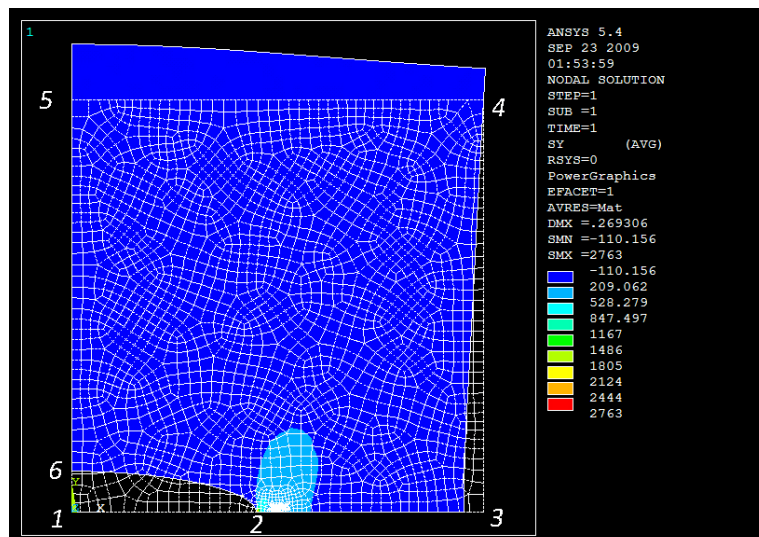
Συνήθως, στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία ο υπολογισμός του SIF εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα λόγω της ιδιομορφίας του τασικού πεδίου στην κορυφή της ρωγμής. Στο σημείο αυτό θα ελέγξουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μοντελοποιώντας έναν δίσκο με κεντρική ρωγμή (χωρίς επίθεμα) για τον οποίο υπάρχει αναλυτική (θεωρητική) λύση. Η αναλυτική λύση που χρησιμοποιούμε για τον συντελεστή SIF προκύπτει από την εξίσωση:

$$K = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}$$

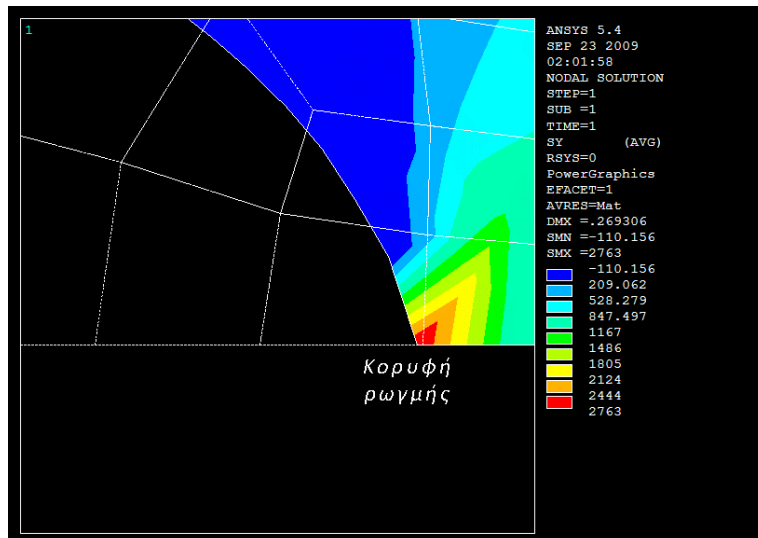
όπου σ_0 η εφαρμοζόμενη τάση (=100 MPa), a το μισό μήκος της ρωγμής και W το μισό πλάτος του δίσκου (=150mm).

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη όταν οι τιμές του SIF που υπολογίζει το πρόγραμμα ANSYS για το μη επισκευασμένο μοντέλο προσεγγίζουν τις αναλυτικές τιμές.

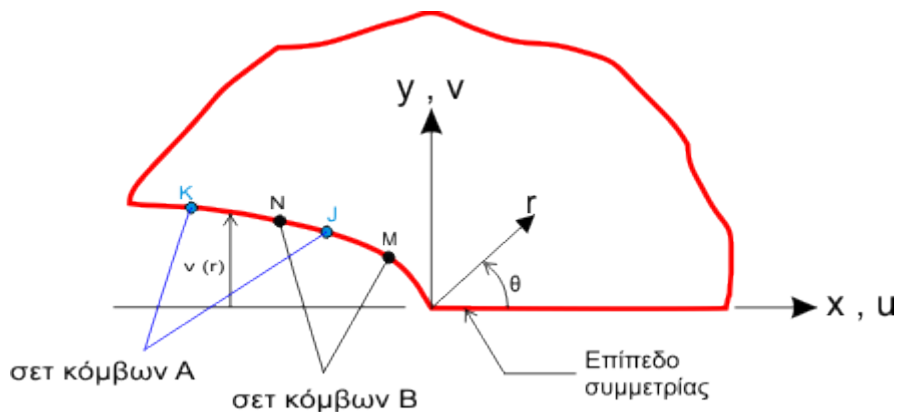
Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται μια τυπική παραμόρφωση (μπλέ επιφάνεια) ενός μη επισκευασμένου δίσκου (επιφάνεια 1-2-3-4-5-1), καθώς και το μισό άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής (καμπύλη 1-2-6) μαζί με τη κορυφή της (σημείο 2). Από το Σχήμα 3-9, μεγεθύνοντας κοντά στη κορυφή της ρωγμής (σημείο 2), προκύπτει το Σχήμα 3-10 στο οποίο φαίνεται, με έγχρωμες ζώνες, η κατανομή των ορθών τάσεων (S_y) κατά τον άξονα Y.



Σχήμα 3-9: Τυπική παραμόρφωση ενός μη επισκευασμένου δίσκου (μπλε επιφάνεια).



Σχήμα 3-10: Κατανομή τάσεων (τασικό πεδίο S_y) γύρω από τη κορυφή ρωγμής στο ρηγματωμένο δίσκο (χωρίς επίθεμα), όπως προκύπτει από το μοντέλο ANSYS

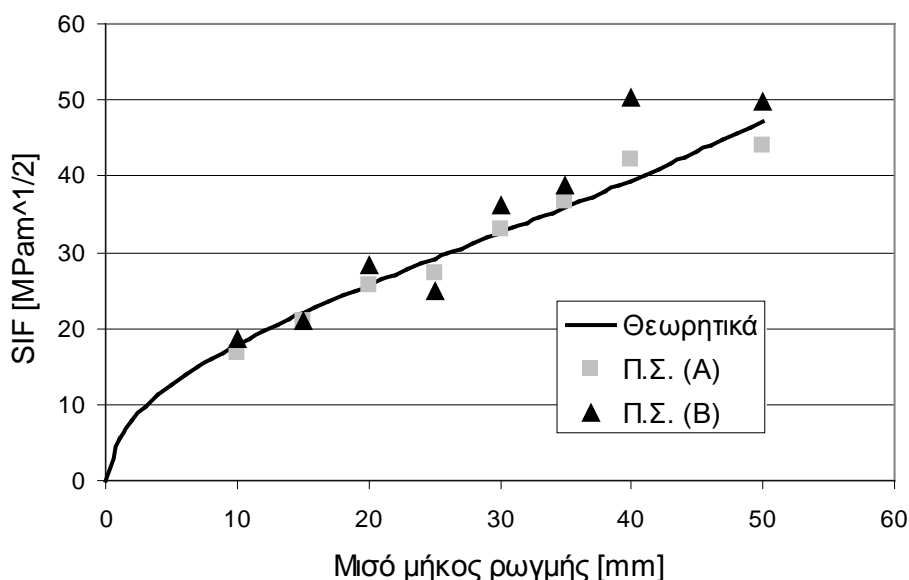


Σχήμα 3-11: Επιλογή κόμβων στα χείλη της ρωγμής για τον υπολογισμό του SIF

Στο Σχήμα 3-12 συγκρίνονται οι τιμές του SIF που υπολογίζει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με τις ακριβείς αναλυτικές τιμές, που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση (θεωρητική καμπύλη). Παρουσιάζονται δύο σεί τιμών που υπολογίζονται από το ANSYS που αντιστοιχούν σε διαφορετική επιλογή ζεύγους κόμβων, όπως εξηγείται στη συνέχεια. Στο πρόγραμμα ANSYS, για τον προσεγγιστικό υπολογισμό του συντελεστή έντασης των τάσεων SIF, χρειάζεται να επιλεγούν δύο κόμβοι του πλέγματος πάνω στο χείλος της ρωγμής και κοντά στη κορυφή της. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11, το πρόγραμμα, στην περίπτωση συμμετρίας, υπολογίζει τις σχετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις $V(r)$ στους

δύο επιλεγμένους κόμβους (π.χ. J και K) σε διαφορετικές αποστάσεις (r) από την κορυφή της ρωγμής. Οι δύο αυτοί κόμβοι καθορίζονται από τον χρήστη. Το πρόγραμμα υπολογίζει δυο διαφορετικές τιμές K που αντιστοιχούν στους δυο επιλεγμένους κόμβους. Η «πραγματική» τιμή του SIF υπολογίζεται με γραμμική παρέκταση των δυο τιμών για απόσταση $r = 0$. Η διαδικασία της επιλογής δύο ζευγών κόμβων και ο αντίστοιχος υπολογισμός, από το πρόγραμμα, δύο τιμών του SIF, επαναλαμβάνεται για διαφορετικά μισά μήκη ρωγμής a (από 10 έως 75 mm με βήμα 5 mm). Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι δύο σειρές τιμών Π.Σ. στο Σχήμα 3-12.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SIF που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το σετ κόμβων A είναι σε πολύ καλύτερη συμφωνία με τις αναλυτικές τιμές (θεωρητική καμπύλη) και επομένως το σετ αυτό κόμβων θα επιλέγεται στη συνέχεια της εργασίας για τον υπολογισμό των τιμών SIF για το επισκευασμένο έλασμα.



Σχήμα 3-12: Σύγκριση τιμών SIF για διάφορα μήκη ρωγμής, με σκοπό τον έλεγχο ακρίβειας του μοντέλου. Π.Σ. (A) = Πεπερασμένα Στοιχεία με σετ κόμβων A. Π.Σ. (B) = Πεπερασμένα Στοιχεία με σετ κόμβων B.

4 Αριθμητικά αποτελέσματα

4.1 Επισκευασμένη ρωγμή με μεταλλικό επίθεμα

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη της επίδρασης διαφόρων γεωμετρικών μεγεθών στην τιμή του SIF. Αρχικά θεωρούμε την περίπτωση του μεταλλικού επιθέματος από κράμα αλουμινίου με ιδιότητες όπως φαίνονται στον Πίνακα 3-1.

Στα Σχήματα 4.1 έως 4.3 φαίνεται πως μεταβάλλεται ο SIF μιας επισκευασμένης ρωγμής κατά τη διεύθυνση του πάχους του δίσκου (ανηγμένη απόσταση). Η τιμή 0 της ανηγμένης απόστασης αντιστοιχεί στη μέση του πάχους του δίσκου, ενώ η τιμή 1 αντιστοιχεί στην επιφάνεια του δίσκου που εφάπτεται με τη κόλλα του επιθέματος. Η μεταβολή αυτή εξετάζεται για διάφορες διαστάσεις του ορθογωνικού επιθέματος (με πάχος 2 mm) και για τρία διαφορετικά μισά μήκη ρωγμής (10, 20 και 30 mm).

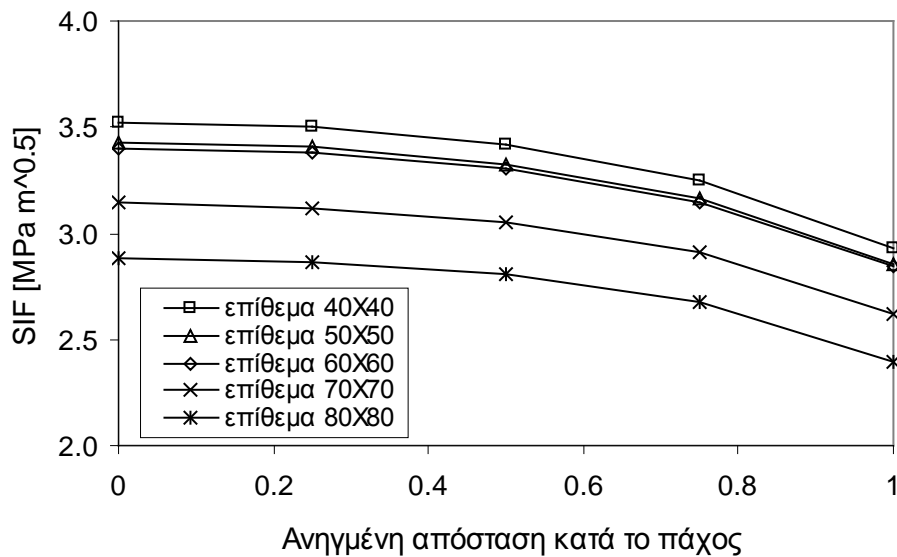
Συγκρίνοντας τις τιμές των σχημάτων 4.1 έως 4.3 με αυτές του Σχήματος 3-12 (χωρίς επίθεμα) παρατηρούμε την δραματική μείωση στις τιμές του SIF λόγω της επισκευής. Η μείωση αυτή για το 80X80 mm² μεταλλικό επίθεμα κυμαίνεται από 83% έως 90%.

Το συμπέρασμα από την εξέταση των αποτελεσμάτων αυτών είναι ότι ανεξάρτητα από το μήκος της ρωγμής και τις διαστάσεις του επιθέματος ο SIF είναι μικρότερος στην πλευρά του επιθέματος (ανηγμένη απόσταση =1). Η ποσοστιαία μείωση του SIF είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις του μεταλλικού επιθέματος (όπως φαίνεται από την παραλληλότητα των καμπυλών) και κυμαίνεται από 16% έως 18% για τα διάφορα μήκη ρωγμών που εξετάστηκαν.

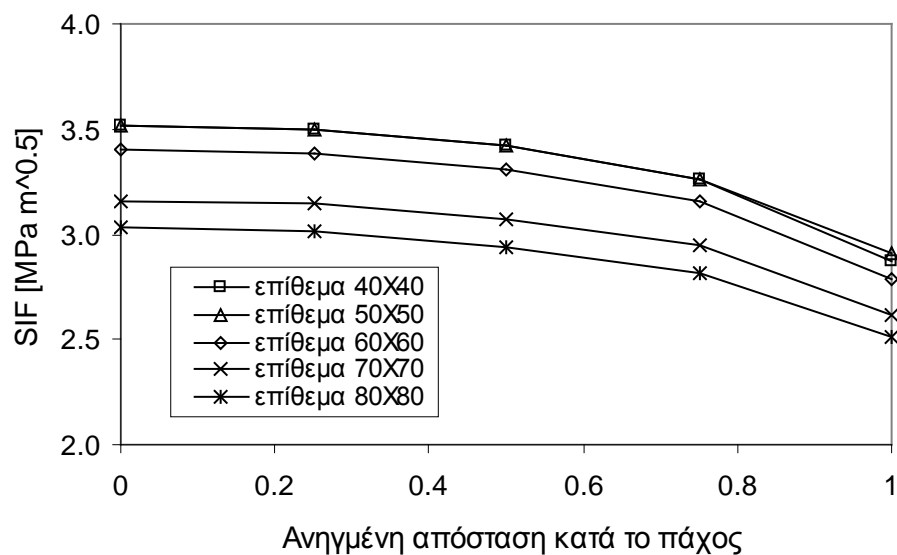
Στα Σχήματα 4.4 έως 4.6 φαίνεται η μεταβολή του μέγιστου SIF (στη μέση του πάχους του δίσκου) καθώς και του μέσου SIF (μέση τιμή κατά το πάχος του δίσκου) ως συνάρτηση της διάστασης του μπαλώματος για τρία διαφορετικά μισά μήκη ρωγμής (10, 20 και 30 mm). Παρατηρούμε ότι η αύξηση των διαστάσεων του μπαλώματος επιφέρει σημαντική μείωση στη μέγιστη και στη μέση τιμή του SIF που κυμαίνεται από 14% έως 18%. Παρατηρούμε επίσης ότι η μείωση του SIF αρχίζει από κάποια τιμή της διάστασης του επιθέματος ανάλογα με το μήκος της ρωγμής, π.χ.

για μισό μήκος ρωγμής 10 mm, παρατηρούμε μείωση του SIF όταν οι διαστάσεις του μεταλλικού επιθέματος είναι μεγαλύτερες από 60X60 mm².

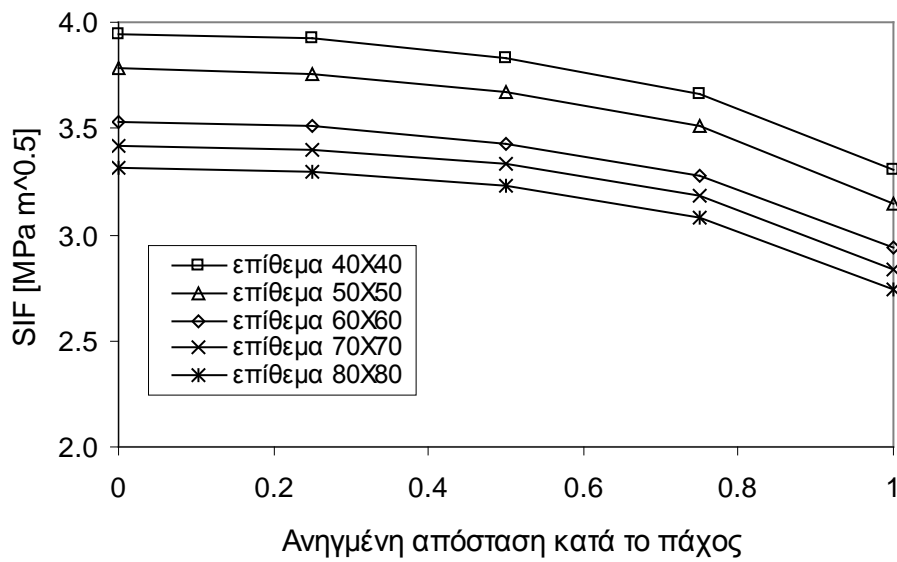
Η επίδραση του πάχους του μεταλλικού επιθέματος στις τιμές του SIF παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.7 και 4.8 (για μεταλλικό μπάλωμα διαστάσεων 60X60 mm² και μισό μήκος ρωγμής 20 mm). Παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους οδηγεί σε πολύ σημαντική μείωση του SIF, μέχρι και 48% για τριπλασιασμό του πάχους (από 1 σε 3 mm).



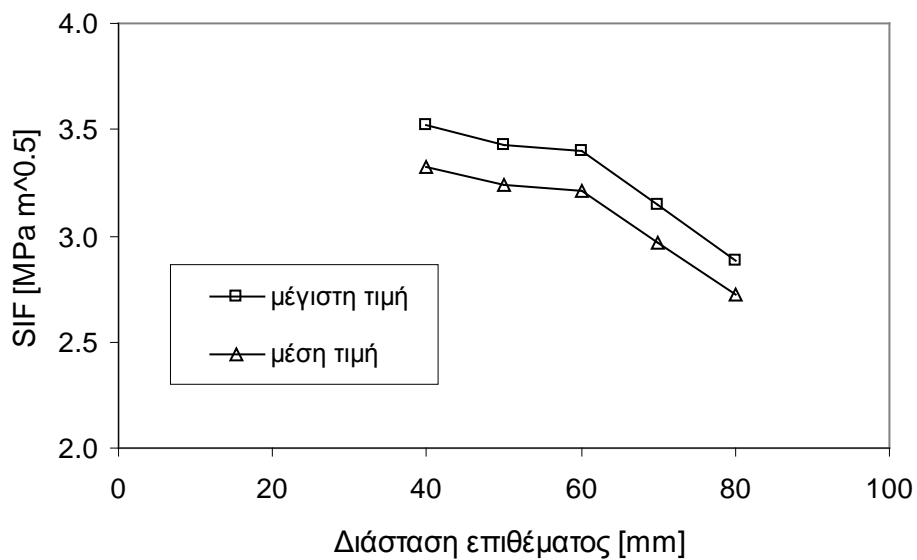
Σχήμα 4-1: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 10 mm)



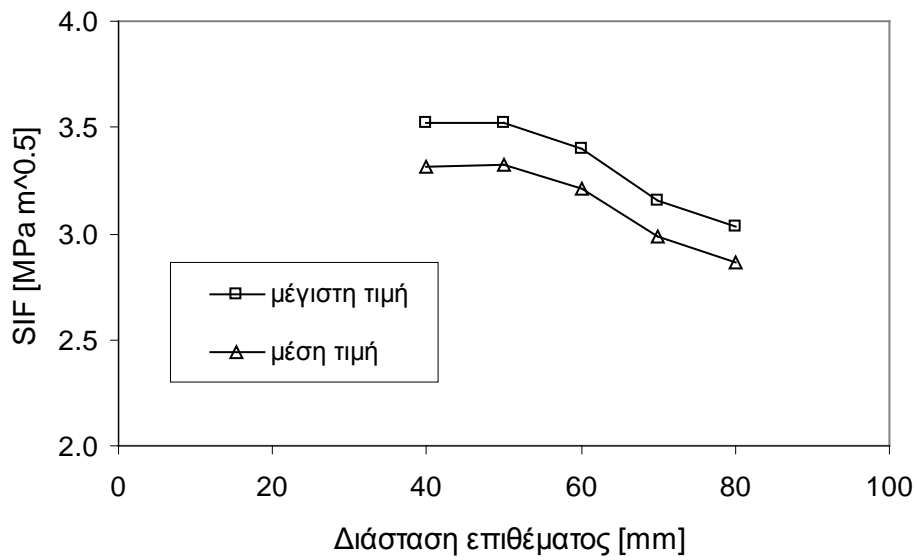
Σχήμα 4-2: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



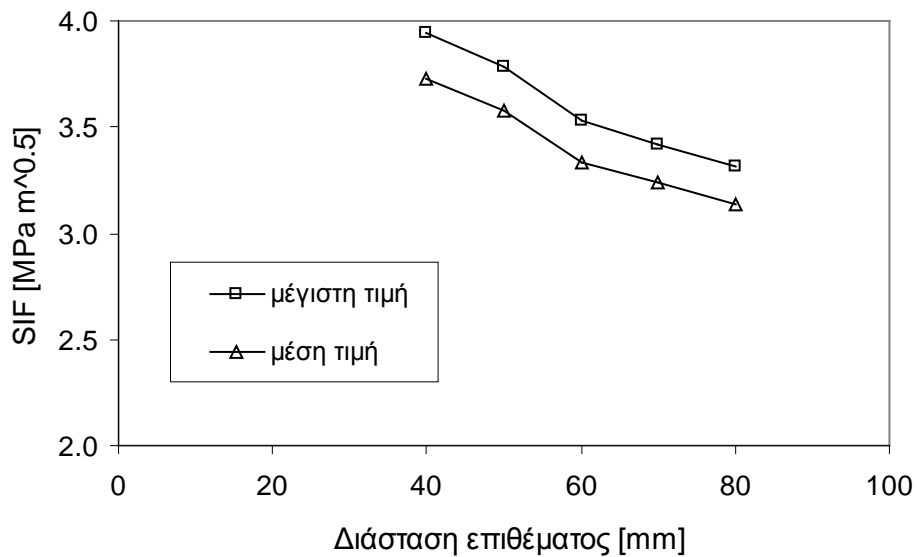
Σχήμα 4-3: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 30 mm)



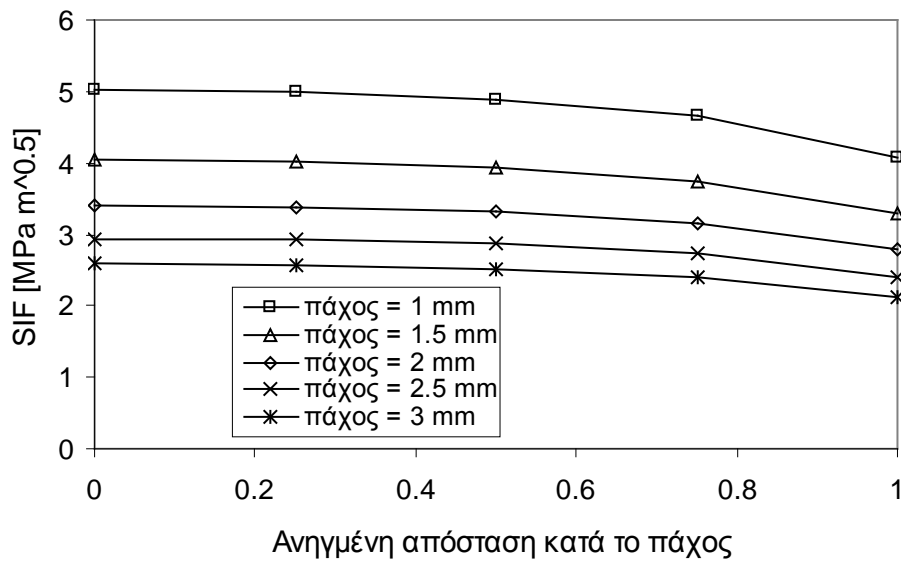
Σχήμα 4-4: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του μεταλλικού επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 10 mm)



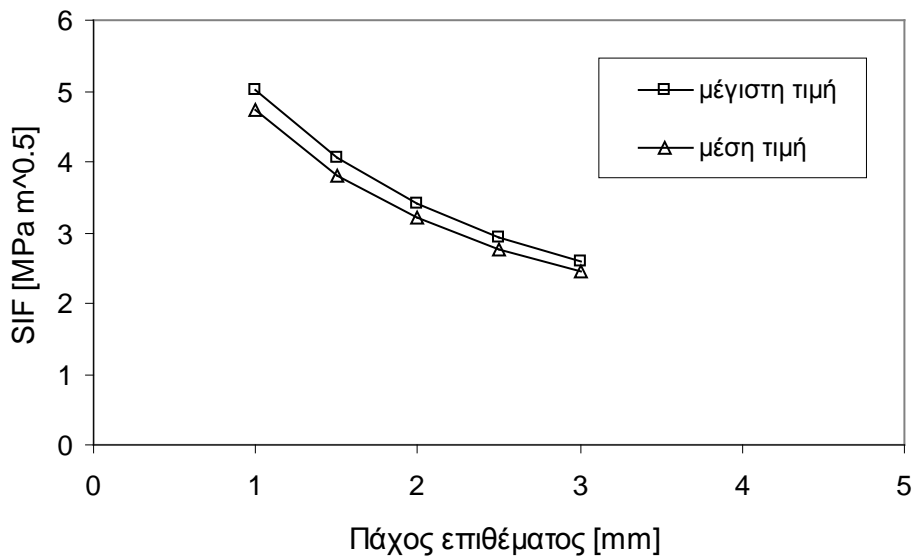
Σχήμα 4-5: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του μεταλλικού επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



Σχήμα 4-6: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του μεταλλικού επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 30 mm)



Σχήμα 4-7: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος του δίσκου για διάφορα πάχη μεταλλικού επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



Σχήμα 4-8: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει του πάχους του μεταλλικού επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)

4.2 Επισκευασμένη ρωγμή με σύνθετο επίθεμα

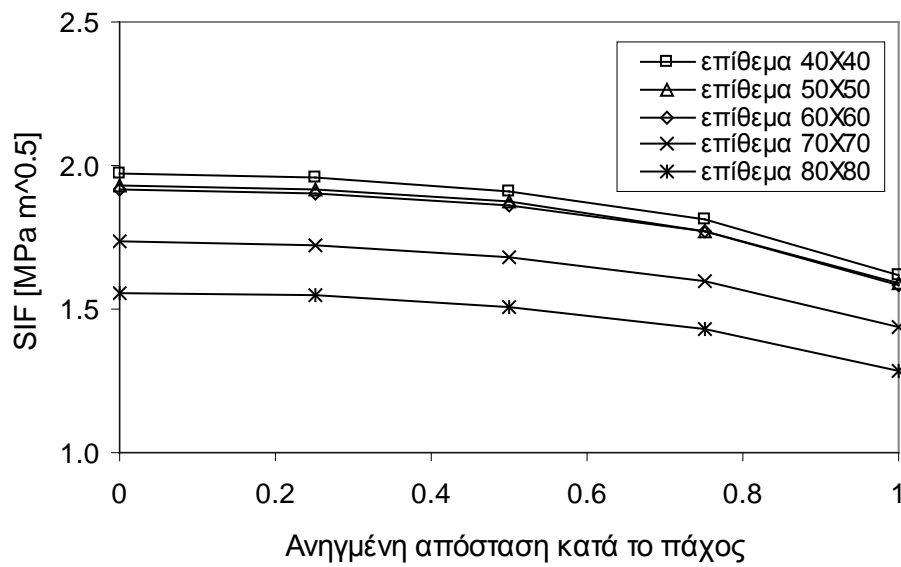
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας αλλά για σύνθετο επίθεμα. Στα σχήματα 4.9 έως 4.11 φαίνεται πως μεταβάλλεται ο SIF μιας επισκευασμένης ρωγμής κατά τη διεύθυνση του πάχους του δίσκου (ανηγμένη απόσταση). Η μεταβολή αυτή εξετάζεται για διάφορες διαστάσεις του ορθογωνικού σύνθετου επιθέματος (με πάχος 2 mm) και για τρία διαφορετικά μισά μήκη ρωγμής (10, 20 και 30 mm).

Συγκρίνοντας τις τιμές των Σχημάτων 4.9 έως 4.11 με αυτές του Σχήμα 3-12(χωρίς επίθεμα) παρατηρούμε την δραματική μείωση στις τιμές του SIF λόγω της επισκευής. Η μείωση αυτή για το 80X80 mm² σύνθετο επίθεμα κυμαίνεται από 93% έως 95%.

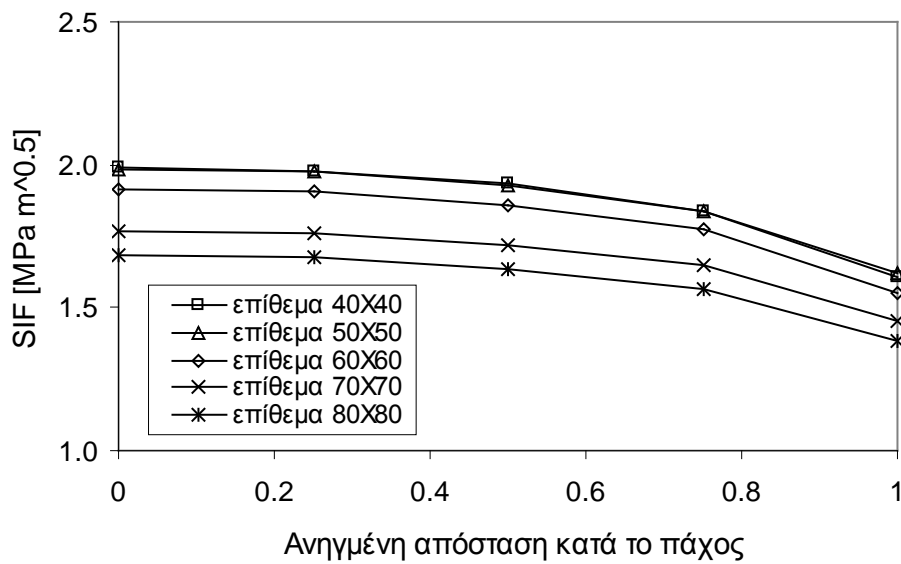
Το συμπέρασμα από την εξέταση των αποτελεσμάτων αυτών είναι ότι ανεξάρτητα από το μήκος της ρωγμής και τις διαστάσεις του επιθέματος ο SIF είναι μικρότερος στην πλευρά του επιθέματος (ανηγμένη απόσταση =1). Η ποσοστιαία μείωση του SIF είναι ανεξάρτητη από τις διαστάσεις του επιθέματος (όπως φαίνεται από την παραλληλότητα των καμπυλών) και κυμαίνεται από 17% έως 19% για τα διάφορα μήκη ρωγμών που εξετάστηκαν.

Στα Σχήματα 4.12 έως 4.14 φαίνεται η μεταβολή του μέγιστου SIF (ανηγμένη απόσταση=0) καθώς και του μέσου SIF (μέση τιμή κατά το πάχος του δίσκου) ως συνάρτηση της διάστασης του σύνθετου επιθέματος για τρία διαφορετικά μισά μήκη ρωγμής (10, 20 και 30 mm). Παρατηρούμε ότι η αύξηση των διαστάσεων του επιθέματος επιφέρει σημαντική μείωση στη μέγιστη και στη μέση τιμή του SIF που κυμαίνεται από 15% έως 23%. Παρατηρούμε επίσης η μείωση του SIF αρχίζει από κάποια τιμή της διάστασης του μπαλώματος ανάλογα με το μήκος της ρωγμής, π.χ. για μισό μήκος ρωγμής 10mm, παρατηρούμε μείωση του SIF όταν οι διαστάσεις του σύνθετου μπαλώματος είναι μεγαλύτερες από 60X60 mm², όπως ακριβώς συμβαίνει και για το μεταλλικό.

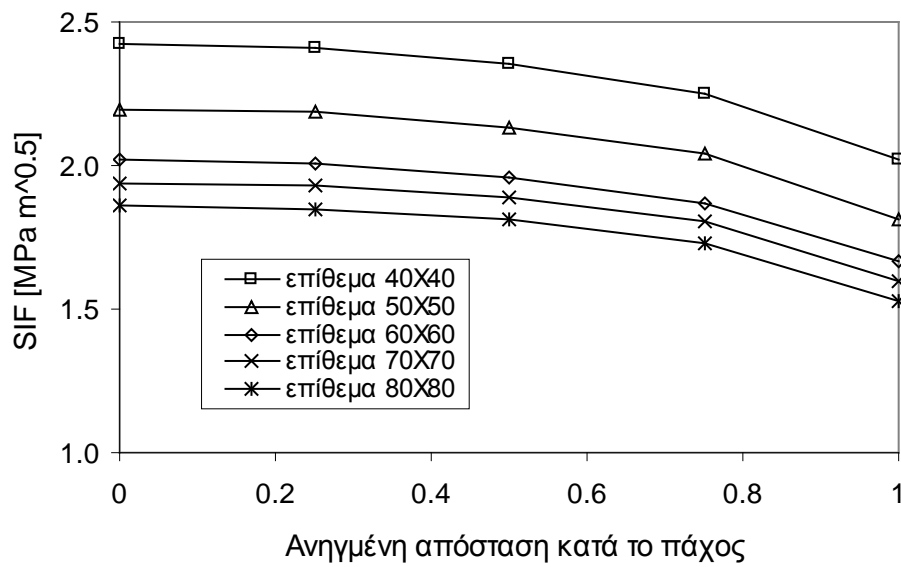
Η επίδραση του πάχους του μπαλώματος στις τιμές του SIF παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.15 και 4.16 (για σύνθετο μπαλώμα διαστάσεων 60X60 mm² και μισό μήκος ρωγμής 20 mm). Παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους οδηγεί σε πολύ σημαντική μείωση του SIF, 55 % για τριπλασιασμό του πάχους (από 1 σε 3 mm) ή μέχρι και 70% για εξαπλασιασμό του πάχους (από 0,5 σε 3 mm).



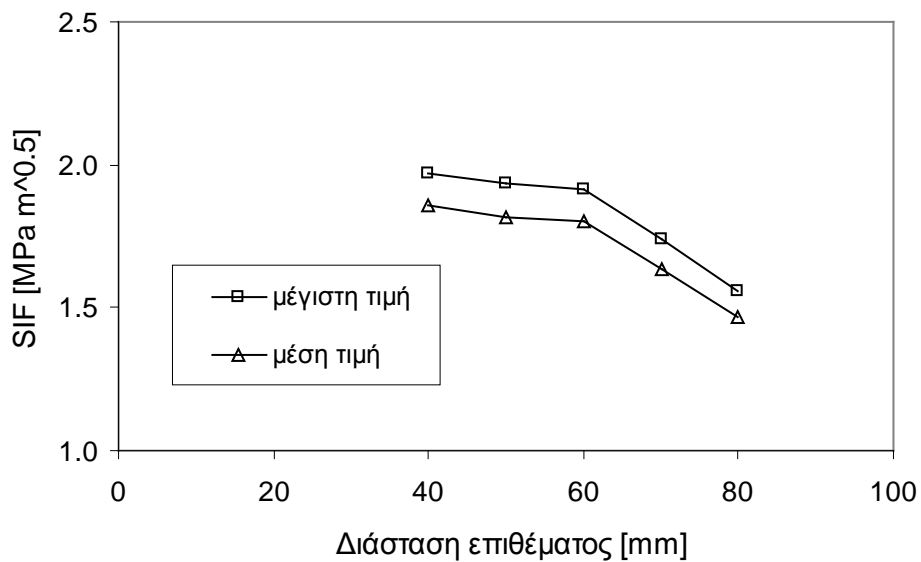
Σχήμα 4-9: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 10 mm)



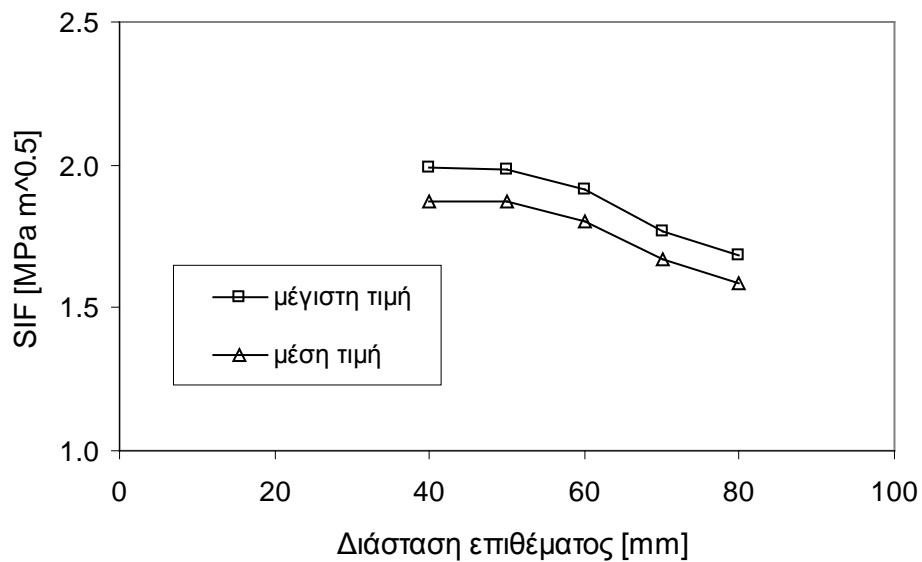
Σχήμα 4-10: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



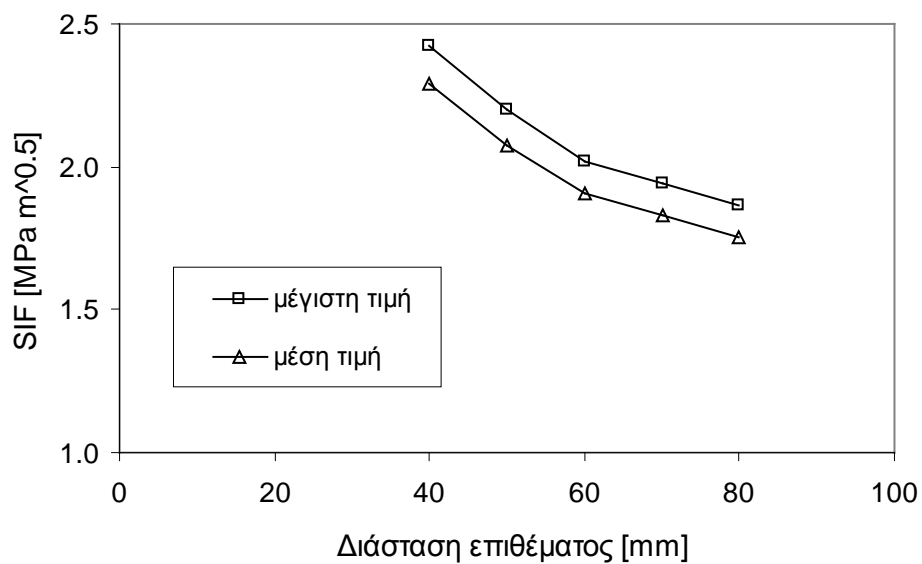
Σχήμα 4-11: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος δίσκου (για μισό μήκος ρωγμής = 30 mm)



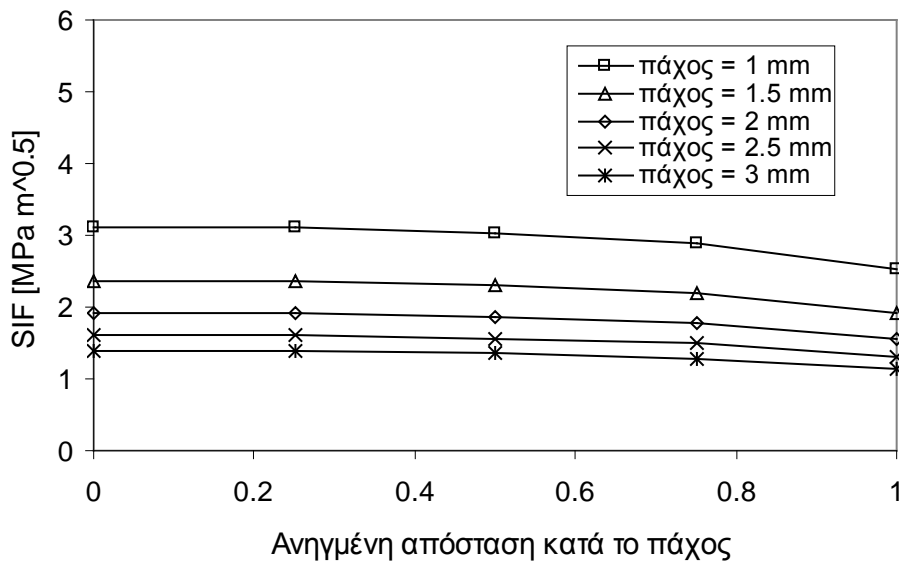
Σχήμα 4-12: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του σύνθετου επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 10 mm)



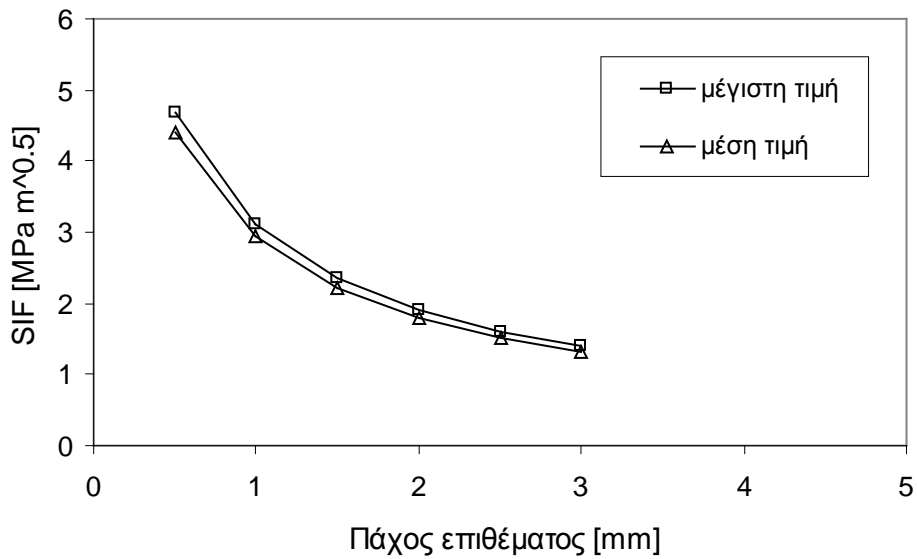
Σχήμα 4-13: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του σύνθετου επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



Σχήμα 4-14: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει των διαστάσεων του σύνθετου επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 30 mm)



Σχήμα 4-15: Μεταβολή του SIF κατά το πάχος του δίσκου για διάφορα πάχη επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)



Σχήμα 4-16: Μεταβολή της μέγιστης και μέσης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει του πάχους του σύνθετου επιθέματος (για μισό μήκος ρωγμής = 20 mm)

4.3 Υπολογισμός διάρκειας ζωής σε κόπωση

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο κύριος λόγος της χρήσης των επιθεμάτων είναι η μείωση του συντελεστή έντασης των τάσεων με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής των ρηγματωμένων δομικών στοιχείων. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η διάρκεια ζωής (σε καταπόνηση κόπωσης) των δοκιμίων που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, θεωρώντας μια αρχική ρωγμή με μισό μήκος 10mm και διαστάσεις επιθέματος 60X60 mm². Στόχος είναι να υπολογίσουμε τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να αυξηθεί το μήκος της ρωγμής από 10 σε 30 mm.

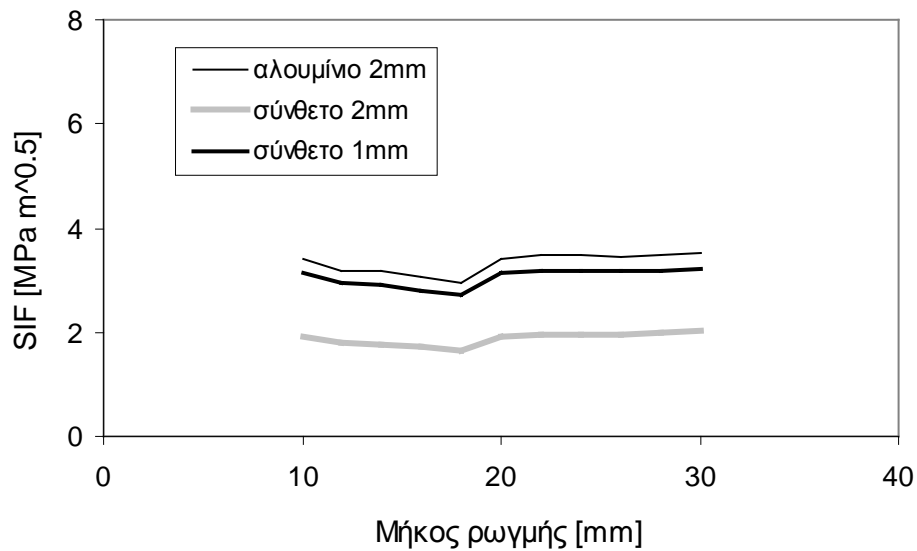
Για να υπολογίσουμε τη διάρκεια ζωής του επισκευασμένου δίσκου είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε το εύρος των τιμών του SIF για κάθε μήκος ρωγμής. Επειδή αυτό είναι αδύνατο στην αριθμητική ανάλυση, υπολογίσαμε τις τιμές του SIF ανά 2 mm και θεωρήσαμε ότι οι τιμές αυτές παραμένουν αμετάβλητες για αύξηση της ρωγμής κατά 2 mm. Ο υπολογισμός έγινε για μισά μήκη ρωγμής από 10 ως 30 mm για μεταλλικό επίθεμα πάχους 2 mm και για σύνθετο επίθεμα πάχους 2 mm. Επειδή το σύνθετο επίθεμα μειώνει πολύ περισσότερο την τιμή του SIF σε σχέση με το μεταλλικό επίθεμα, αποφασίστηκε να μοντελοποιηθεί και σύνθετο επίθεμα πάχους 1 mm. Από τις υπολογισθείσες πέντε τιμές του SIF για κάθε υλικό και διαφορετικά μήκη ρωγμής, αποφασίστηκε να παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρησιμοποιώντας στα παρακάτω διαγράμματα (4.17 έως 4.21) τη μέγιστη τιμή του SIF.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-17, το οποίο δείχνει τη μεταβολή του μέγιστου SIF για τα τρία υλικά επιθεμάτων. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SIF μεταβάλλονται ελάχιστα με το μήκος της ρωγμής και ότι οι τιμές του SIF για σύνθετο επίθεμα των 2 mm είναι περίπου οι μισές σε σχέση με το μεταλλικό επίθεμα. Επίσης παρατηρούμε ότι ακόμη και οι τιμές του SIF για το σύνθετο επίθεμα πάχους 1 mm είναι ολίγο μικρότερες σε σχέση με το μεταλλικό επίθεμα.

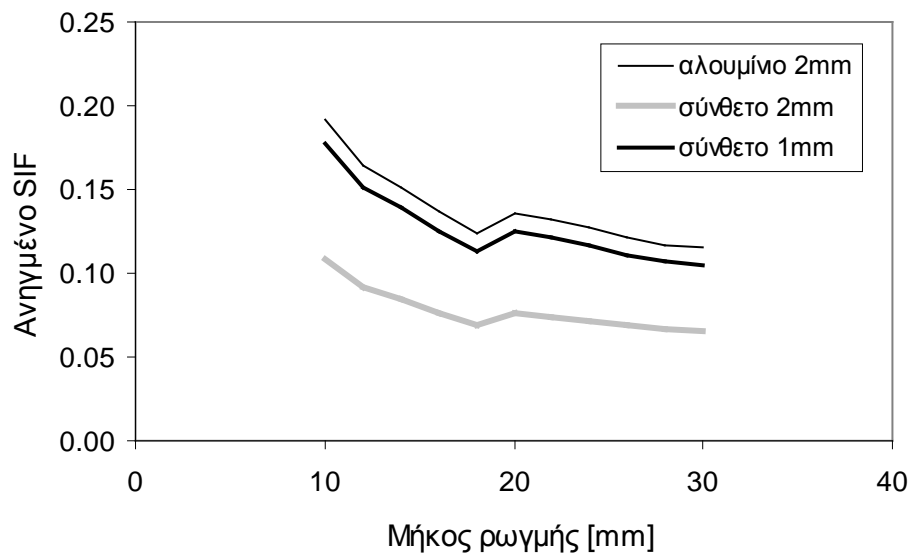
Για λόγους σύγκρισης με τον μη επισκευασμένο δίσκο, παρουσιάζουμε και τις ανηγμένες τιμές του SIF στο Σχήμα 4-18. Οι ανηγμένες τιμές του SIF είναι οι τιμές του SIF του Σχήμα 4-17 διαιρεμένες με την αναλυτική τιμή του SIF όπως υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}$$

Παρατηρούμε ότι η μείωση του SIF λόγω του επιθέματος είναι πολύ σημαντική και για μισό μήκος ρωγμής 30 mm κυμαίνεται από 89% για το μεταλλικό επίθεμα ως 94% για το σύνθετο επίθεμα πάχους 2 mm.



Σχήμα 4-17: Μεταβολή της μέγιστης τιμής του SIF κατά το πάχος του δίσκου συναρτήσει του μισού μήκους ρωγμής (για επίθεμα διαστάσεων 60x60 mm², σ₀=100 Mpa, R=0)



Σχήμα 4-18: Μείωση του SIF λόγω της χρήσης επιθέματος

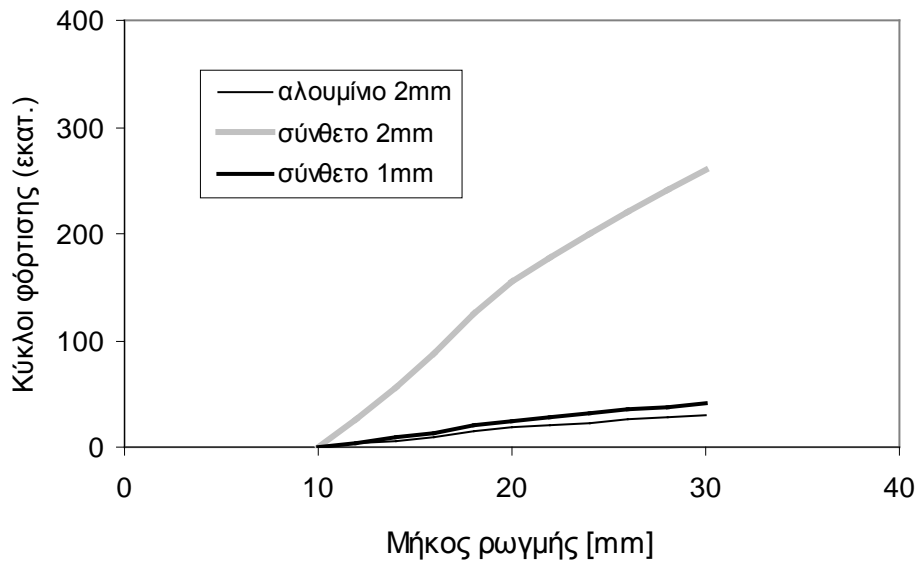
Θεωρώντας σταθερή την τιμή του SIF για κάθε αύξηση ρωγμής (2mm) μπορούμε να υπολογίσουμε αριθμητικά τον αριθμό των κύκλων φόρτισης θεωρώντας τη σχέση

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{CK^n}$$

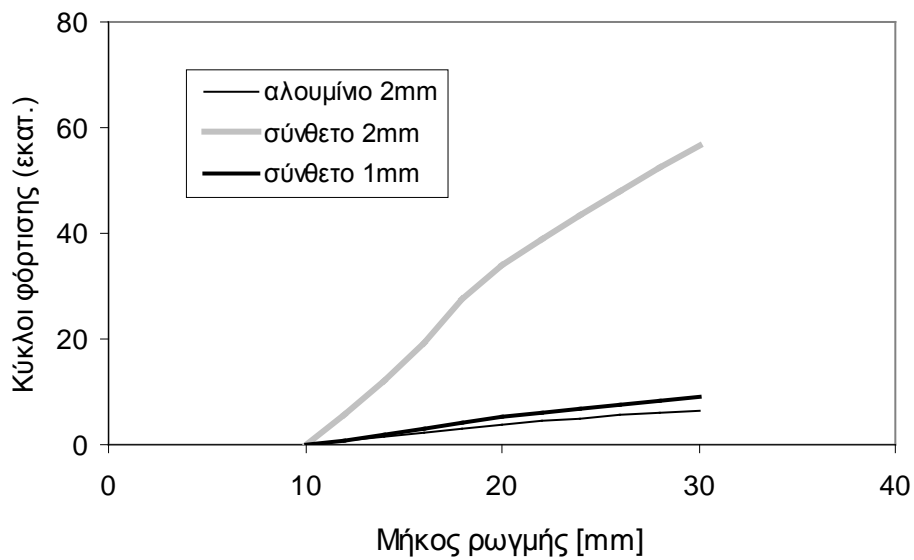
όπου $\Delta a = 2 \text{ mm}$, $C = 7.6 \times 10^{-9}$, $n = 3.76$ και K όπως στο Σχήμα 4-17. Οι παράμετροι C και n είναι για το κράμα αλουμινίου $\text{Al}_{20}\text{Zn}_{24}$ και πάρθηκαν από την αναφορά [21]. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές του SIF που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα ήταν για μια εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_0 = 100 \text{ MPa}$. Εντούτοις, επειδή η ανάλυση είναι ελαστική, μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε τις τιμές του SIF για οποιαδήποτε εφαρμοζόμενη τάση (π.χ. για εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_0 = 200 \text{ MPa}$, οι τιμές του SIF είναι διπλάσιες).

Το άθροισμα όλων των ΔN μας δίνει το συνολικό αριθμό των κύκλων N . Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης συναρτήσεως του μήκους ρωγμής φαίνεται στα Σχήμα 4-19 έως 4.21 για εφαρμοζόμενη τάση 100, 150 και 200 MPa. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την αύξηση της ρωγμής από 10 ως 30 mm κυμαίνεται, στην περίπτωση της τάσης των 100 MPa, από 30 εκατομμύρια για το επίθεμα αλουμινίου μέχρι 260 εκατομμύρια για το σύνθετο επίθεμα πάχους 2 mm. Για εφαρμοζόμενη τάση 200 MPa, οι αντίστοιχες τιμές είναι 2 και 19

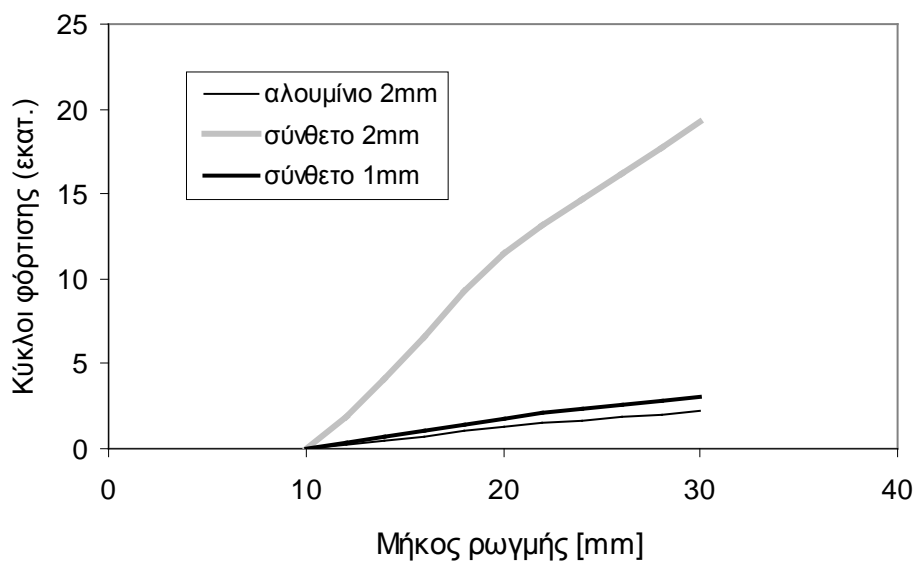
εκατομμύρια κύκλοι φόρτισης. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ακόμα και για το επίθεμα αλουμινίου η επισκευή είναι επιτυχής αφού η διάρκεια ζωής είναι πάρα πολύ μεγάλη σε σχέση με την επιθυμητή που συνήθως για τα αεροπορικά δομικά στοιχεία είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων.



Σχήμα 4-19: Κύκλοι φόρτισης λόγω κόπωσης σε συνάρτηση με την αύξηση του μισού μήκος ρωγμής (για $\sigma_0=100$ Mpa)



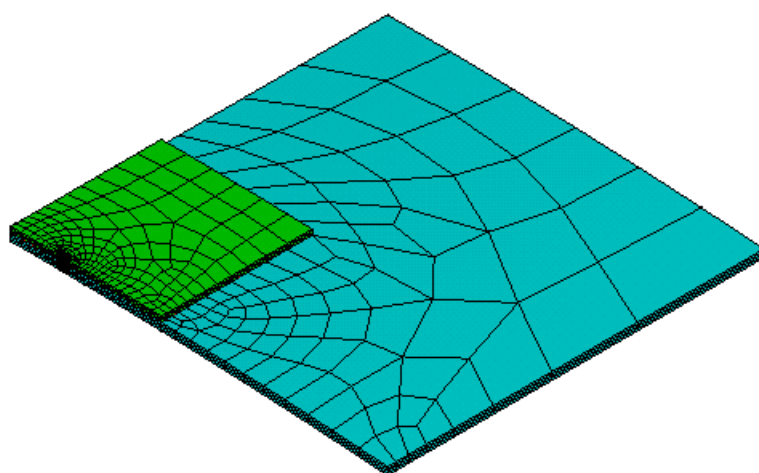
Σχήμα 4-20: Κύκλοι φόρτισης λόγω κόπωσης σε συνάρτηση με την αύξηση του μισού μήκος ρωγμής (για $\sigma_0=150$ MPa)



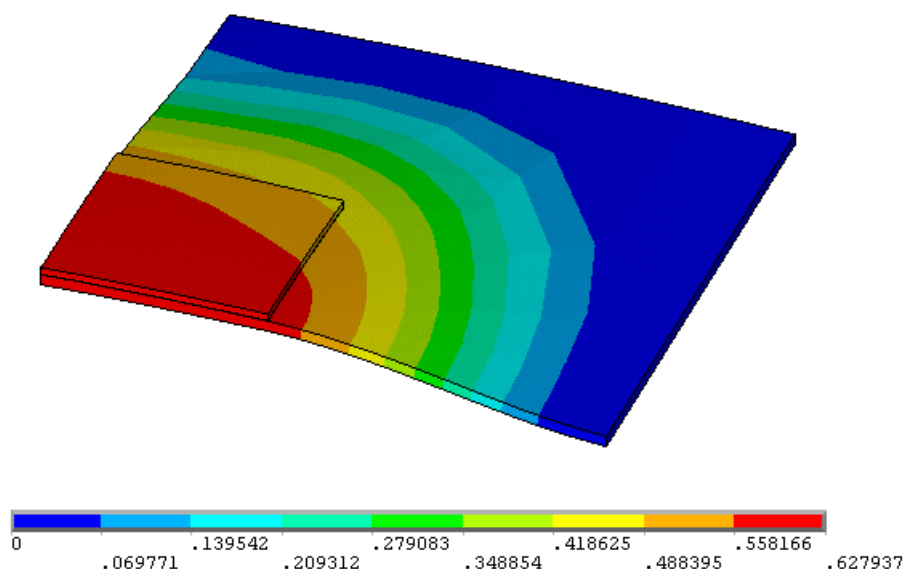
Σχήμα 4-21: Κύκλοι φόρτισης λόγω κόπωσης σε συνάρτηση με την αύξηση του μισού μήκος ρωγμής (για $\sigma_0=200$ MPa)

5 Μοντελοποίηση ρηγματωμένου καμπύλου ελάσματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τη μηχανική συμπεριφορά ενός μεταλλικού καμπύλου ελάσματος που περιέχει μια εφαπτομενική ρωγμή και επισκευάζεται από ένα καμπύλο επίθεμα. Στην περίπτωση αυτή το επίθεμα τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του ελάσματος γιατί αυτή είναι η κοινή πρακτική κατά τις επισκευές των ατράκτων των αεροσκαφών. Θεωρούμε ένα τμήμα της ατράκτου το οποίο έχει διαστάσεις όμοιες με τις διαστάσεις του επίπεδου δίσκου που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (δηλαδή 300 X 300 mm). Το τμήμα αυτό θεωρείται ότι περιέχει μια ρωγμή στο μέσον του και ότι είναι πακτωμένο στην περιφέρειά του. Λόγω συμμετρίας μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το ένα τέταρτο του ελάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Η καμπυλότητα επιλέχθηκε ίση με 2 m, που είναι τυπική ακτίνα ενός μικρού αεροσκάφους. Η φόρτιση είναι εσωτερική πίεση ίση με 0,6 atm (=0,06 MPa). Αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη συμπίεση της καμπίνας των επιβατικών αεροσκαφών όταν πετούν στο μέγιστο ύψος. Τυπική κατανομή των (ακτινικών) εγκάρσιων μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2 για μισό μήκος ρωγμής 20 mm και πλάτος μεταλλικού επιθέματος 60 mm. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση (κόκκινη ζώνη) εμφανίζεται στο μέσο του δοκιμίου και ότι είναι πολύ μικρότερη από την ακτίνα (0,63 mm σε σχέση με 2000 mm).



Σχήμα 5-1: Τυπική διακριτοποίηση του επισκευασμένου καμπύλου ελάσματος



Σχήμα 5-2: Τυπική κατανομή εγκάρσιων μετατοπίσεων λόγω της εσωτερικής πίεσης

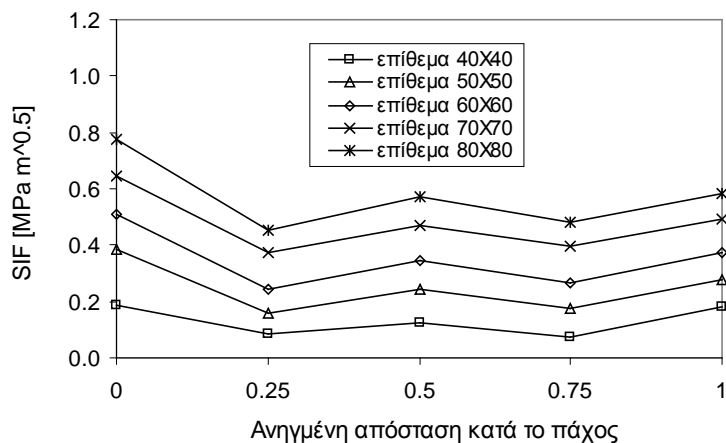
Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών του SIF κατά το πάχος του καμπύλου ελάσματος για μεταλλικό επίθεμα και μισό μήκος ρωγμής 20 mm. Η ίδια κατανομή παρατηρείται και για τα άλλα μήκη ρωγμών. Παρατηρούμε ότι η κατανομή είναι τελείως διαφορετική από αυτή που υπολογίσαμε για το επίπεδο δίσκο. Μάλιστα η αύξηση των διαστάσεων του επιθέματος οδηγεί σε αύξηση των τιμών του SIF. Εντούτοις, η μεταβολή της εγκάρσιας μετατόπισης (ακτινικά) μειώνεται ομαλά με το πλάτος του επιθέματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4.

Στην περίπτωση της επισκευής του καμπύλου δίσκου με σύνθετο επίθεμα, πάχους 2 mm, που φέρει ίνες κάθετες στο επίπεδο της ρωγμής, τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήμα 5-5 και 5.6. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SIF καθώς και της εγκάρσιας μετατόπισης είναι μεγαλύτερες από αυτές που ισχύουν στο καμπύλο έλασμα με μεταλλικό επίθεμα. Η συμπεριφορά αυτή είναι τελείως διαφορετική από αυτή που υπολογίστηκε για το επίπεδο δίσκο όπου υπήρχε σημαντική μείωση του SIF στην περίπτωση του σύνθετου επιθέματος.

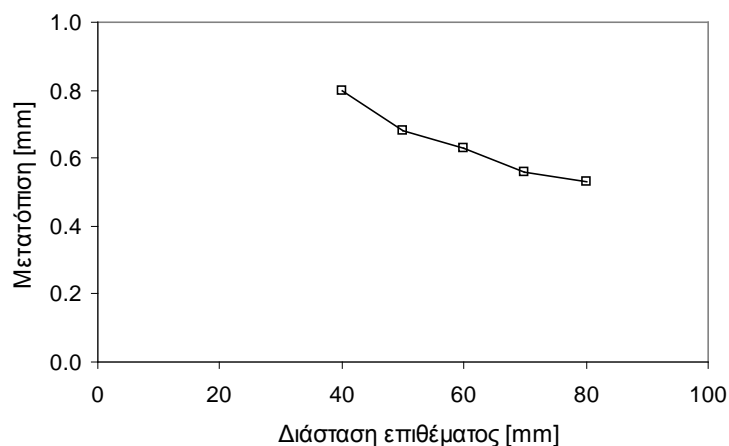
Από την ανάλυση της παραμόρφωσης των καμπύλων ελασμάτων προκύπτει ότι λόγω της ακτινικής παραμόρφωσης δεν είναι μόνο σημαντική η ενίσχυση με ίνες κάθετες στο μήκος της ρωγμής αλλά και η ενίσχυση κατά τη διεύθυνση της ρωγμής. Για να επιβεβαιωθεί αυτή η παρατήρηση, μοντελοποιήθηκε και ένα ψευδοϊσότροπο σύνθετο επίθεμα ($E_x = E_y = 168 \text{ GPa}$, βλέπε και Πίνακας 3-1), το οποίο είναι

ενισχυμένο με δύο στρώσεις με ίνες κάθετες και παράλληλες, εναλλάξ, στο μήκος της ρωγμής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήμα 5-7 και 5.8.

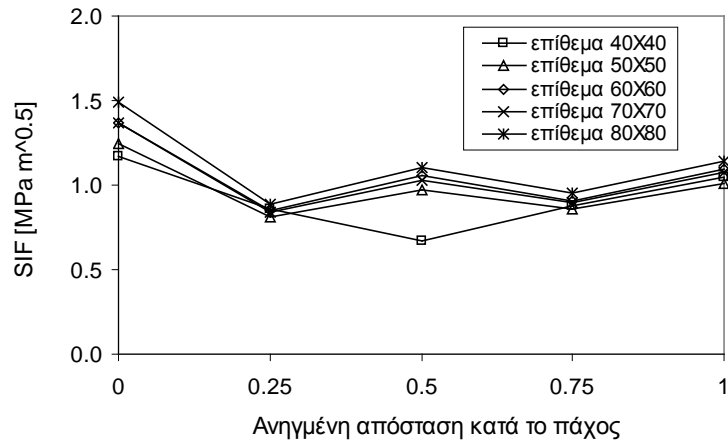
Παρατηρούμε ότι, στη περίπτωση επισκευής με ψευδοϊσότροπο μπάλωμα, οι τιμές του SIF και της εγκάρσιας μετατόπισης μειώνονται σημαντικά και είναι ανάλογες με αυτές του ρηγματωμένου καμπύλου δίσκου με μεταλλικό επίθεμα.



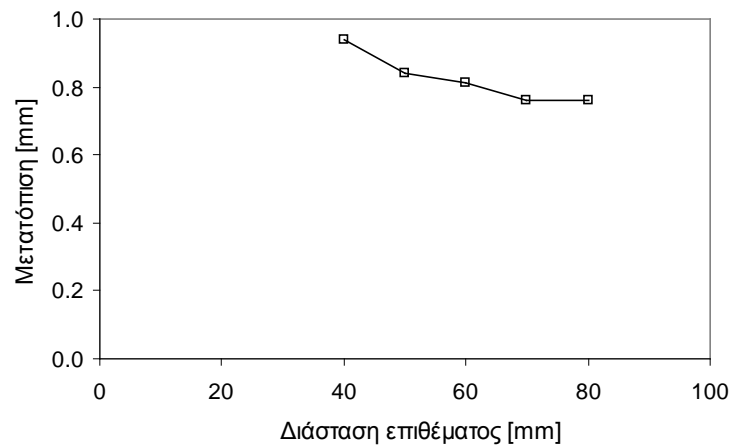
Σχήμα 5-3: Συντελεστής έντασης των τάσεων κατά το πάχος του ρηγματωμένου ελάσματος για μεταλλικό επίθεμα και μισό μήκος ρωγμής $a=20$ mm



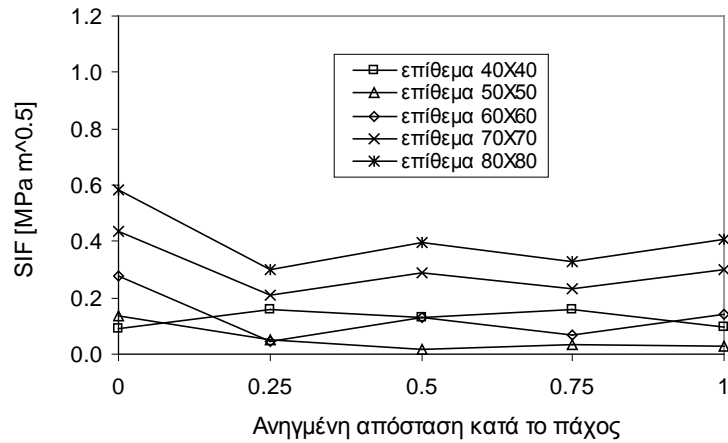
Σχήμα 5-4: Μεταβολή εγκάρσιας μέγιστης μετατόπισης των χειλέων της ρωγμής συναρτήσει της διάστασης του μεταλλικού επιθέματος



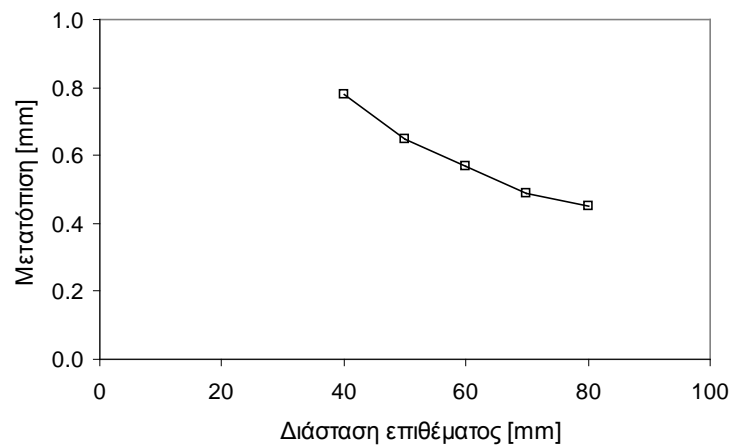
Σχήμα 5-5: Μεταβολή του Συντελεστή έντασης των τάσεων κατά το πάχος του ρηγματωμένου καμπύλου ελάσματος για επισκευή με σύνθετο επίθεμα με ίνες κάθετες στο μήκος της ρωγμής



Σχήμα 5-6: Μεταβολή εγκάρσιας μέγιστης μετατόπισης των χειλέων της ρωγμής συναρτήσει της διάστασης του επιθέματος (σύνθετο με ίνες κάθετες στο μήκος της ρωγμής)



Σχήμα 5-7: Μεταβολή του Συντελεστή έντασης των τάσεων κατά το πάχος του ρηγματωμένου ελάσματος για ψευδοϊσότροπο σύνθετο επίθεμα



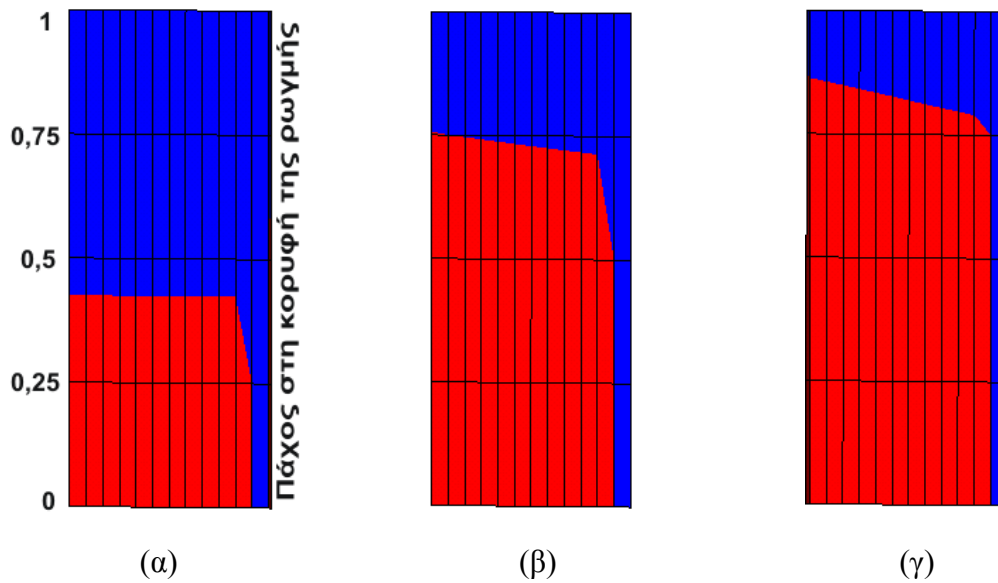
Σχήμα 5-8: Μεταβολή εγκάρσιας μέγιστης μετατόπισης των χειλέων της ρωγμής συναρτήσει της διάστασης του επιθέματος (ψευδοϊσότροπο σύνθετο)

Η μη ομαλή πτώση στις τιμές του SIF κατά το πάχος του καμπύλου δοκιμίου, που φαίνεται στα Σχήματα 5-3, 5-5 και 5-7, απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση αφού σημαίνει ότι τα αποτελέσματα από την ανάλυση επίπεδων ελασμάτων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των τιμών του SIF στα καμπύλα ελάσματα. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι σε μερικές περιπτώσεις η αύξηση των διαστάσεων του επιθέματος οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του SIF.

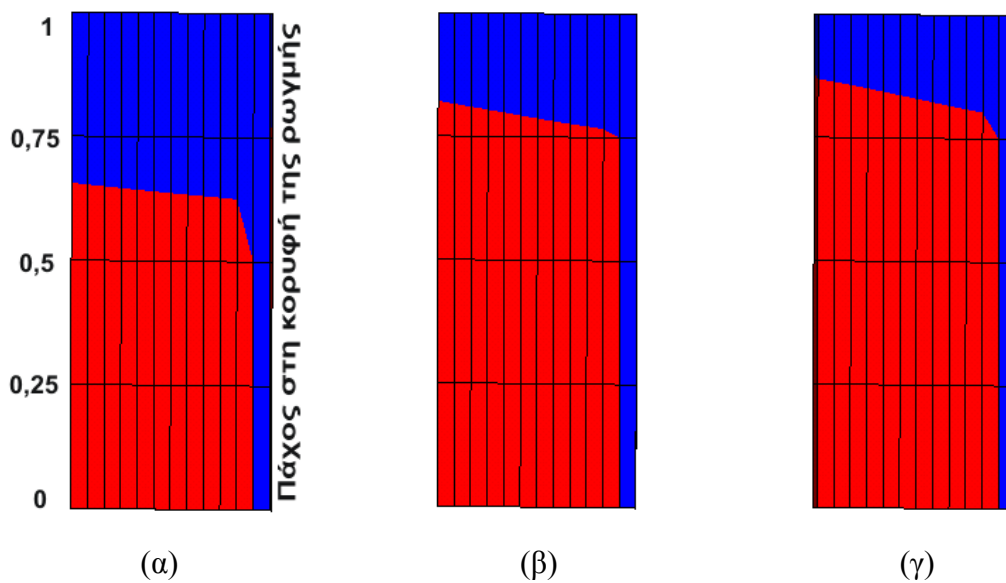
Στη συνέχεια, εξετάστηκε προσεκτικά το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής για όλα τα είδη των επιθεμάτων. Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζεται το «άνοιγμα» των χειλέων της ρωγμής στην περιοχή κοντά στην κορυφή της ρωγμής για μεταλλικό επίθεμα. Η δεξιά ακμή είναι η κορυφή της ρωγμής και το χρώμα δηλώνει θετικό ή αρνητικό «άνοιγμα». Συγκεκριμένα το μπλε χρώμα δηλώνει άνοιγμα των χειλέων ενώ το κόκκινο χρώμα δηλώνει κλείσιμο. Το πάνω μέρος των σχημάτων αντιστοιχεί σε ανηγμένο πάχος =1, δηλαδή είναι η πλευρά που τοποθετείται το επίθεμα. Παρατηρούμε ότι για μικρό επίθεμα η ρωγμή είναι κλειστή για περίπου το μισό πάχος του ελάσματος ενώ για μεγάλο επίθεμα η ρωγμή είναι κλειστή στο μεγαλύτερο μέρος εκτός από την άνω περιοχή (ανηγμένο πάχος =1).

Παρόμοια συμπεριφορά έχουμε για το σύνθετο επίθεμα με ίνες κάθετες στο επίπεδο της ρωγμής (Σχήμα 5-10) καθώς και για το ψευδοϊσότροπο σύνθετο επίθεμα (Σχήμα 5-11). Θα πρέπει να τονιστεί ότι η μελέτη των μετατοπίσεων των χειλέων της ρωγμής είναι αναγκαία καθώς το πρόγραμμα ANSYS μας δίνει τις απόλυτες τιμές του SIF και έτσι δεν μπορούμε να ξέρουμε αν αυτές αντιστοιχούν σε άνοιγμα ή κλείσιμο της ρωγμής (δηλαδή μερική επαφή των χειλέων της ρωγμής). Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογεί την μη ομαλή μεταβολή του SIF κατά το πάχος του ελάσματος που αναφέρθηκε παραπάνω. Συγχρόνως επιβάλει διαφορετική μοντελοποίηση της επισκευής στην περίπτωση καμπύλων ελασμάτων καθώς πρέπει να λάβουμε υπόψη και την επαφή μεταξύ των χειλέων της ρωγμής.

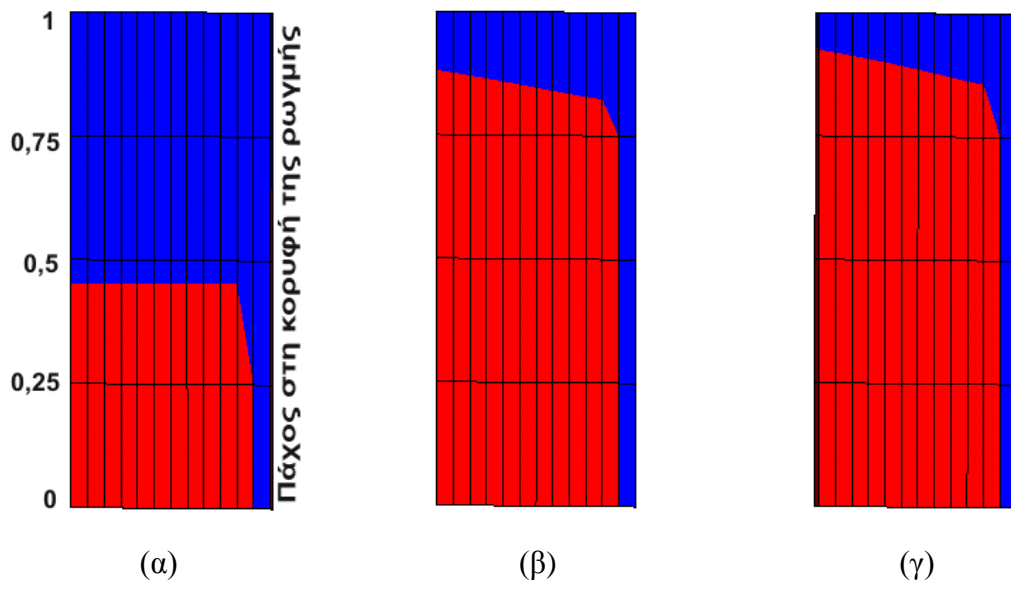
Το σημαντικό εύρημα της παραπάνω μελέτης είναι ότι οι τιμές του SIF στην περίπτωση των επισκευασμένων ρηγματωμένων καμπύλων ελασμάτων είναι μικρότερες από αυτές για τα επίπεδα ελάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός των επιθεμάτων με βάση τα αποτελέσματα των επιπέδων αναλύσεων είναι πολύ συντηρητικός και μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο κόστος υλικού και βάρους.



Σχήμα 5-9: Εγκάρσια μετατόπιση των χειλέων της ρωγμής για μισό μήκος ρωγμής 20 mm και μεταλλικό επίθεμα με διαστάσεις : (α) 40 mm, (β) 60 mm και (γ) 80 mm (Το κόκκινο χρώμα δείχνει την περιοχή που κλείνει η ρωγμή)



Σχήμα 5-10: Σύνθετο επίθεμα με ίνες σε μία διεύθυνση



Σχήμα 5-11: Σύνθετο ψευδοϊσότροπο

6 Συμπεράσματα

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της βέλτιστης επισκευής ενός ρηγματωμένου δίσκου καθώς και ενός ρηγματωμένου καμπύλου ελάσματος με μεταλλικά και σύνθετα επιθέματα. Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Η αύξηση του πάχους και των άλλων διαστάσεων του επιθέματος οδηγούν σε σημαντική μείωση των συντελεστών έντασης των τάσεων.
- Ο συντελεστής έντασης των τάσεων μεταβάλλεται σημαντικά κατά το πάχος του ρηγματωμένου δίσκου και παίρνει την ελάχιστη τιμή στην πλευρά του επιθέματος.
- Τα σύνθετα επιθέματα οδηγούν σε σημαντικότερες μειώσεις του συντελεστή έντασης των τάσεων και σε σχέση με τη φόρτιση κόπωσης απαιτείται επίθεμα μισού πάχους σε σχέση με το μεταλλικό για να έχουμε την ίδια διάρκεια ζωής.
- Σε επισκευασμένα καμπύλα ελάσματα, τα χείλη της ρωγμής κλείνουν λόγω της καμπυλότητας της γεωμετρίας με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των συντελεστών έντασης των τάσεων σε σχέση με τα επίπεδα ελάσματα. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση των αποτελεσμάτων από επίπεδα ελάσματα οδηγεί σε πολύ συντηρητικές σχεδιαστικές λύσεις.
- Σε επισκευασμένα καμπύλα ελάσματα, δεν είναι ικανοποιητική η χρήση σύνθετων επιθεμάτων με ίνες σε μία κατεύθυνση. Τα ψευδοϊσότροπα σύνθετα επιθέματα οδηγούν σε σημαντική μείωση των συντελεστών έντασης των τάσεων.

6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτουν μερικά θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνας:

- Μοντελοποίηση των καμπύλων ρηγματωμένων ελασμάτων παίρνοντας υπόψη και το πιθανό κλείσιμο των χειλέων της ρωγμής (π.χ. θέτοντας στοιχεία επαφής μεταξύ των χειλέων της ρωγμής).

- Εφαρμογή του μοντέλου σε ένα τμήμα της ατράκτου του αεροσκάφους παίρνοντας υπόψη και τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας (π.χ. τα αξονικά και εγκάρσια νεύρα).
- Ανάπτυξη ολοκληρωμένου μοντέλου όπου θα μπορεί να προβλεφθεί τόσο η αποκόλληση του επιθέματος όσο και η διάδοση των ρωγμών.
- Πειραματική μελέτη για την επιβεβαίωση των θεωρητικών προβλέψεων.

7 Βιβλιογραφία

1. **Κερμανίδης, Θεόδωρος.** *Μηχανική των Θραύσεων*. Πάτρα, 2004.
2. **Irwin, G R.** Crack Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate. *Trans. Amer. Soc. Mech. Engns.* 1962, Τόμ. 84, 29Ε, σσ. 651-654.
3. **Callister, William D.** Αρχές Θραυστομηχανικής. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ : ΤΖΙΟΛΑ, 2004, 8, σσ. 251-258.
4. **Barter SA.** Unpublished data, Air Vehicles Division. [επιμ.] Department of Defence. s.l. : Defence Science and Technology Organisation, 12 November 2007. Australia.
5. **Paris, P C και Erdogan, F.** A critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Trans. ASME, J. Basic Eng.* 1963, Τόμ. 85, 4, σ. 528.
6. **Boller, Christian and Buderath, Matthias.** Fatigue in aerostructures - where structural health monitoring can contribute to a complex subject. *Philosophical Transactions of the Royal Society.* 2007, 365, pp. 561-587.
7. **Roach, Dennis και Rackow, Kirk.** Health monitoring of aircraft structures using distributed sensor systems.
8. **Baker AA, Rose LRF, Jones R.** Introduction and Interview. *Advances in the bonded repairs of metallic aircraft structure*. s.l. : Elsevier Science Ltd., 2002, 1.
9. **Papanikos P, Tserpes KI, Pantelakis Sp.** Initiation and progression of composite patch debonding in adhesively repaired cracked metallic sheets. *Composite Structures.* 2007, 81, σσ. 303-311.
10. **Fredell R, Guijt C, Mazza J.** An integrated bonded repair system: A reliable means of giving new life to aging airframes. *Appl Compos Mater.* 1999, 6, σσ. 269-277.
11. **Naboulsi S, Mall S.** Characterization of fatigue crack growth in aluminium panels with a bonded composite patch. *Composite Structures.* 1997, 37, σσ. 321-334.
12. **Denney JJ, Mall S.** Characterization of debond effects on fatigue crack growth behavior in aluminum plate with bonded composite patch. *Eng Fract Mech.* 1997, 57, σσ. 507-525.

13. **Naboulsi S, Mall S.** Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch using the three layer technique. *Composite Structures*. Elsevier, 1996, 35, σσ. 295-308.
14. **Megueni A, Bachir Bouiadjra B, Belhouari M.** Disbond effect on the stress intensity factor for repairing cracks with bonded composite patch. *Comput Mater Sci*. 2004, 29, σσ. 407-413.
15. **Ouinass D, Bouiadjra BB, Serier B.** The effects of disbonds on the stress intensity factor of aluminium panels repaired using composite materials. *Composite Structures*. in press. doi:10.1016/j.compstruct.2005.10.012.
16. **Ouinass D, Bouiadjra BB, Achour B, Benderdouche N.** Modeling of a cracked aluminium plate repaired with a composite octagonal patch in mode I and mixed mode. *Materials and Design*. 2009, 30, σσ. 590-595.
17. **Madani K, Touzain S, Feaugas X, Benguediab M, Ratwani M.** Stress distribution in a 2024-T3 aluminum plate with a circular notch, repaired by a graphite/epoxy composite patch. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2009, 29, σσ. 225-233.
18. **Ait Yala A, Megueni A.** Optimisation of composite patches repairs with the design of experiments method. *Materials and Design*. 2009, 30, σσ. 200-205.
19. **Jones R.** A scientific evaluation of the approximate 2D theories for composite repairs to cracked metallic components. *Composite Structures*. 2009, 87, σσ. 151-160.
20. **ANSYS 10.** Users manual, ANSYS Inc, (2005)
21. **DIALFAST Internal report,** Development of Innovative and Advanced Laminates for Future Aircraft Structure, EC funded project, 2005.