

8. ΑΠΟΦΥΓΗ ΨΑΘΥΡΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ – ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αστοχίες μηχανολογικών κατασκευών (π.χ. δοχεία πίεσης λέβητες, καπνοδόχοι, δίκτυα σωληνώσεων, κ.λ.π.) αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας, καθώς συνοδεύονται πάντα από σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις, αλλά πολλές φορές και από ανθρώπινα θύματα. Ειδικότερα, η περίπτωση του σεισμού, που αποτελεί ένα ξαφνικό και μη προβλέψιμο γεγονός έχει ως αποτέλεσμα μια απότομη μεγάλη ένταση καταπόνηση των στοιχείων μιας μηχανολογικής κατασκευής και μπορεί να δημιουργήσει αστοχίες σε διάφορα κρίσιμα σημεία της κατασκευής, τα οποία είναι κυρίως οι συγκολλήσεις. Οι προκύπτουσες αστοχίες μπορεί να επιφέρουν τοπικές θραύσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε έκλυση χημικών ουσιών επιζήμιων για το περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού ή ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση κατάρρευση της κατασκευής που μπορεί να επηρεάσει γειτονικές συσκευές και εγκαταστάσεις. Το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο αφενός μεν να αναλύσει τα αίτια των αστοχιών λόγω θραύσης και να τα συσχετίσει με την περίπτωση σεισμού, αφετέρου δε να προτείνει κάποιες βασικές οδηγίες για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

Τα κριτήρια στα οποία βασίζεται η μελέτη μιας μεταλλικής κατασκευής ακολουθούν τρεις γενικές βασικές αρχές :

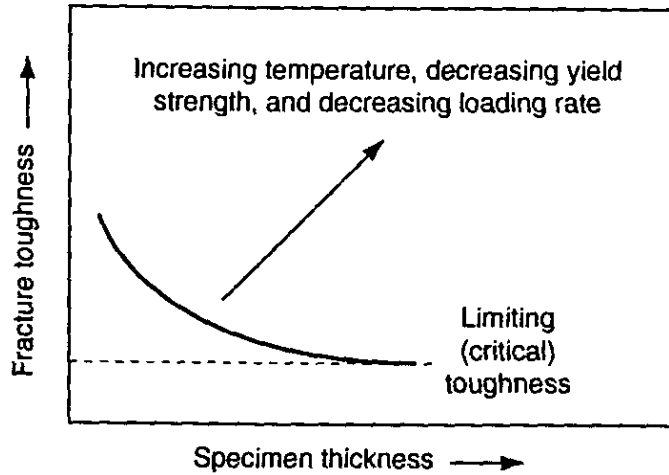
- Να διατηρούνται τα φορτία που δρουν στην κατασκευή κάτω από το όριο διαρροής, ώστε να μη λαμβάνει χώρα παραμόρφωση σε μεγάλη κλίμακα.
- Να διατηρούνται τα φορτία κάτω από το κρίσιμο όριο της δομικής αστάθειας για την αποφυγή λυγισμού (κύρτωση – ήβωσης).
- Να αποφεύγεται η ψαθυρή θραύση.

Οι δύο πρώτες από τις παραπάνω βασικές αρχές μελέτης δεν ασχολούνται με το πρόβλημα της θραύσης και θεωρούν ότι η αντοχή θραύσης είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής και ίση με τη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού (UTS). Ωστόσο, η θραύση μπορεί να συμβεί ακόμη και όταν οι εφαρμοζόμενες μηχανικές τάσεις είναι κάτω από το όριο ροής βάση του οποίου γίνεται η μελέτη μιας κατασκευής. Αυτό συμβαίνει διότι κανένα κατασκευαστικό υλικό δεν είναι τέλειο, αλλά πάντα περιέχει μικρο-ατέλειες (ρήγματα). Ένα κατάλληλο μέγεθος για να περιγραφεί ποσοτικά η αντοχή ενός υλικού κατά τη θραύση, είναι η δυσθραυστότητα η οποία εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν τη θραύση του. Μεγάλη δυσθραυστότητα (fracture toughness) σημαίνει ότι η διάδοση ενός ρήγματος είναι δύσκολη και το υλικό έχει μεγάλη αντοχή σε θραύση. Είναι προφανές ότι η δυσθραυστότητα (fracture toughness) είναι η πλέον κατάλληλη ιδιότητα για να περιγραφεί η αντοχή ενός υλικού σε σεισμό, τούτο διότι κατά την σεισμική διέγερση το υλικό υπόκειται σε έντονες και υψηλές καταπονήσεις και συνεπώς υλικά που διαθέτουν μεγάλες τιμές δυσθραυστότητας δεν οδηγούν σε αστοχίες ή αστοχούν δυσκολότερα.

Η δυσθραυστότητα του υλικού γενικά εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες (σχήμα 8.1) :

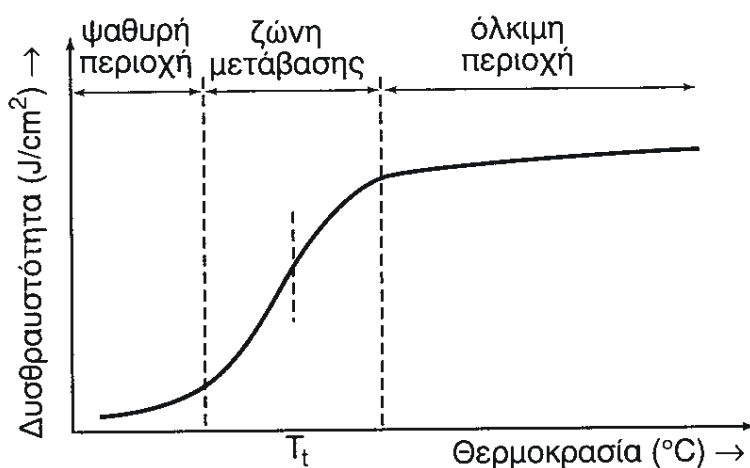
- *Όριο διαρροής*, γενικά είναι αντιστρόφως ανάλογο του ορίου διαρροής.
- *Ρυθμός φόρτισης*, δοκιμές μέτρησης της δυσθραυστότητας σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης δίνουν γενικά πιο χαμηλές τιμές από τις αντίστοιχες που έχουν ληφθεί σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E399 ή E813.
- *Θερμοκρασία λειτουργίας*, ισχύει η μετάβαση όλκιμου-ψαθυρού σε χαμηλές θερμοκρασίες.

- *Πάχος Υλικού*, καθώς το πάχος ενός στοιχείου αυξάνεται η δυσθραυστότητα μειώνεται τουλάχιστον έως μια οριακή τιμή. Γενικά η γεωμετρία ενός στοιχείου μπορεί να μειώσει την δυσθραυστότητα και συνεπώς θα πρέπει να γίνει επαναπροσδιορισμός της ώστε να έχουμε κατά το δυνατόν ακριβή σχεδιασμό.



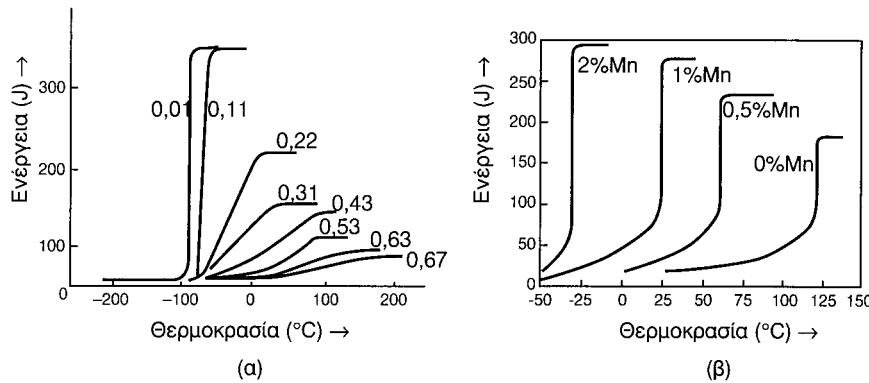
Σχήμα 8.1 : Επίδραση του πάχους, ρυθμού φόρτισης και της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα. Αύξηση του πάχους μειώνει την δυσθραυστότητα σε μια οριακή τιμή. Επιπρόσθετα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία και μειώνοντας τον ρυθμό φόρτισης, η καμπύλη μετακινείται προς υψηλότερες τιμές (ASM, 1992a).

Ο μηχανισμός θραύσης ενός μετάλλου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία. Γενικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες, μικρότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η θραύση των μετάλλων πραγματοποιείται με ψαθυρό τρόπο, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η θραύση συμβαίνει με όλκιμο τρόπο, δηλαδή συνοδευόμενο από σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις πριν την αστοχία. Για κάθε μέταλλο υπάρχει μια χαρακτηριστική θερμοκρασιακή περιοχή μετάβασης από την ψαθυρή στην όλκιμη συμπεριφορά (brittle-to-ductile transition).



Σχήμα 8.2 : Γενική μορφή καμπύλης δυσθραυστότητας-θερμοκρασίας.

Η καμπύλη του σχήματος 8.2 ονομάζεται καμπύλη μετάβασης της δυσθραυστότητας, η έκταση της ζώνης μετάβασης ποικίλει για τα διάφορα μέταλλα και η θερμοκρασία μετάβασης εξαρτάται από τις συνθήκες (ταχύτητα επιβολής φορτίου, γεωμετρία, γεωμετρία εγκοπών, μεταλλουργικούς παράγοντες κ.λ.π.). Στο σχήμα 8.3 παρουσιάζονται καμπύλες μετάβασης της δυσθραυστότητας, για ανοπτημένους χάλυβες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 8.3 : (α) Επίδραση του ποσοστού του περιεχόμενου άνθρακα, στις καμπύλες μετάβασης ανοπτημένων χάλυβων, (β) Επίδραση του ποσοστού του περιεχόμενου μαγγανίου, στις καμπύλες μετάβασης του χάλυβα με σύσταση Fe-Mn-0.05%C (Hrysoulakis and Pantelis, 1996)

Παρατηρούμε ότι χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα, παρουσιάζουν στενότερη περιοχή μετάβασης και ότι η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Όσο το ποσοστό άνθρακα αυξάνει, οι χάλυβες γίνονται περισσότερο ψαθυροί, ενώ κατά την θραύση τους απορροφάται μικρότερο ποσό ενέργειας. Ένας χάλυβας με άριστη συμπεριφορά σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να οδηγηθεί σε ακαριαία αστοχία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κίνδυνοι από την παράβλεψη των καμπυλών μετάβασης στο σχεδιασμό, εντείνονται από το γεγονός ότι η ψαθυρή θραύση επέρχεται χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση. Στην περίπτωση δυναμικών φορτίων, όπως στην περίπτωση σεισμού, η ψαθυρή αυτή θραύση συμβαίνει για πολύ μικρότερες καταπονήσεις από αυτές που προβλέπει μια στατική ανάλυση.

8.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Για την μέτρηση της δυσθραυστότητας ενός υλικού χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, από τις οποίες η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η δοκιμή κρούσης κατά Charpy (Masubuchi, 1980). Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας που ακολουθείται κατά την δοκιμή, προδιαγράφονται από την ASTM (E23-88) (ASTM 1988). Η δοκιμή χρησιμοποιεί ένα δοκίμιο μήκους 55mm και τετραγωνικής διατομής διάστασης 10mm, με μια εγκοπή. Η προδιαγραφή της ASTM ορίζει τρεις τύπους εγκοπών, (1)εγκοπή τύπου V βάθους 2mm, (2)εγκοπή τύπου U βάθους 5mm, και (3)εγκοπή τύπου 'κλειδαρότρυπας'. Η δοκιμή κρούσης κατά Charpy τύπου V χρησιμοποιείται ευρέως στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης και στην Ιαπωνία. Στην Ρωσία και στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης χρησιμοποιείται δοκίμιο με εγκοπή διαφορετικών διαστάσεων και για αυτό το λόγο είναι δύσκολη η σύγκριση δεδομένων που προέρχονται από τις περιοχές αυτές. Για να ληφθεί η καμπύλη μετάβασης πρέπει να γίνουν μετρήσεις σε δοκίμια διαφορετικών θερμοκρασιών. Η θερμοκρασία μετάβασης ορίζεται στο σημείο όπου η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται στο 50% της μέγιστης τιμής.

8.2.1 Ψαθυρή Θραύση Συγκολλητών Κατασκευών

Οι συγκολλητές συνδέσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανικές κατασκευές, ωστόσο σοβαρές αστοχίες μπορούν να συμβούν για τους παρακάτω λόγους:

- Οι συγκολλήσεις μπορεί να έχουν διάφορες ατέλειες όπως ρωγμές, εγκλείσματα σκωρίας κ.λ.π.
- Μεγάλες παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις σε ανθρακοχάλυβες και χαμηλά κραματωμένους χάλυβες υψηλής αντοχής μπορεί να προκαλέσουν καταστροφικές ψαθυρές θραύσεις.

Οι παράγοντες που επιδρούν στην ψαθυρή θραύση είναι αρκετοί, ωστόσο δεν είναι στόχος της παρούσας εργασίας να παρουσιάσει μια πλήρη αναφορά στην ψαθυρή θραύση των συγκολλητών κατασκευών. Για της ανάγκες αυτής της μελέτης, οι παράγοντες, που επιδρούν στην ψαθυρή θραύση, αναφέρονται περιληπτικά στη συνέχεια :

8.2.1.1 Μηχανολογικοί Παράγοντες

- *Εγκοπές και Συγκέντρωση Τάσεων*, Οι μεταβολές της διατομής σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο, το οποίο υποβάλλεται σε εξωτερική φόρτιση, έχει σαν αποτέλεσμα την τροποποίηση της θεωρητικής κατανομής τάσεων που έχει υπολογισθεί κατά τη μελέτη. Έτσι στις εγκοπές δημιουργείται πάντα συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Οι εγκοπές μπορεί να είναι κατασκευαστικό στοιχείο ή επακόλουθο κάποιας κατεργασίας. Στις τελευταίες ανήκουν τα σφάλματα συγκολλήσεων (ρωγμές, εγκλείσματα, πόροι) καθώς και χτυπήματα, σημάδια από έναυση τόξου συγκόλλησης κ.λ.π.
- *Θερμοκρασία*, ο πιο σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της κατασκευής. Πολλά μεταλλικά κράματα, μεταβαίνουν από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά με την πτώση της θερμοκρασίας. Για αρκετούς κατασκευαστικούς χάλυβες, η μετάβαση αυτή συμβαίνει με μικρή μόνο πτώση της θερμοκρασίας από τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος, και παρατηρείται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές.
- *Ταχύτητα Φόρτισης και Κρούση*, οι χαλύβδινες συγκολλητές κατασκευές, οι οποίες παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά κάτω από στατικά φορτία ή φορτία τα οποία υποβάλλονται με χαμηλή ταχύτητα, αστοχούν με ψαθυρή θραύση, όταν υποβληθούν σε ξαφνικές φορτίσεις ή κρουστικά φορτία. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του ορίου ροής με την ταχύτητα της παραμόρφωσης και σχετίζεται άμεσα με την περίπτωση σεισμού όπου έχουμε ξαφνική φόρτιση υψηλής ταχύτητας.
- *Μέγεθος Κατασκευής και Τριαξονικές Εντατικές Καταστάσεις*, η ψαθυρή θραύση είναι πιο πιθανό να συμβεί σε βαριές παρά σε ελαφρές κατασκευές για δεδομένη φόρτιση και θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στην κατανομή των τάσεων και σε μεταλλουργικούς παράγοντες. Στα μεγάλα πάχη ελασμάτων εμφανίζονται τριαξονικές εντατικές καταστάσεις, οι οποίες περιορίζουν την πλαστική παραμόρφωση και ευνοούν την ψαθυρή θραύση.
- *Εργοσκλήρυνση*, οι μηχανουργικές κατεργασίες και οι κατεργασίες διαμόρφωσης, δημιουργούν τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις. Αυτό προκαλεί εργοσκλήρυνση του υλικού, παράγοντας που οδηγεί σε ψαθυροποίηση.

8.2.1.2 Μεταλλουργικοί παράγοντες

- *Μέγεθος Κόκκου*, η ψαθυρή θραύση από διάσχιση ευνοείται από μεγάλο μέγεθος κόκκου, το οποίο είναι αποτέλεσμα της κατεργασίας χύτευσης ή μη αποτελεσματικής θερμικής κατεργασίας.
- *Μη Μεταλλικές Προσμίξεις*, η ψαθυροποίηση ευνοείται από την παρουσία στους χάλυβες μη μεταλλικών προσμίξεων σε υπέρμετρες ποσότητες, όπως άζωτο, οξυγόνο, υδρογόνο, θείο και φώσφορος.
- *Εγκλείσματα*, τα μη μεταλλικά εγκλείσματα επηρεάζουν τη δυσθραυστότητα των χαλύβων. Η επίδραση τους εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την κατανομή των εγκλεισμάτων σε σχέση με τις επιβαλλόμενες μηχανικές τάσεις.
- *Θερμικές Κατεργασίες*, οι θερμικές κατεργασίες επιδρούν δραστικά στις ιδιότητες των χαλύβων συμπεριλαμβανομένων και αυτών που εφαρμόζονται από συνήθεια στην πράξη όπως η αποτακτική ανόπτηση.
- *Κατεργασία Αποξείδωσης*, οι πλήρως καθησυχασμένοι χάλυβες είναι πιο δύσθραυστοι από τους ημισυχασμένους χάλυβες, οι οποίοι είναι πιο δύσθραυστοι από τους μη αποξειδωμένους χάλυβες.
- *Επιφανειακά Ελαττώματα*, τα επιφανειακά ελαττώματα, όπως τρήματα, δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων και είναι επομένως ανεπιθύμητα.

8.2.1.3 Παράγοντες Σχετικοί με την Κατεργασία της Συγκόλλησης

- Δημιουργία ελαττωμάτων, που δεν υπάρχουν στο μέταλλο βάσης.
- Τροποποίηση του υλικού στην περιοχή γύρω από τα ελαττώματα, με αποτέλεσμα την τοπική μείωση της δυσθραυστότητας.
- Γενική μείωση της δυσθραυστότητας στη ζώνη θερμικής επιρροής.
- Δημιουργία μετάλλου συγκόλλησης με διαφορετική αντοχή και δυσθραυστότητα από το μέταλλο βάσης.
- Εισαγωγή παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Οι εγκοπές, οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως αποτελούν ένα κρίσιμο σημείο έναρξης ρωγμών. Όταν ένας χάλυβας περιέχει μια οξεία εγκοπή και η θερμοκρασία είναι χαμηλή, η εγκοπή μπορεί να αποτελέσει ένα σημείο έναρξης ρωγμών και να προκαλέσει ψαθυρή θραύση στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ψαθυροποίηση λόγω εγκοπών. Η θερμοκρασία όπου η μορφή της θραύσης αλλάζει από διατμητική σε διάσχιση είναι η προαναφερθείσα θερμοκρασία μετάβασης. Η θερμοκρασία μετάβασης χρησιμοποιείται συχνά για να εκφραστεί η ευαισθησία του υλικού στις εγκοπές ή καλύτερα στην ψαθυροποίηση λόγω εγκοπών.

8.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Η ψαθυρή θραύση περιλαμβάνει δύο φάσεις, την πυρήνωση και τη διάδοση ενός ρήγματος. Η πυρήνωση ή η προέλευση των ρηγμάτων σχετίζεται κυρίως με κατασκευαστικές ασυνέχειες και ελαττώματα συγκολλήσεων. Χαρακτηριστικές είναι οι αστοχίες σιδηρών κατασκευών κατά το Σεισμό στο Northridge California (17-01-1994), σε αρκετές περιπτώσεις συνέβησαν ψαθυρές θραύσεις όπου τα ρήγματα άρχισαν κοντά σε συνδέσεις ή κόμβους και με σχετικά χαμηλά φορτία, τα οποία στη συνέχεια αναπτύχθηκαν προς διάφορες κατευθύνσεις (Moncarz et al. 2001, Tide 1998).

Παρακάτω παρουσιάζεται η προέλευση ρηγμάτων για διάφορες αστοχίες βιομηχανικών κατασκευών που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν. Οι αστοχίες αυτές δεν οφείλονται σε σεισμό, αλλά μπορούν να δείξουν την σπουδαιότητα του υλικού και της επίπτωσης μίας ψαθυρής θραύσης στην στατική επάρκεια μίας ειδικής μεταλλικής κατασκευής.

- *Θραύση Δοχείου Πίεσης, Chinon, Γαλλία, (1962)*, το ρήγμα ξεκίνησε από τη ζώνη θερμικής επιρροής μιας περιφερειακής συγκόλλησης και διαδόθηκε στο μέταλλο βάσης του οποίου η δυσθραυστότητα είχε μειωθεί από παρατεταμένη θερμική κατεργασία αποτακτικής ανόπτησης (Lamiral and Lesler, 1962).
- *Θραύση Δοχείου Πίεσης, Immingham, Αγγλία, (Δεκέμβριος 1965)*, η θραύση ξεκίνησε από τρία προϋπάρχοντα ρήγματα στη ζώνη θερμικής επιρροής συγκολλήσεων. Οι συγκολλήσεις είχαν υπόστει τοπική αποτακτική ανόπτηση. Επίσης το μέταλλο συγκόλλησης είχε χαμηλή δυσθραυστότητα λόγω ακατάλληλης κατεργασίας τοπικής αποτακτικής ανόπτησης (BWRA, 1966).
- *Πλατφόρμα Αντλησης Πετρελαίου Sea Gem, (Δεκέμβριος 1965)*, η κατάρρευση οφειλόταν σε θραύση των δοκών σε τάσεις χαμηλότερες από το όριο διαρροής του υλικού. Σε συγκολλήσεις επιδιόρθωσης βρέθηκαν ρήγματα, ενώ οι δοκιμές κρούσης έδειξαν χαμηλές τιμές ενέργειας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία τη μέρα της αστοχίας ήταν χαμηλή (HMSO, 1967).
- *Πλατφόρμα Alexander L. Kieland', Νορβηγία, (Μάρτιος 1980)*, η θραύση προήλθε από προϋπάρχον ρήγμα σε συγκόλληση, η οποία επιπλέον παρουσίασε ατελή διείσδυση. Επίσης, ο χάλυβας παρουσίασε χαμηλή δυσθραυστότητα στη διεύθυνση του πάχους των ελασμάτων (Moan, 1980).
- *Αστοχία Δεξαμενής Αποθήκευσης Πετρελαίου, Saskatchewan, Καναδάς, (Δεκέμβριος 1980)*, το ρήγμα ξεκίνησε από μια συγκόλληση, η οποία παρουσίασε ατελή διείσδυση και πόρους με ρήγματα. Οι μηχανικές ιδιότητες και η χημική ανάλυση του χάλυβα ήταν εντός προδιαγραφών, ωστόσο ο λόγος Mn/C ήταν πολύ χαμηλός με αποτέλεσμα ο χάλυβας να έχει χαμηλή δυσθραυστότητα. Επίσης, οι δοκιμές κρούσης έδειξαν ότι ο συγκεκριμένος χάλυβας είχε υψηλή θερμοκρασία μετάβασης (10-15°C), ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν -27°C (Lain Le May, 1982).



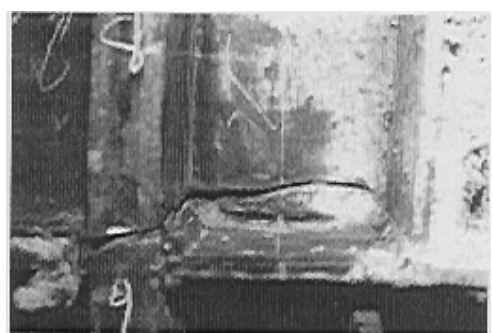
Θραύση στη ζώνη θερμικής επιρροής.



Θραύση σε φλάντζα στήλης στήριξης



Θραύση σε φλάντζα στήλης στήριξης



Θραύση σε πέλμα δοκού στήριξης.

Σχήμα 8.4 : Αστοχίες συγκολλητών συνδέσεων

8.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ

Οι παραπάνω παρατηρήσεις δείχνουν ότι είναι αδύνατο αφενός να αποφευχθούν και αφετέρου να ανιχνευτούν με πλήρη αξιοπιστία οι ατέλειες μίας μεταλλικής βιομηχανικής κατασκευής, δεδομένου ότι:

- Οι κατασκευές αυτές υπόκεινται σε μεγάλες πιέσεις και θερμικά φορτία, κυκλικής μορφής, οπότε καταπονούνται σε φορτία κόπωσης καθόλη την διάρκεια ζωής τους
- Η διάβρωση των κατασκευών αυτών αλλοιώνει σημαντικά τα αρχικά μηχανικά χαρακτηριστικά του μεταλλικού υλικού
- Η δυνατότητα επιθεώρησης δεν είναι πάντοτε εφικτή και, σε κάθε περίπτωση γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, τα οποία δεν μπορούν να καλύψουν πάντοτε την πιθανότητα ενός σεισμικού συμβάντος

Επομένως για να εξασφαλιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό η αντοχή ενός υλικού έναντι ψαθυρής θραύσης απαιτείται μία ικανοποιητική τιμή της δυσθραυστότητας του υλικού. Αρχικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί ικανοποιητική αντίσταση στην πυρήνωση και διάδοση ενός ρήγματος με την επιλογή ενός υλικού με προδιαγεγραμμένη μέγιστη τιμή ενέργειας κρούσης κατά Charpy στην χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία λειτουργίας.

Ωστόσο ακόμα και αν η αρχική δυσθραυστότητα του χάλυβα είναι ικανοποιητική, είναι δυνατό να μειωθεί σημαντικά με την εφαρμογή λανθασμένων διαδικασιών αποτακτικής ανόπτησης και συγκόλλησης. Η θερμική κατεργασία αποτακτικής ανόπτησης, η οποία εφαρμόζεται για την μείωση των παραμενουσών τάσεων, μπορεί να μειώσει την δυσθραυστότητα του βασικού μετάλλου και της ζώνης θερμικής επιρροής καθώς και να δημιουργήσει ρηγμάτωση επαναθέρμανσης εάν δεν γίνει σωστά. Κατά την διαδικασία συγκόλλησης ο έλεγχος της προθέρμανσης και της εισροής θερμότητας είναι πολύ σημαντικός καθώς λανθασμένες διαδικασίες μπορεί να οδηγήσουν σε ψαθυροποίηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

Για την ορθή αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων, ο σχεδιαστής-μηχανικός κατά την επιλογή υλικών πρέπει να προϋποθέτει την ύπαρξη ρηγμάτων στην κατασκευή. Η μεθοδολογία μελέτης βασίζεται στην κρίσιμη συνθήκη θραύσης, η οποία στην απλή της μορφή δίνεται από τον κλασικό τύπο της μηχανικής των θραύσεων:

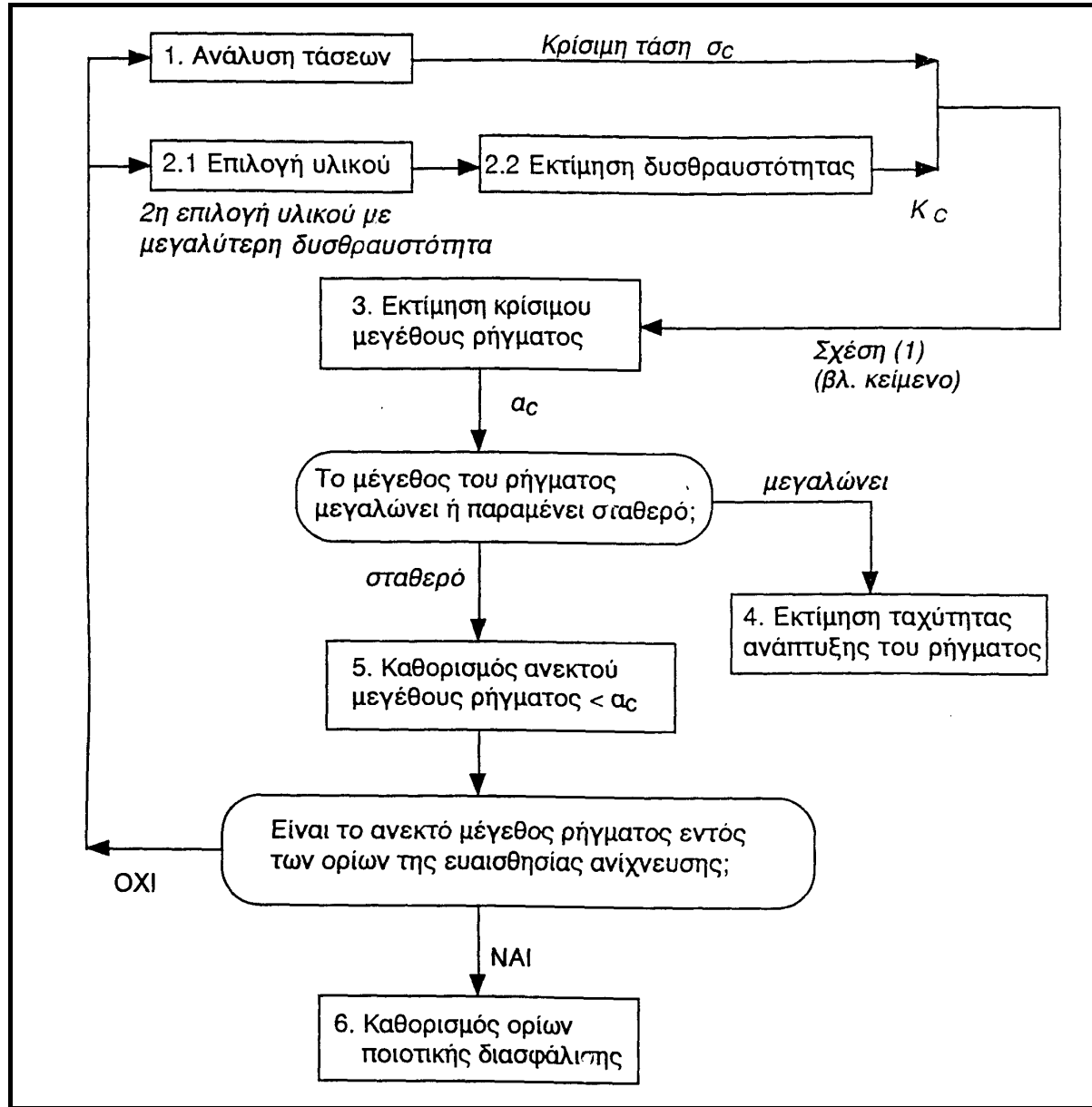
$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = K_c$$

όπου K ο συντελεστής έντασης τάσεων, σ η τάση σχεδιασμού, a το επιτρεπόμενο μέγεθος ρήγματος ή το ελάχιστο ανιχνεύσιμο με μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου και K_c η δυσθραυστότητα του υλικού (ιδιότητα του υλικού). Από την παραπάνω σχέση μπορούμε

- (α) να υπολογίσουμε το επιτρεπόμενο μέγεθος ρήγματος για ένα υλικό με γνωστή δυσθραυστότητα είτε
- (β) να επιλέξουμε υλικό με τέτοια τιμή δυσθραυστότητας ώστε να μην αστοχήσει για δεδομένη εφαρμοζόμενη τάση και μέγεθος ρήγματος.

Η μεθοδολογία επιλογής του υλικού σε σχέση με την δυσθραυστότητά του περιγράφεται στο διάγραμμα 8.5.

Πλην της απαίτησης της δυσθραυστότητας, θα πρέπει να πληρούνται και όλες οι υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας π.χ. για αντοχή σε διάβρωση, υψηλές θερμοκρασίες κλπ. Οι φωτογραφίες 8.5 και 8.6 δείχνουν χαρακτηριστικές κατασκευές που έχουν υποστεί διάβρωση, και οι οποίες οφείλουν να αντικατασταθούν. Προφανώς, η μη έγκαιρη διάγνωση της διάβρωσης ενδέχεται να αποβεί μοιραία στην περίπτωση ενός ισχυρού σεισμού.



Διάγραμμα 8.5: Επιλογή υλικού με βάση την δυσθραυστότητα (Haidemenopoulos, 1994)

8.5 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Στις υπόψη κατασκευές θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή διαδικασιών συγκόλλησης. Γενικά, οι κυριότερες μέθοδοι συγκολλήσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Συγκόλληση με αέριο και κοπή με οξυγόνο
- Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding, SMAW)
- Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)
- Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)
- Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Submerged Arc Welding, SMAW)
- Αυτόματες μέθοδοι κατακόρυφης συγκόλλησης (Vertical Automatic welding processes)
- Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (Plasma Arc Welding, PAW)

Η επιλογή μεθόδων συγκόλλησης εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα παραγωγής, το κόστος εγκατάστασης, τη δυσθραυστότητα του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης και τις θέσεις συγκόλλησης. Μια συνοπτική σύγκριση των προαναφερθέντων τρόπων συγκόλλησης δίνεται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1 : Σύγκριση διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης, (1 καλύτερη, 6 χειρότερη) (Papazoglou, 1987)

	Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια	Βαρύτητα ς	Βυθισμένου τόξου	Αυτόματες μέθοδοι	GMAW	GTAW
Ταχύτητα παραγωγής	5	3	2	1	4	6
Κόστος εγκατάστασης	1	2	5	6	4	3
Δυσθραυστότητα μετάλλου συγκόλλησης	3	4	5	6	2	1
Θέσεις Συγκόλλησης	όλες	Επίπεδη & επίπεδη μετωπική	Επίπεδη	κατακόρυφη	όλες	όλες
	Η πιο ευέλικτη μέθοδος	πιο απλή	Μεγάλη παραγωγικότητα	Δεν απαιτείται ακρίβεια στην διαμόρφωση των ακμών	Εύκολη αυτοματοποίηση	

Ειδικά για την περίπτωση της δυσθραυστότητας, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός απόθεσης μετάλλου σε μια μέθοδο συγκόλλησης, τόσο χαμηλότερη είναι η δυσθραυστότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Έτσι για παράδειγμα είναι πιθανή η χρήση της μεθόδου GTAW σε συγκολλήσεις χαλύβων πολύ υψηλής αντοχής.

Οι περισσότεροι αναγνωρισμένοι κώδικες, πρότυπα και προδιαγραφές, που καλύπτουν την πιστότητα διαδικασιών συγκόλλησης είναι οι εξής (ASM 1992b) :

- Κεφάλαιο IX του κώδικα για δοχεία πίεσης και λέβητες της Αμερικανικής Κοινότητας Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME).

- Εθνικό Αμερικανικό Ινστιτούτο Προτύπων / Αμερικανική Κοινότητα Συγκολλήσεων (ANSI/AWS) B2.1, Πρότυπα Διαδικασιών Συγκόλλησης.
- ANSI/AWS D1.1 Κατασκευαστικός Κώδικας Συγκολλήσεων Χάλυβα
- ANSI/AWS D1.3 Κατασκευαστικός Κώδικας Συγκολλήσεων για Ελάσματα Χάλυβα
- API 1104, Πρότυπα για συγκολλητές σωληνώσεις και σχετιζόμενες εγκαταστάσεις.

8.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ – ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μια διαδικασία πρόληψης θραύσης των κατασκευαστικών στοιχείων θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει τακτικές εντοπισμού και μέτρησης των ρωγμών, στοιχεία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της τάσης στην οποία το υλικό αστοχεί. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων οι καταστρεπτικές και οι μη καταστρεπτικές. Οι κυριότερες από αυτές αναφέρονται στους πίνακες 8.2 και 8.3.

Πίνακας 8.2 : Μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου ΜΚΕ (Non destructive Tests, NDT) (ASM 1992b)

Μέθοδος	Εφαρμογές
Άμεσες	
Οπτική	Εφαρμόσιμη μόνο σε σημεία με εύκολη πρόσβαση. Εντοπισμός μικρών ρωγμών απαιτεί μεγάλη εμπειρία.
Διεισδυτικά υγρά	Εφαρμόσιμη μόνο σε σημεία με εύκολη πρόσβαση. Ευαισθησία της ίδιας τάξης με την οπτική μέθοδο.
Μαγνητικά Σωματίδια	Εφαρμόσιμη μόνο σε μαγνητικά υλικά. Τα κομμάτια πρέπει να αποσυναρμολογηθούν για να εξετασθούν. Εγκοπές και άλλες ανωμαλίες δίνουν ενδείξεις. Ευαίσθητη μέθοδος.
Ακτίνες Χ	Μεγάλη ευελιξία και ευαισθησία. Προβλήματα σε ρωγμές με μορφή λωρίδων ή στο άκρο στηρίξεων. Επιφανειακά ρήγματα σε χοντρές πλάκες, δύσκολο να εντοπιστούν.
Έμμεσες	
Υπέρηχοι	Γενική και ευέλικτη μέθοδος. Στοιχεία για το μέγεθος και την φύση των ρωγμών δύσκολο να ληφθούν.
Δινορεύματα	Φτηνή και εύκολα εφαρμοζόμενη μέθοδος. Ευαίσθητη μέθοδος όταν εφαρμόζεται από έμπειρα άτομα. Παρέχει λίγες ή και καθόλου πληροφορίες για το μέγεθος και την φύση των ρωγμών.
Ακουστική Εκπομπή	Ο έλεγχος πρέπει να γίνει όταν η κατασκευή είναι υπό φορτίο. Δυνατή η συνεχής επιτήρηση. Απαιτείται ακριβός εξοπλισμός.

Πίνακας 8.3 : Καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου (Destructive Tests), (ASM 1992c)

Μηχανικές Δοκιμές

Δοκιμές Εφελκυσμού

Δοκιμές Κρούσης

(Charpy)

Δοκιμή κάμψης

Δοκιμή Σκληρότητας

Μεταλλογραφικές Τεχνικές

Έλεγχος Μικροδομής

Έλεγχος Μακροδομής

Οι παραπάνω μέθοδοι είναι γενικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για το υλικό κατασκευής, όσο και για τις συγκολλητές συνδέσεις. Γενικά, η πραγματοποίηση ενός μη καταστρεπτικού ελέγχου γίνεται για δύο λόγους :

- Έλεγχος Ποιότητας, παρακολούθηση της ικανότητας του συγκολλητή, της αποδοτικότητας του εξοπλισμού συγκόλλησης, της μεθόδου συγκόλλησης καθώς και της ποιότητας του υλικού βάσης και του υλικού συγκόλλησης.
- Αποδοχή ή απόρριψη μιας συγκόλλησης με βάση την καταλληλότητα της, κάτω από τις λειτουργικές συνθήκες της κατασκευής.

8.6.1 Επιλογή Μεθόδου

Τα κριτήρια που επιδρούν στην τελική επιλογή του κατάλληλου μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλητών κατασκευών είναι οι εξής,

- *Χαρακτηριστικά των ατελειών.* Επειδή οι ΜΚΕ βασίζονται σε κάποια φυσικά φαινόμενα οι φυσικές ιδιότητες των ατελειών πρέπει να περιγραφούν με πιο σημαντικές αυτές που έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ υλικού βάσης και συγκόλλησης.
- *Απαιτήσεις θραυστομηχανικής.*
- *Περιορισμοί κατά την εφαρμογή,* όπως το μέγεθος του προς εξέταση κομματιού, η δυνατότητα πρόσβασης του εξοπλισμού στα διάφορα σημεία της κατασκευής, γεωμετρία κατασκευής, διαθέσιμος χρόνος εξέτασης, περιβάλλον καθώς και ο χαρακτήρας του έλεγχου (κατά την κατασκευή, συνεχής, περιοδικός).

8.6.2 Ακρίβεια ΜΚΕ

Η ακρίβεια είναι το χαρακτηριστικό μιας τεχνικής και προσδιορίζει την ορθότητα των αποτελεσμάτων της, εντός των ορίων μέτρησης της. Μια τεχνική είναι υψηλής ακρίβειας όταν οι ενδείξεις της είναι σωστές. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η τεχνική εντόπισε όλες τις ατέλειες αλλά ότι αυτές που εντόπισε όντως υφίστανται.

8.6.3 Ευαισθησία ΜΚΕ

Η ευαισθησία αναφέρεται στην ικανότητα της τεχνικής να εντοπίζει ατέλειες είτε μικρού μεγέθους, είτε με ιδιότητες παρόμοιες του μετάλλου. Γενικά, όσο αυξάνεται η ευαισθησία μιας μεθόδου τόσο μειώνεται η ακρίβεια της αφού αυξάνεται η πιθανότητα λανθασμένων ενδείξεων.

8.6.4 Αξιοπιστία ΜΚΕ

Η αξιοπιστία αποτελεί ένα συνδυασμό ακρίβειας και ευαισθησίας. Τρεις παράγοντες επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός ΜΚΕ, η διαδικασία ελέγχου (συμπεριλαμβάνεται το είδος του εξοπλισμού ελέγχου), ανθρωπιοι παράγοντες (εκπαίδευση, εμπειρία χειριστή) και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η μη βαθμονόμηση των οργάνων, η λανθασμένη εφαρμογή της τεχνικής και η μη συμβατότητα του εξοπλισμού επιδρά στην ακρίβεια και σε ορισμένες περιπτώσεις στην ευαισθησία μιας τεχνικής. Ωστόσο, συνήθεις ανθρωπιοι παράγοντες όπως η απώλεια συγκέντρωσης κατά τον έλεγχο μπορούν να μειώσουν την αξιοπιστία της. Έτσι η ικανότητα αυτού που διεξάγει τον έλεγχο, θα πρέπει να είναι πιστοποιημένη από κάποιο οργανισμό που παρέχει τέτοιου είδους πιστοποιητικά όπως η ASNT (American Society of Non-Destructive Testing). Υψηλή ευαισθησίας μέτρηση με χαμηλή ακρίβεια είναι πολύ χειρότερη από πλευράς αξιοπιστίας σε σύγκριση με μια χαμηλής ευαισθησίας μέτρηση με υψηλή ακρίβεια.