

# Επιστήμη και Τεχνολογία

## Συγκολλήσεων

Ενότητα 9: Θραύση και κόπωση συγκολλήσεων

Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Πολυτεχνική Σχολή

Μηχανολόγων Μηχανικών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σκοποί ενότητας

---

- Αναδρομή σε αστοχίες συγκολλητών κατασκευών
- Εισαγωγή στη θραύση και κόπωση των μετάλλων και ανάλυση της θραύσης και κόπωσης των συγκολλήσεων

# Περιεχόμενα ενότητας

---

1. Εισαγωγή
2. Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων
3. Κόπωση στις συγκολλήσεις

---

## Ενότητα 9: Θραύση και κόπωση συγκολλήσεων

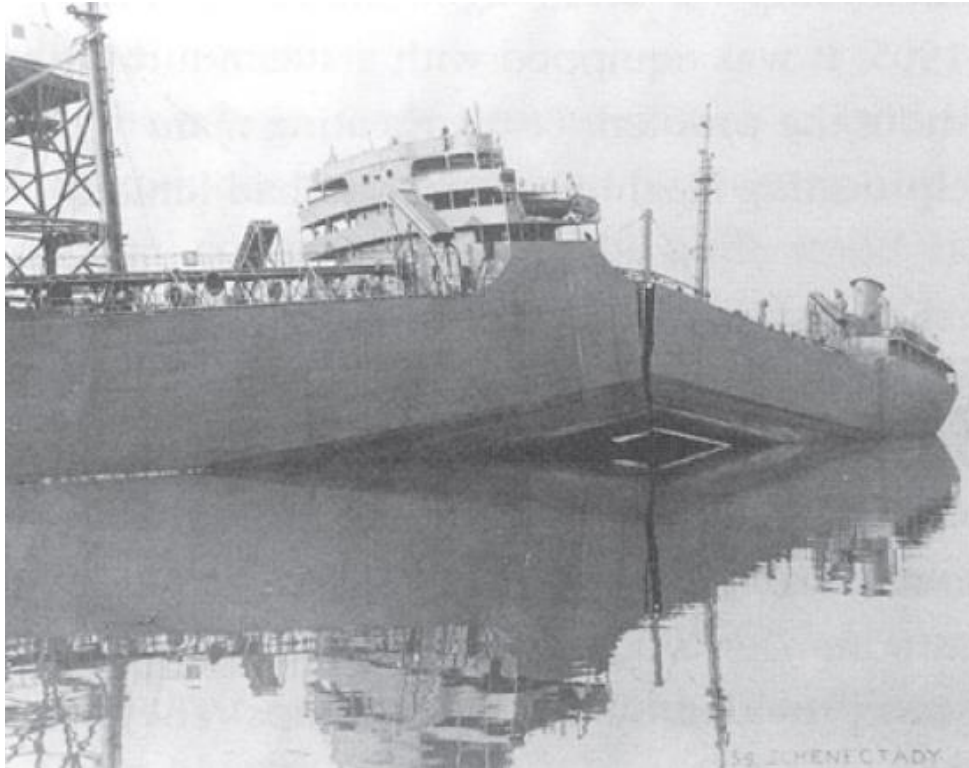
# Εισαγωγή 1 (1)

Οι περισσότερες από τις μεταλλικές κατασκευές σήμερα είναι συγκολλητές. Μια αναδρομή σε αστοχίες συγκολλητών κατασκευών έδειξε ότι οι αστοχίες των κατασκευών ξεκίνησαν από τις συγκολλήσεις.

Μια συγκόλληση εισάγει σε μια κατασκευή αρκετά επιβαρυντικά στοιχεία

- Μεταβολή της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων στο μέταλλο συγκόλλησης και στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη
- Παραμένουσες τάσεις
- Παραμορφώσεις
- Η συγκέντρωση των τάσεων λόγω της μεταβολής της τοπικής γεωμετρίας
- Ασυνέχειες

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (1)



Σχήμα 1: Το T-2 τάνκερ Schenectady κομμένο στα δύο

Αναδρομή σε προηγούμενες αστοχίες από ψαθυρή θραύση

Αστοχίες από ψαθυρή θραύση πιο συχνές κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκόσμιου πολέμου



1950: θεσπίζονται οι πρώτοι κανονισμοί για την ποιότητα χάλυβα κατασκευών



Αναπτύσσεται η Μηχανική των Θραύσεων



# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (2)



Σχήμα 2: Η γέφυρα Point Pleasant στην δυτική Βιρτζίνια (ΗΠΑ) μετά την κατάρρευση της τον Δεκέμβριο του 1967

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (3)



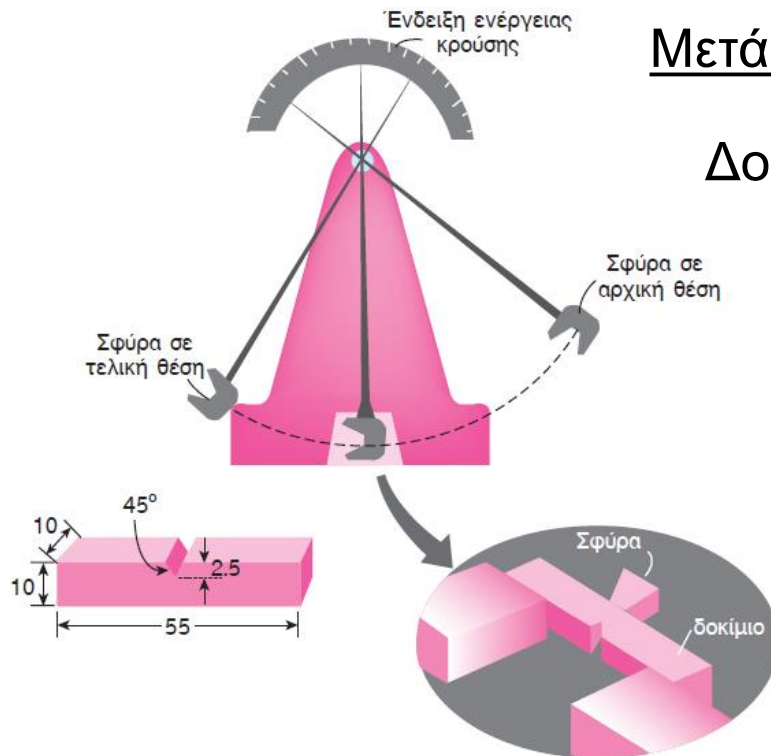
Σχήμα 3: (α) Η πλατφόρμα Alexander Kieland, (β) ένα από τα υποστυλώματα επιπλέει μετά την κατάρρευση της πλατφόρμας τον Μάρτιο του 1980

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (4)

## Μετάβαση από την ολκιμη στην ψαθυρή θραύση

### Δοκιμασία κρούσης Charpy test ASTM E23

Μια σφύρα προσαρμοσμένη σε ένα εκκρεμές επιβάλλει κρουστική φόρτιση σε ένα δοκίμιο το οποίο περιέχει εγκοπή τύπου V και η ενέργεια που καταναλώνεται από τη θραύση του δοκιμίου καταγράφεται σε συνάρτηση της θερμοκρασίας



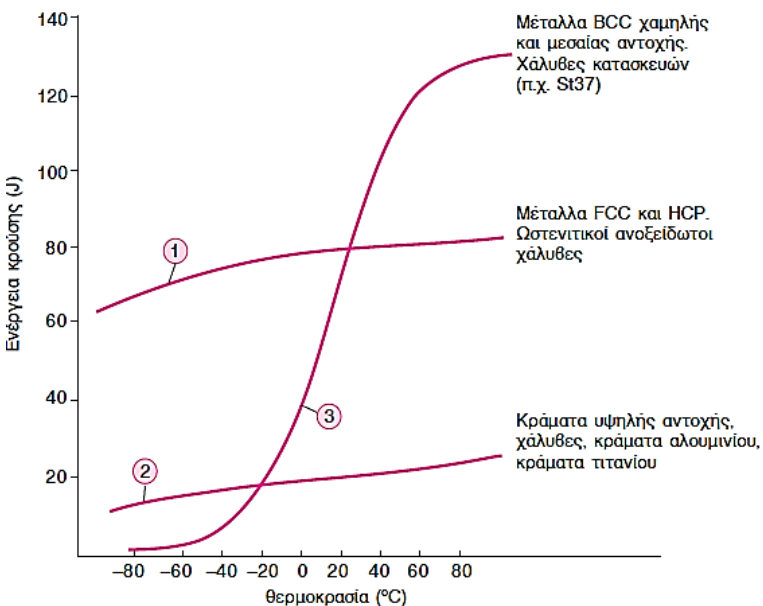
Σχήμα 4: Σχηματική παράσταση δοκιμασίας κρούσης Charpy με την μηχανή κρούσης και τις λεπτομέρειες του δοκιμίου

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (5)

Τα μεσαία και χαμηλής αντοχής μέταλλα του εδροκεντρομένου συστήματος FCC καθώς και τα περισσότερα μέταλλα του πυκνού εξαγωνικού (HCP) παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές της ενέργειας κρούσης

Τα κράματα υψηλής αντοχής παρουσιάζουν χαμηλές τιμές της ενέργειας κρούσης και μπορούν να υποστούν ψαθυρή θραύση ακόμα και κάτω από χαμηλές τάσεις στην ελαστική περιοχή, παρουσία εγκοπών

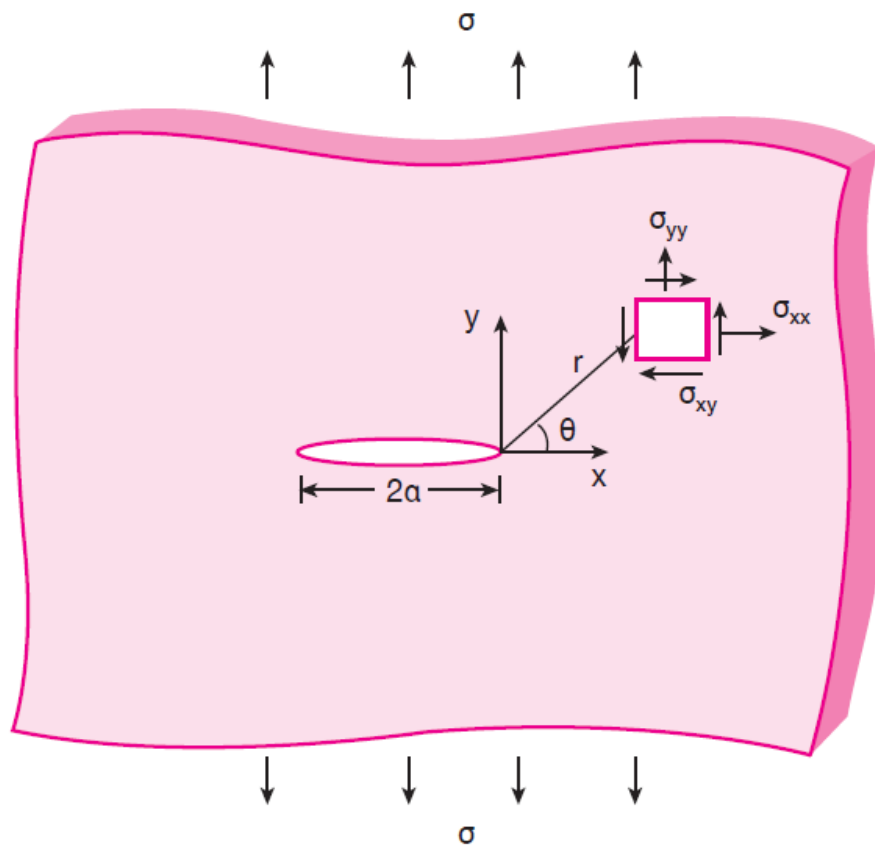
Οι χάλυβες κατασκευών με χαμηλή και μεσαία αντοχή καθώς και πολλά μέταλλα του χωροκεντρομένου συστήματος BCC εμφανίζουν μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση με πτώση της θερμοκρασίας



Σχήμα 5: Χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμασίας κρούσης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διάφορα μέταλλα

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (6)

## Στοιχεία από τη Μηχανική των θραύσεων



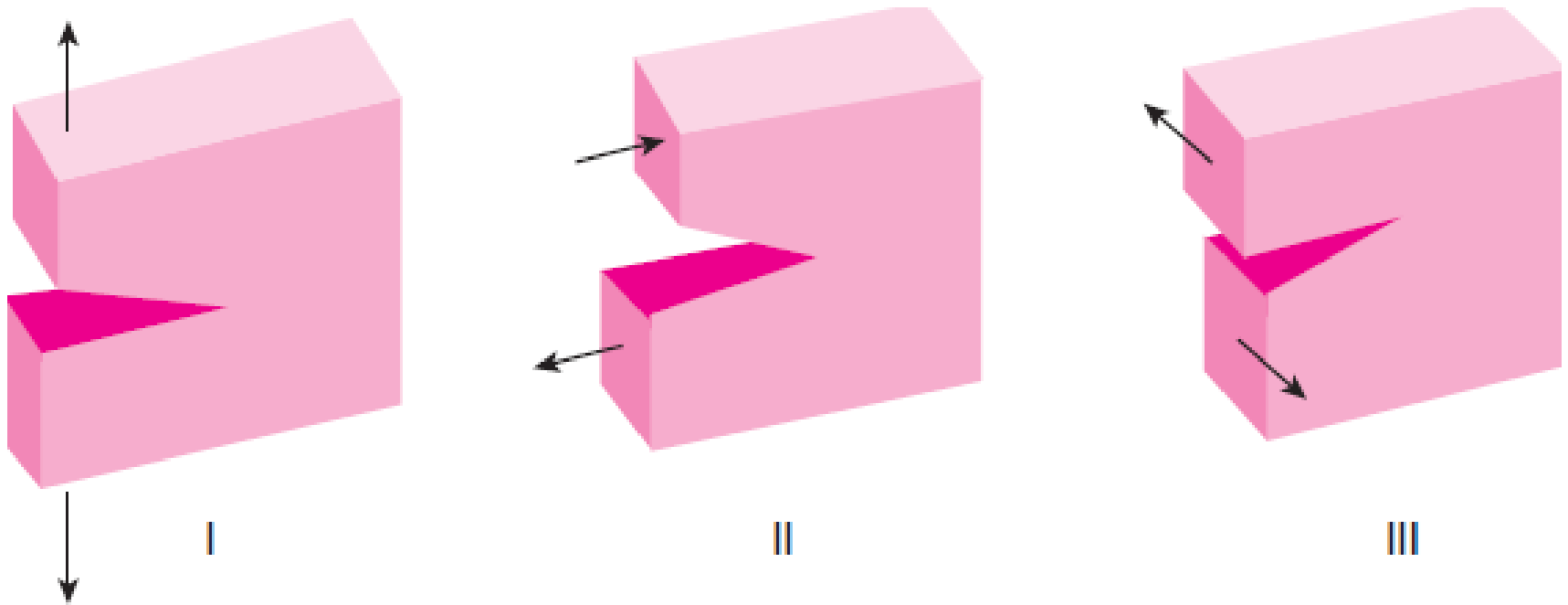
Η μηχανική των θραύσεων προσφέρει μια μεθοδολογία για το συσχέτισμό των παραμέτρων όπως

- Επιβαλλόμενα φορτία
- Προυπάρχουσες ρωγμές
- Δυσθραυστότητα μετάλλου

Βρίσκοντας άμεση εφαρμογή στο μηχανολογικό σχεδιασμό των συγκολλητών κατασκευών

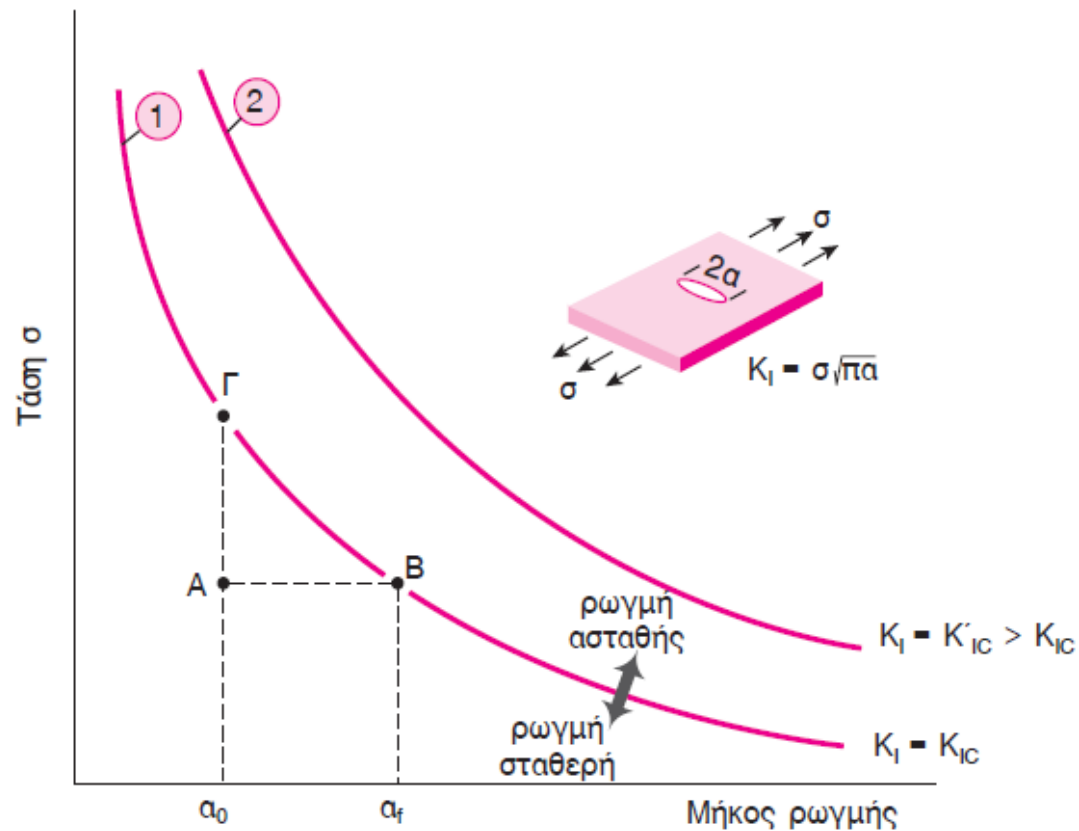
Σχήμα 6: Οι συνιστώσες του τασικού πεδίου μπροστά από μία ρωγμή σε ένα έλασμα

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (7)



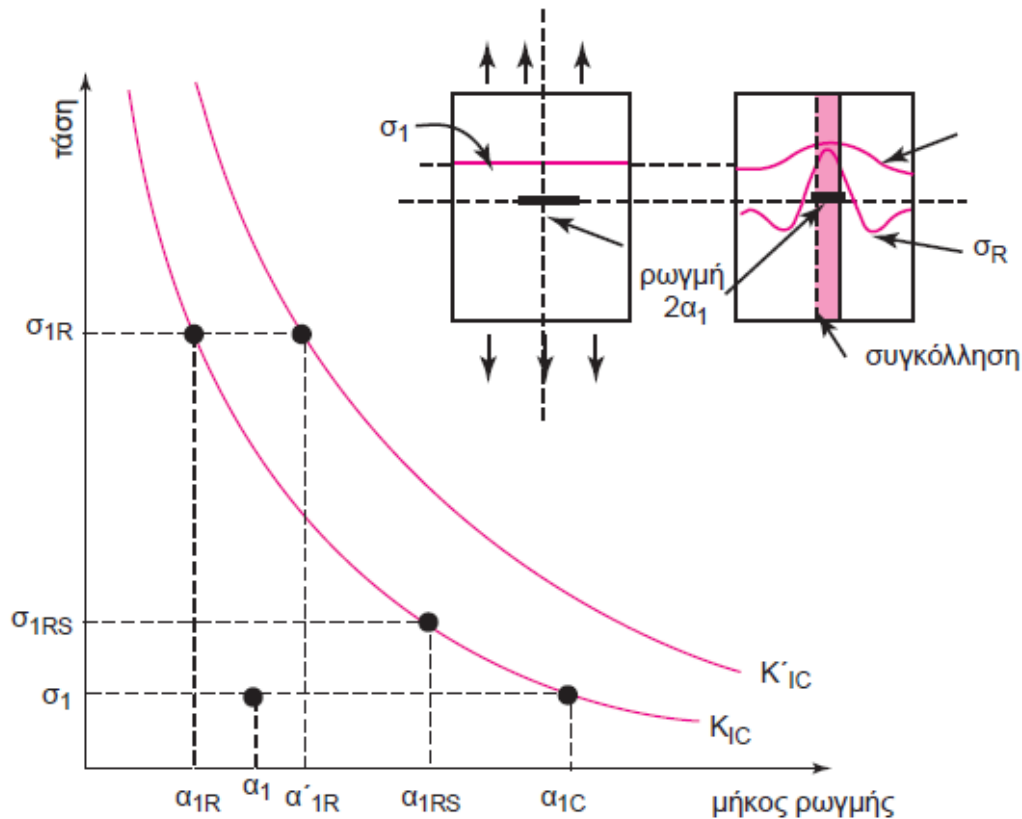
Σχήμα 7: Οι τρεις τύποι για την φόρτιση μιας ρωγμής: τύπος I: εφελκυστικός, τύπος II: συνεπίπεδος διατμητικός, τύπος III: αντιεπίπεδος διατμητικός

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (8)



Σχήμα 8: Σχηματική παράσταση της κρίσιμης συνθήκης θραύσεως

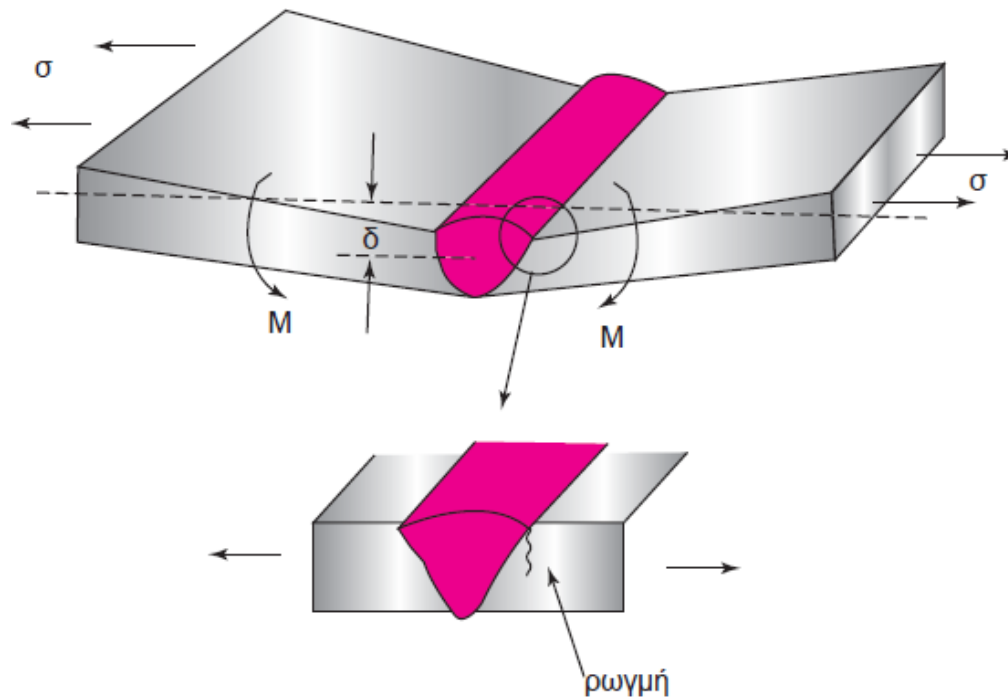
# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (9)



Σχήμα 9: Επίδραση της παραμένουσας τάσης, της αποτατικής ανόπτησης και της δυσθραυστότητας στην ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων



# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (10)



Σχήμα 10: Ο τρόπος με τον οποίο η γωνιακή μεταβολή προκαλεί επιπλέον φόρτιση στην ρωγμή στον πόδα της συγκόλλησης

# Ψαθυρή θραύση των συγκολλήσεων 2 (11)

## Αντιμετώπιση της ψαθυρής θραύσης στις συγκολλήσεις

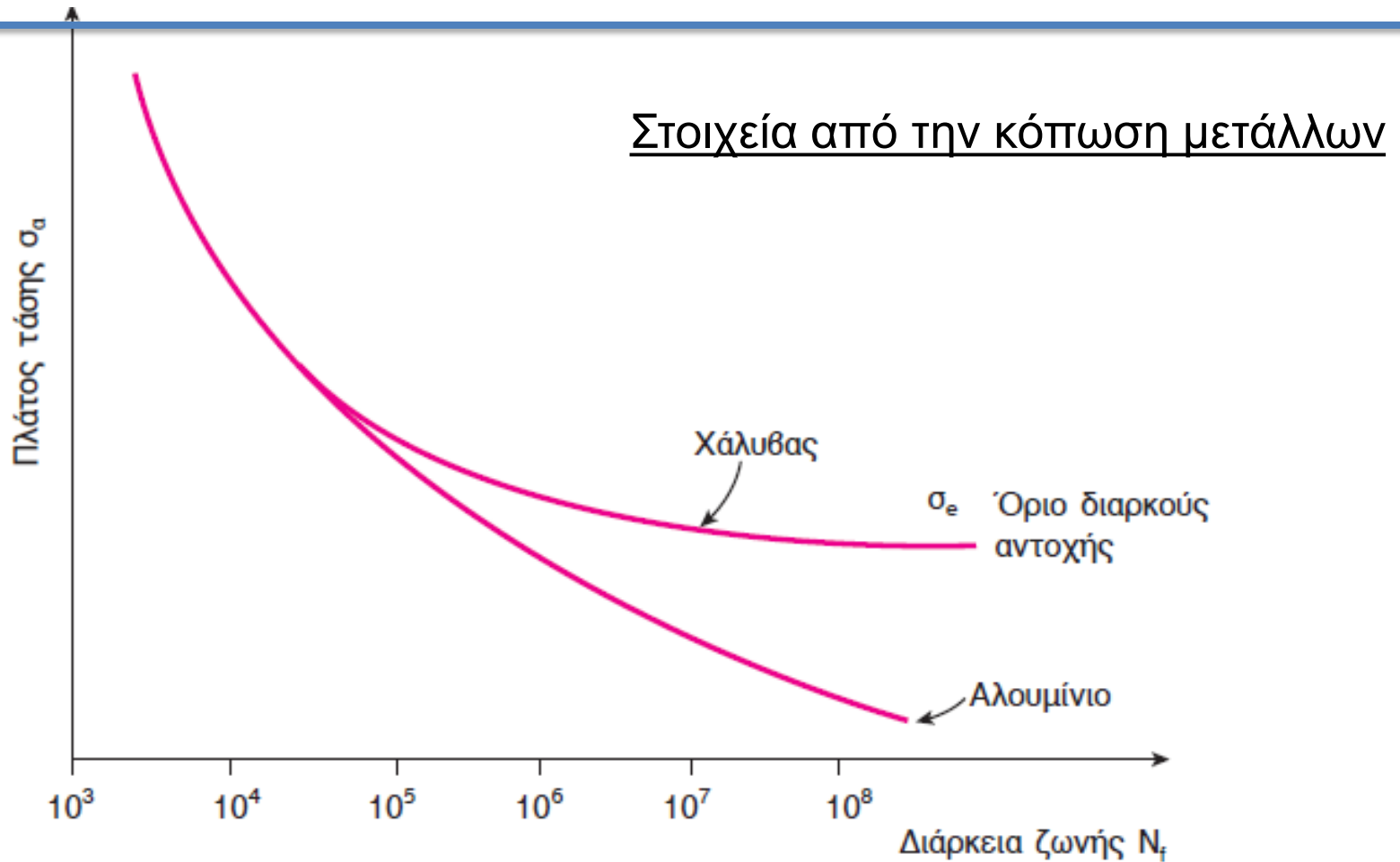
- Αποφυγή της διάδοσης μιας ρωγμής
- Αναχαίτηση ρωγμής
- Προδιαγραφές δυσθραυστότητας στους κώδικες κατασκευών
- Έλεγχος των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων
- Έλεγχος των ασυνεχειών – κώδικες Fitness – for – service

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (1)

Η κόπωση είναι ο πιο συνήθης μηχανισμός αστοχίας στις συγκολλήσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις η εισαγωγή μιας συγκόλλησης σε ένα φέρον στοιχείο μιας κατασκευής μειώνει την αντοχή σε κόπωση.

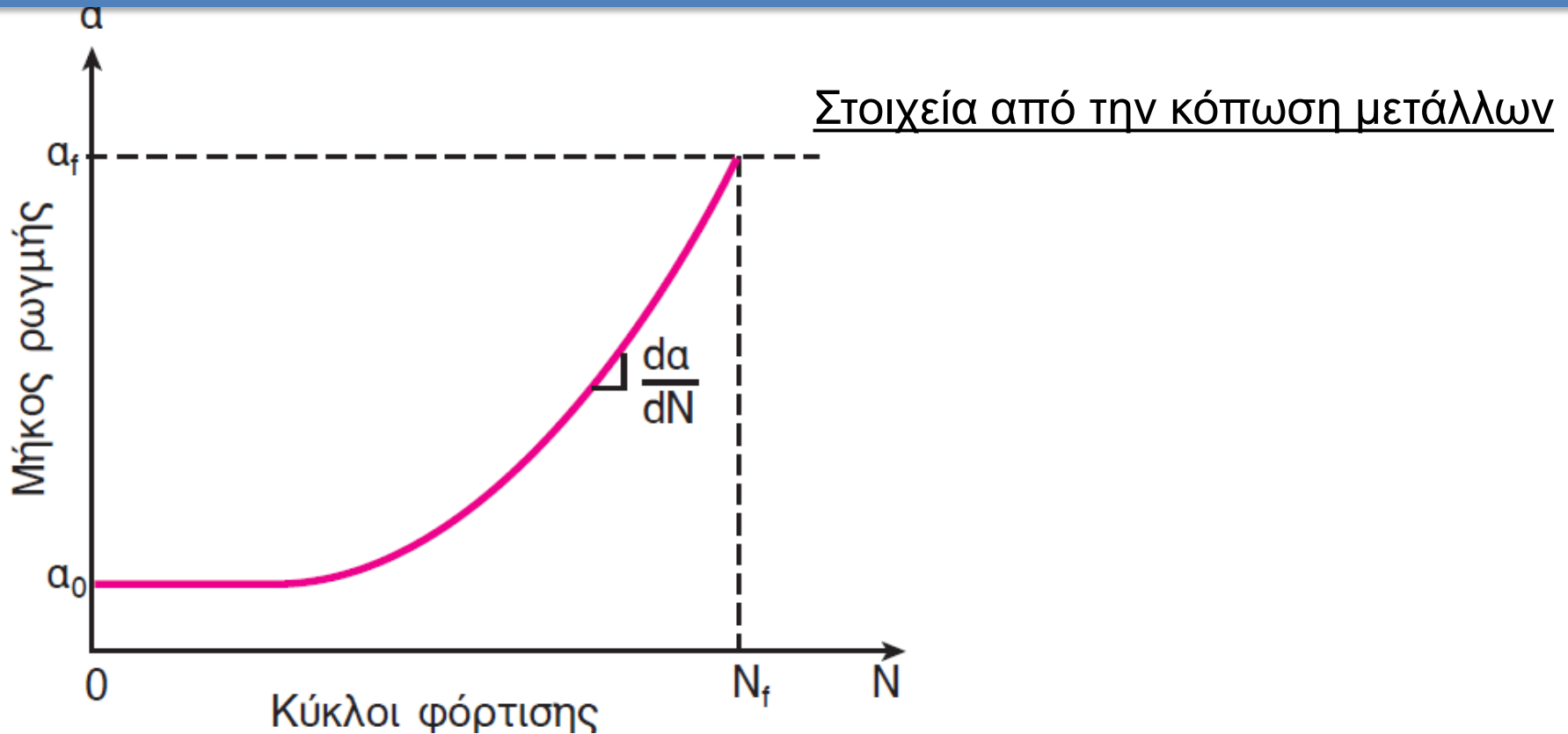
Αυτό έχει σα συνέπεια τα φορτία σχεδιασμού σε συγκολλητές κατασκευές που υφίστανται επαναλαμβανόμενη φόρτιση να περιορίζονται από την αντοχή των συγκολλήσεων στην κόπωση

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (2)



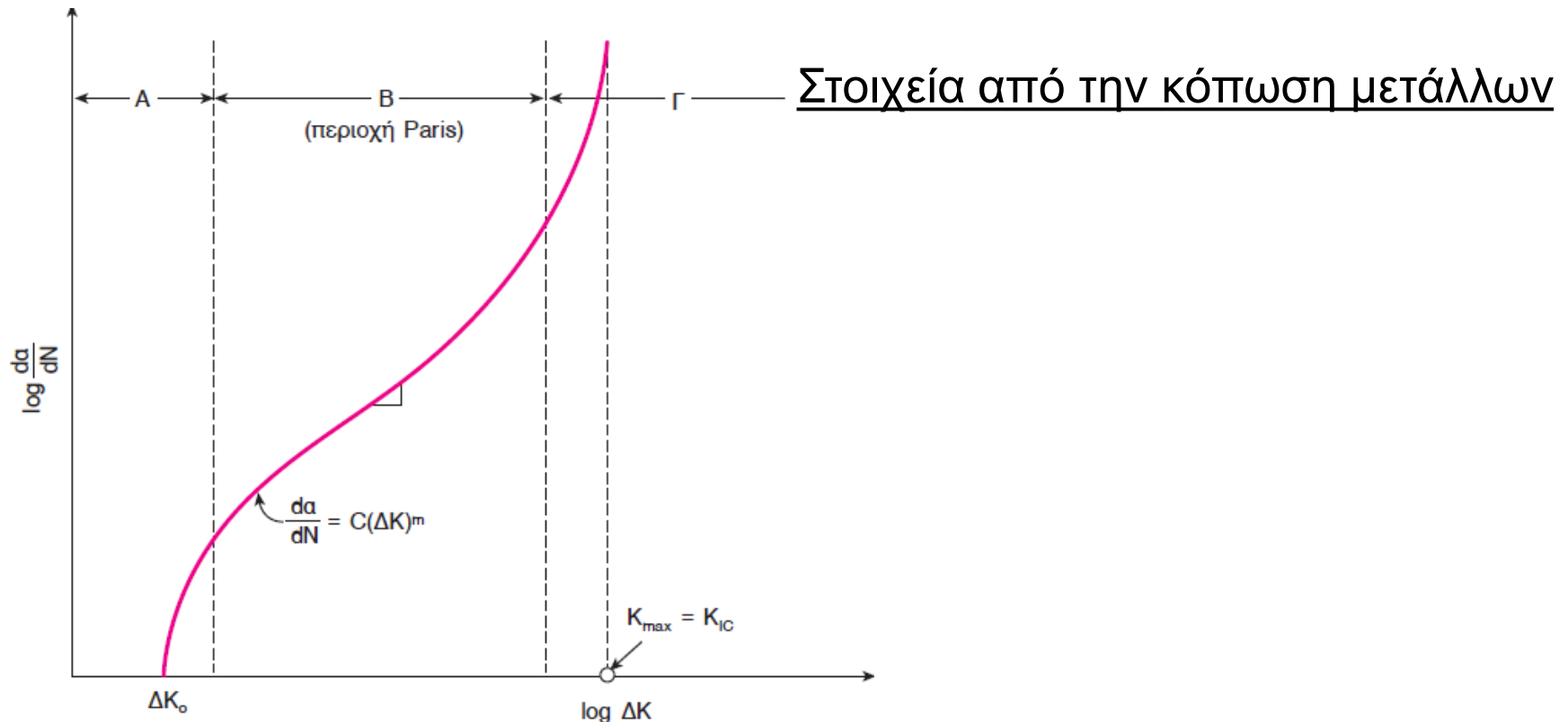
Σχήμα 11: Το πλάτος της τάσης σε συνάρτηση με την διάρκεια ζωής για χάλυβα και αλουμίνιο (καμπύλη S-N) Θραύση και κόπωση των συγκολλήσεων

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (3)



Σχήμα 12: Ανάπτυξη ρωγμής κατά την κόπωση:  $\alpha_0$  αρχικό μήκος,  $\alpha_f$  τελικό μήκος,  $N_f$  διάρκεια ζωής

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (4)

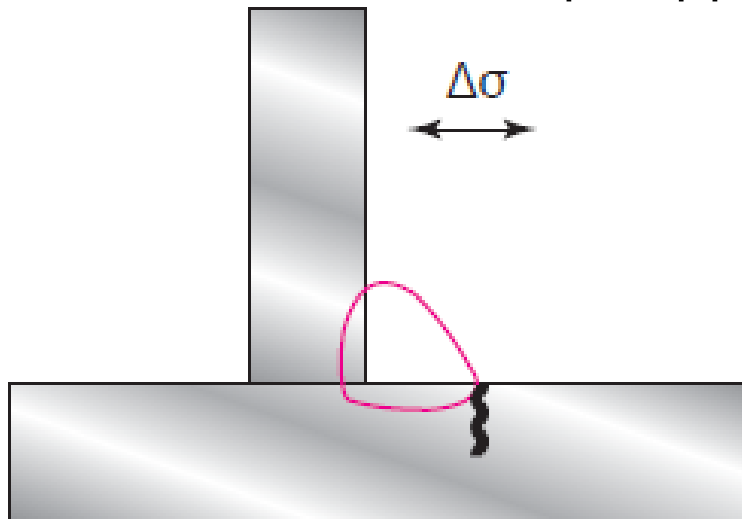


Σχήμα 13: Ταχύτητα ανάπτυξης της ρωγμής  $da/dN$  σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων  $\Delta K$

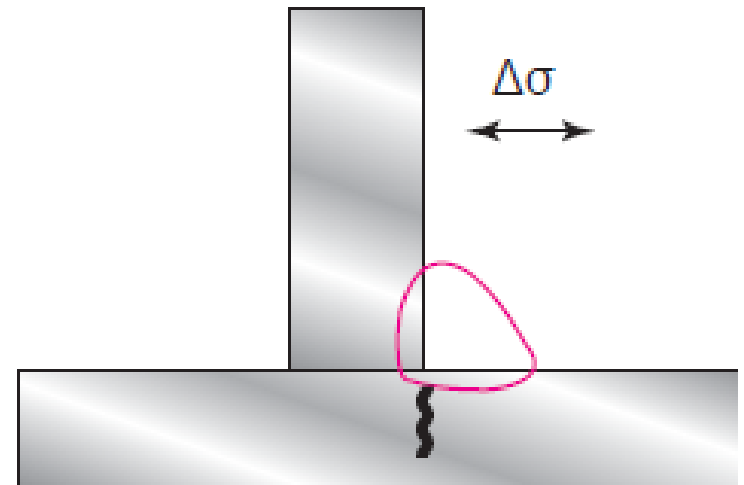
# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (5)

Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων

Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων



(α)

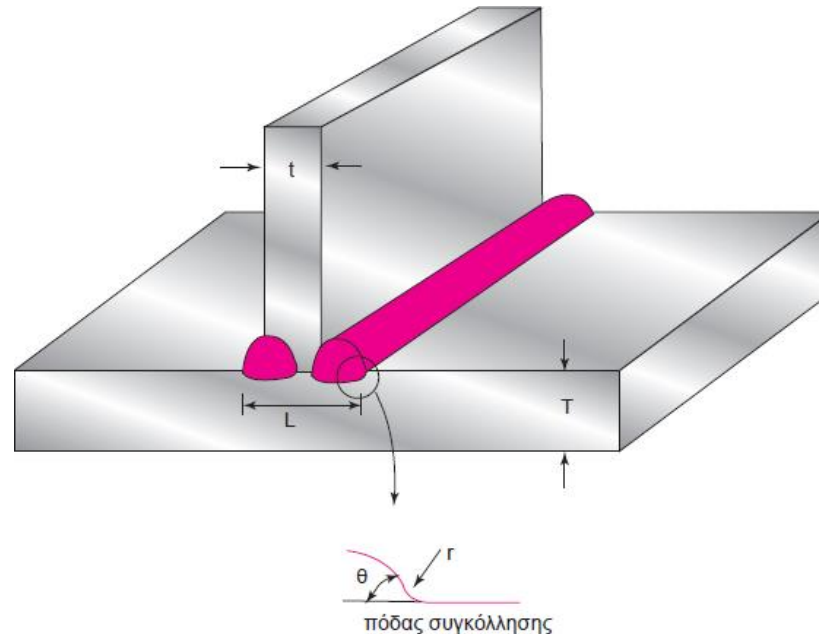


(β)

Σχήμα 14: Εκκίνηση ρωγμής κόπωσης: (α) από τον πόδα, (β) από την ρίζα της συγκόλλησης

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (6)

Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων  
Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων

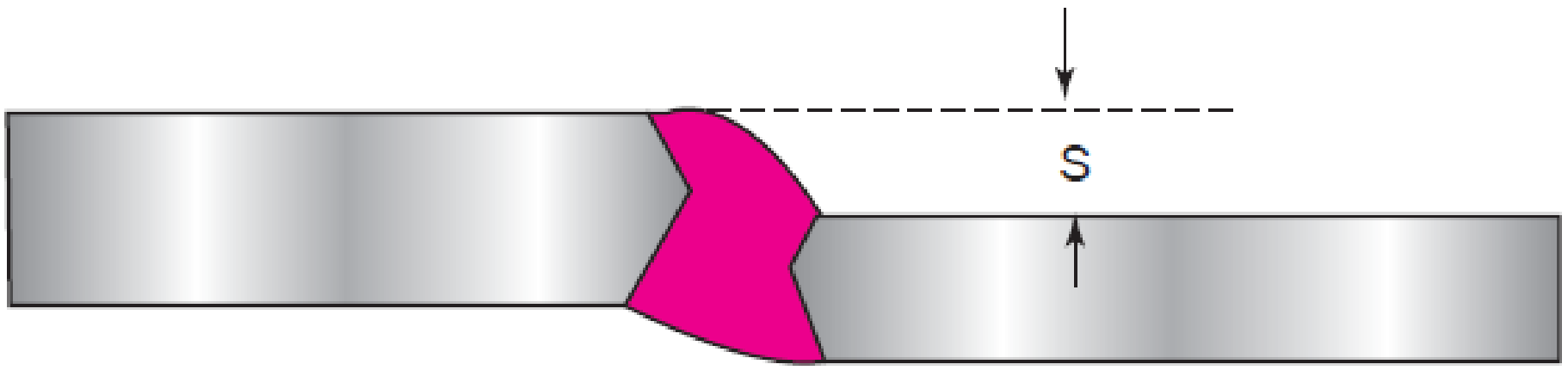


Σχήμα 15: Γεωμετρικές παράμετροι που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων:  
 $T$  = πάχος ελάσματος,  $t$  = πάχος ενισχυτικού,  $L$  = μήκος από πόδα σε πόδα,  $\theta$  =  
γωνία στον πόδα και  $r$  = ακτίνα καμπυλότητας στον πόδα της συγκόλλησης



# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (7)

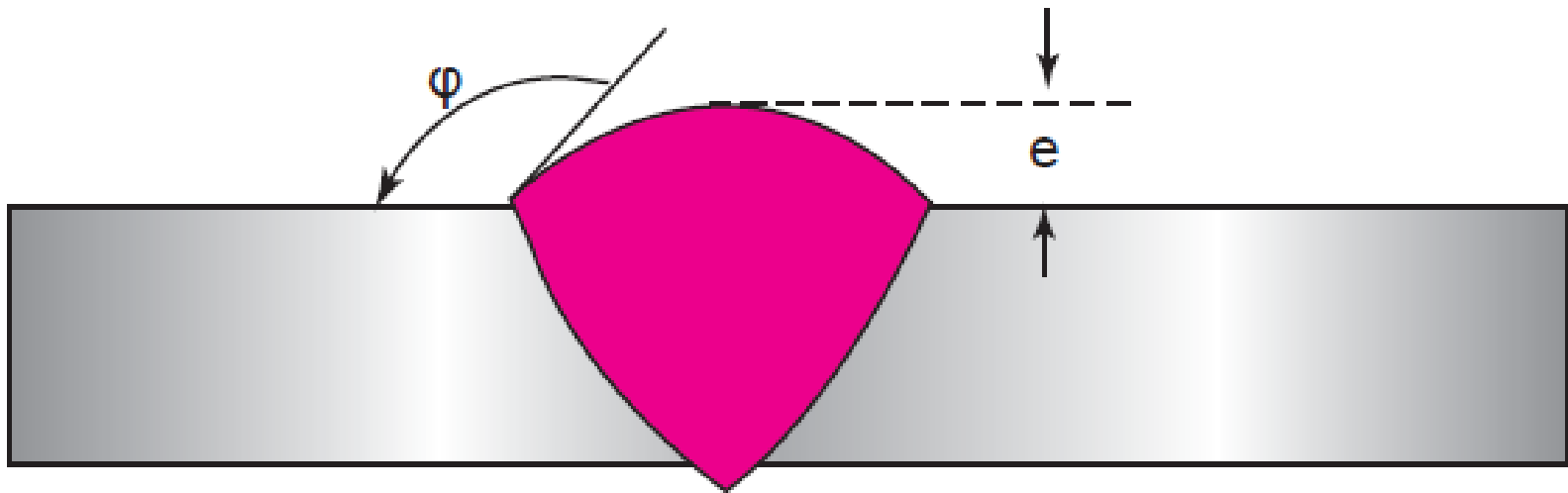
Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων  
Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων



Σχήμα 16: Διαφορά ευθυγράμμισης (misalignment) μεταξύ ελασμάτων σε συγκολλήσεις συμβολής

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (8)

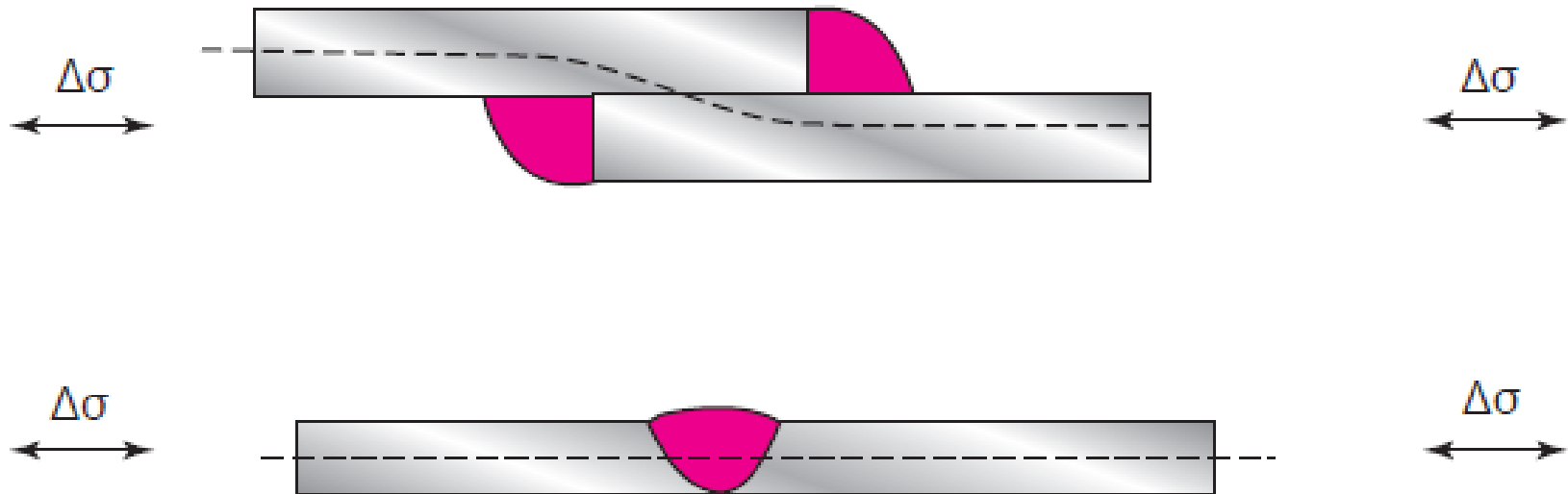
Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων  
Επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων



Σχήμα 17: Η ενίσχυση (reinforcement) σε συγκολλήσεις συμβολής

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (9)

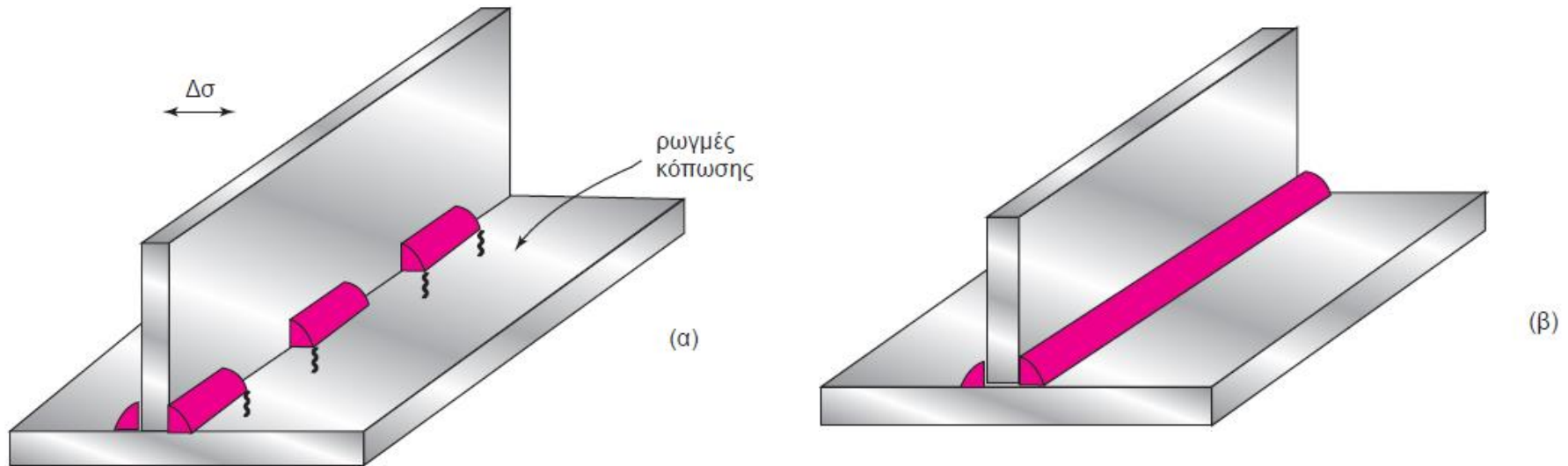
Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων  
Επίδραση του τύπου της σύνδεσης



Σχήμα 18: Συγκόλληση επικάλυψης (lap joint) και συγκόλληση συμβολής (butt joint). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την ροή του φορτίου στα ελάσματα

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (10)

Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων  
Επίδραση του τύπου της σύνδεσης



Σχήμα 19: Συγκόλληση δοκών T: (α) διακοπτόμενη συγκόλληση, (β) συνεχής συγκόλληση

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (11)

## Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων Επίδραση των ασυνεχειών

Όλες οι ασυνέχειες προκαλούν συγκέντρωση των τάσεων και με τον τρόπο αυτό μειώνουν την αντοχή σε κόπωση των συγκολλήσεων. Όμως δεν έχουν όλες οι ασυνέχειες την ίδια επίδραση και σημαντικό ρόλο παίζει η θέση της ασυνέχειας

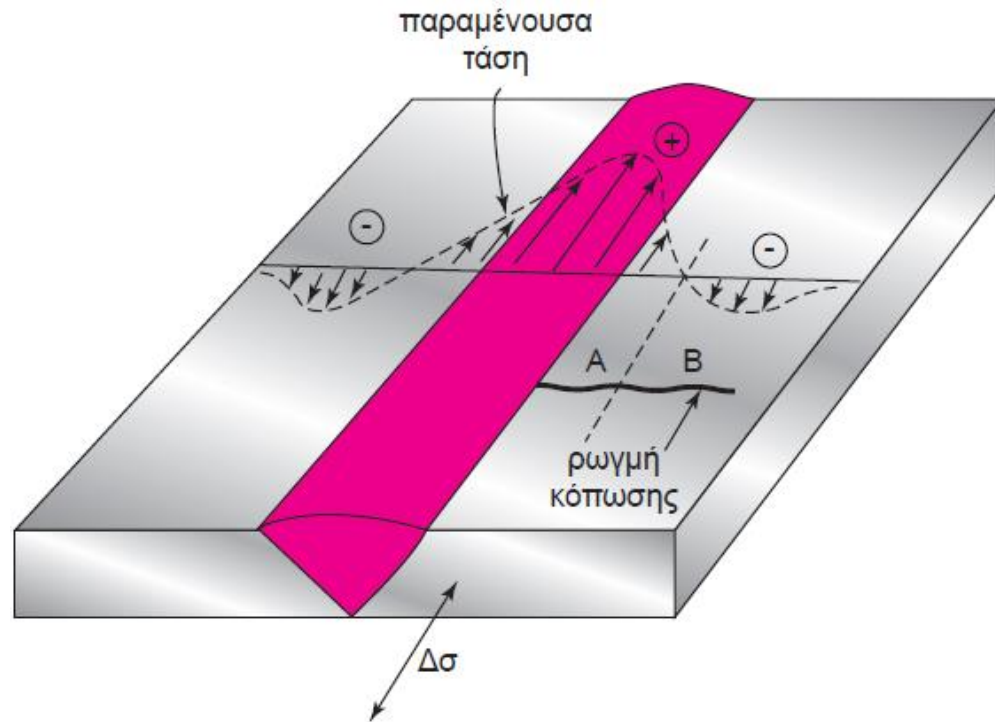
Ασυνέχειες με επίπεδη γεωμετρία όπως οι ρωγμές και η ατελής τήξη μειώνουν δραστικά την αντοχή των συγκολλήσεων σε κόπωση.

Οι πόροι και τα εγκλείσματα δεν έχουν σημαντική επίδραση εφόσον ευρίσκονται μέσα στο μέταλλο συγκόλλησης μακριά από τον πόδα ή την ρίζα της συγκόλλησης

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (12)

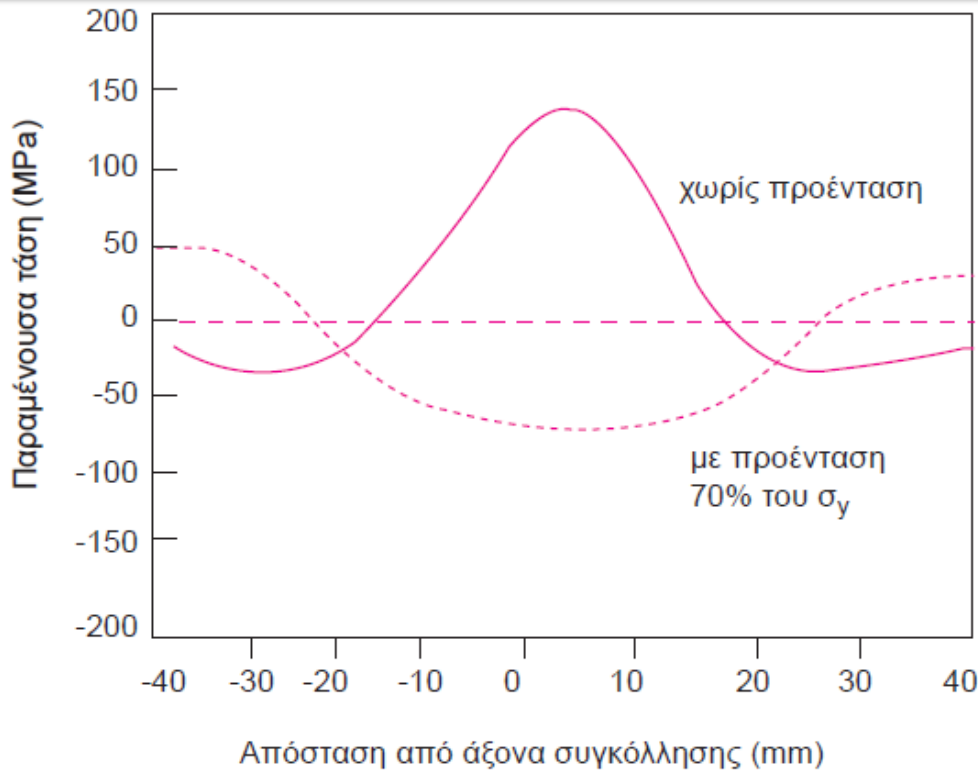
Παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση των συγκολλήσεων

Επίδραση των παραμενουσών τάσεων



Σχήμα 20: Ανάπτυξη ρωγμής κόπωσης σε πεδίο παραμενουσών τάσεων

# Κόπωση στις συγκολλήσεις 3 (13)



Παράγοντες που επιδρούν στην  
κόπωση των συγκολλήσεων

Τροποποίηση της κατανομής των  
παραμενουσών τάσεων

Σχήμα21: Επίδραση της μηχανικής προέντασης (70% του ορίου διαρροής) στην κατανομή της διαμήκουσ παραμένουσας τάσης σε συγκόλληση κράματος αλουμινίου 2024-T3 με την μέθοδο GTAW-TIG (πηγή: D.A. Price et al, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.12 , p.620-633, 2007).