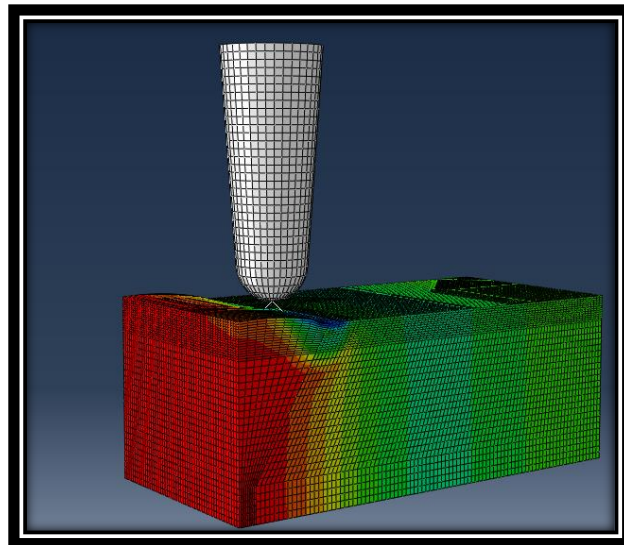




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση κατεργασίας HFMI σε συγκολλήσεις GMAW γάλυβα S700MC, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων



Αριστείδης Λέκκας 0818059

Επιβλέπουσα
Δρ. Άννα Ζερβάκη

Αθήνα 2023

*Η παρούσα εργασία αφιερώνεται
στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Βασιλική
στον αδερφό μου Παναγιώτη
στην γιαγιά μου Χρυσάνθη και στον παππού μου Αριστείδη.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023. Βασικό αντικείμενό της ήταν η μοντελοποίηση της μεθόδου HFMI σε μία συγκόλληση GMAW χάλυβα υψηλή αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις έγιναν εξολοκλήρου σε προσωπικό υπολογιστή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που συνέδραμαν στη εκπόνηση αυτής της διπλωματικής με οποιοδήποτε τρόπο.

Συγκεκριμένα θέλω να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου Άννα Ζερβάκη για την τεράστια συνδρομή της στο αποτέλεσμα αυτής της διπλωματικής. Χωρίς τη διαρκή επικοινωνία σχεδόν σε εβδομαδιαίο επίπεδο, την αδιάκοπη βοήθεια και υποστήριξη τόσο εντός όσο και εκτός σχολής και την προθυμία της για επίλυση αποριών δεν θα είχε καταστεί δυνατή η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θέλω να την ευχαριστήσω ειδικά για την αποδοχή και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου σχετικά με την εκπόνηση της διπλωματικής παράλληλα με πλήρη επαγγελματική απασχόληση και για όλες τις συμβουλές που απλόχερα μου έδωσε, πράγμα το οποίο συνάντησα ελάχιστες φορές στη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης είμαι ευγνώμων για τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητές Κωνσταντίνο Ανυφαντή και Γεώργιο Παπαδάκη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Οφείλω επίσης ευχαριστίες στον διδακτορικό φοιτητή Νικόλαο Σιλιώνη ο οποίος με βοήθησε στη διαδικασία μοντελοποίησης σε περιβάλλον Abaqus 2021.

Πάνω απ' όλα ευχαριστώ τους γονείς μου Κωνσταντίνο και Βασιλική, τον αδερφό μου Παναγιώτη τη γιαγιά μου Χρυσάνθη και τον παππού μου Αριστείδη που ήταν πάντα δίπλα μου σε αυτά τα χρόνια των σπουδών βοηθώντας με να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο που συναντούσα. Για τον παραπάνω λόγο η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφιερώνεται σε αυτούς.

Abstract

High Frequency Mechanical Impact treatment (HFMI) is a newer version of hammer and needle peening, where higher frequency impacts are employed, resulting in smaller spacing between the indentations. The main mechanisms favoring fatigue life improvement in welded components are the tensile residual stresses that usually exist at the weld toe due to welding are substituted by compressive residual stresses in the order of magnitude of the material yield strength, the transition from base to weld material is smoothed and the strain hardening that results from cold working, improve the fatigue resistance of the material at the weld toe. The method has gained popularity over conventional hammer peening, due to the greater treatment depths achieved, is user friendly and produces a uniform treated region with good repeatability. The beneficial effects of this PWT method on the fatigue life extension have been extensively reported in the literature. The fatigue life of the specimen treated by HFMI was reported to be lengthen between two and ten times depending on the weld configuration and the base material. Current study aims to investigate the influence of HFMI on the residual stresses field of a GMAW butt-weld joint of the HSLA steel S700MC 10 mm thick.

For the numerical simulation of the HFMI-treatment, a suitable material hardening model was employed and stress relaxation during fatigue loading was taken into account. PIN was simulated as a discrete body in order to save computational time. Displacement-controlled simulations were carried out to estimate the local residual stress evolution considering the effect of combined isotropic-kinematic hardening law.

Typical results are depicted and allow the correlation between experimental settings of the HFMI tool and the quantification of the residual stresses reduction in the weld area. Evaluation points out that HFMI can be used as a mitigation tool as it modifies residual stress fields radically and can play a vital role on the fatigue life extension of the weld studied.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΥΡΙΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	07
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ	08
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	10
2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ GMAW	10
2.1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ GMAW	11
2.1.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ GMAW	15
2.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	20
2.1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	22
2.1.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	23
2.2 ΗΦΜΙ	26
2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΗΦΜΙ	27
2.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΗΦΜΙ	28
2.2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΗΦΜΙ	30
2.3 ΧΑΛΥΒΕΣ HSLA	32
2.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ – ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	33
2.3.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΧΑΛΥΒΩΝ HSLA	36
2.4 ΚΟΠΩΣΗ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	37
2.4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΠΩΣΗΣ	38
2.4.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	41
3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	45
3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	46
3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	50
3.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΙΝ-ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ	64

3.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	66
3.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑΣ SIGINI	69
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	71
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

KYPIA AKRONYMIA

HFMI → HIGH FREQUENCY MECHANICAL IMPACT

PWT → POST WELD TREATMENT

GMAW → GAS METAL ARC WELDING

MIG → METAL INERT GAS WELDING

MAG → METAL ACTIVE GAS WELDING

SMAW → SHIELDED METAL ARC WELDING

PEΘ → ΠΥΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

VSR → VIBRATION STRESS RELIEF

NS → NOTCH STRESS

NDT → NON-DESTRUCTIVE TESTING

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης του HFMI στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων συγκολλήσεων συμβολής (butt joints) από χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης και υψηλής αντοχής (HSLA) με τη μέθοδο GMAW. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων πολλαπλών κρούσεων ενός PIN στον πόδα της ραφής της συγκόλλησης. Με αυτόν τον τρόπο επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο και παράλληλα επιτυγχάνεται ομαλοποίηση της γεωμετρίας στην περιοχή που γίνεται η κατεργασία HFMI. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η μείωση των παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων στη περιοχή της συγκόλλησης, γεγονός που οδηγεί σε βελτίωση της αντοχής της συγκόλλησης σε κόπωση. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον Abaqus, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Visual Studio 2019 για την χρήση υπορουτίνας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran για εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης.

Η κόπωση αποτελεί βασική μορφή μηχανικής αστοχίας που εμφανίζεται κάτω από την επίδραση δυναμικών και κυμαινόμενων φορτίων. Είναι δυνατόν να εξελιχθεί σε επίπεδα τάσεων σημαντικά χαμηλότερα από την αντοχή σε εφελκυσμό ή το όριο διαρροής σε στατική φόρτιση ενώ συναντάται μετά από μακρά περίοδο επαναλαμβανόμενων κυκλικών τάσεων ή παραμορφώσεων. Αυτή η μορφή αστοχίας συνήθως λαμβάνει χώρα σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων όπως είναι οι συγκολλήσεις, στις οποίες σημειώνονται σημαντικές γεωμετρικές ασυνέχειες κοντά στη ραφή.

Η συγκόλληση αποτελεί μία σύνθετη μεταλλουργική διαδικασία που δημιουργεί ανομοιομορφίες στο εσωτερικό του υλικού και παράλληλα εισάγει παραμένουσες τάσεις στην κατασκευή. Οι τοπικές ανομοιομορφίες μειώνουν σημαντικά την αντοχή του μετάλλου σε κόπωση και πιο συγκεκριμένα μειώνουν το χρόνο έναρξης μικρορωγμών. Από αυτά τα παραπάνω σημεία είναι δυνατόν να αναπτυχθεί η ρωγμή από τα πρώτα ακόμα κυκλικά φορτία. Παρόλο όμως που οι συγκολλήσεις φαίνεται να έχουν κρίσιμα σημεία έναρξης ρωγμών η χρήση τους είναι ευρεία σε κατασκευές που φέρουν κυκλικές φορτίσεις.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι παράγοντες που επιδρούν στην κόπωση είναι ποικίλοι και έχουν να κάνουν κυρίως με τις συγκεντρώσεις των τάσεων λόγω γεωμετρίας, σύνδεσης και ασυνεχειών της συγκόλλησης. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η αντοχή σε κόπωση είναι ένα πρόβλημα στο οποίο πραγματοποιείται συστηματική έρευνα στον 21^ο αιώνα. Προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή σε κόπωση μίας συγκόλλησης είναι αναγκαίο να μειωθεί ο συντελεστής έντασης των τάσεων, να γίνεται κατάλληλη μελέτη πριν τη συγκόλληση με βάση τα πιθανά ασκούμενα φορτία και να γίνει επιλογή του κατάλληλου υλικού της κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης και ποικίλων ακόμα παραγόντων. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί οι μέθοδοι PWT οι οποίοι έχουν τα τελευταία χρόνια εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό. Με αυτές τις μεθόδους είναι δυνατό να εξαλειφθούν πιθανές ατέλειες μετά την συγκόλληση, να εξομαλυνθεί η γεωμετρία της ραφής για περιορισμό των σημείων συγκέντρωσης τάσεων και ακόμα να μειωθούν οι παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις με κατάλληλη επιβολή θλιπτικού φορτίου.

Οι μέθοδοι PWT μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες : Στην πρώτη κατηγορία γίνεται τροποποίηση της γεωμετρίας του πόδα της συγκόλλησης για μείωση της συγκέντρωσης τάσεων στην ανώμαλη αυτή επιφάνεια με στόχο ομαλή μετάβαση μεταξύ βασικού μετάλλου και μετάλλου συγκόλλησης. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν μέθοδοι οι οποίοι επιδρούν στο πεδίο εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων μειώνοντάς το. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές φορές οι μέθοδοι της κατηγορίας αυτής επηρεάζουν και τη γεωμετρία του πόδα της συγκόλλησης όπως γίνεται στην πρώτη κατηγορία. Κάποιες από τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας αναφέρονται παρακάτω :

- Σφαιροβολή (Shot peening)
- Σφυρηλάτηση (Hammer Peening)
- High-Frequency Mechanical Impact (HFMI)

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνεται εκτεταμένη ανάλυση της μεθόδου HFMI με προσομοίωση της μεθόδου σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων και αντίστοιχη ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η διπλωματική εργασία αναπτύσσεται στα εξής κεφάλαια :

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται και εξηγούνται εκτενώς οι βασικές αρχές της συγκόλλησης GMAW και γίνεται ανάλυση του μηχανισμού ανάπτυξης των παραμενουσών τάσεων, των επιπτώσεων και των τρόπων αντιμετώπισής τους. Παράλληλα, γίνεται ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του HFMI και των αναμενόμενων αποτελεσμάτων που έχει στην αντοχή σε κόπωση μίας συγκόλλησης.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται λεπτομερώς το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για τη προσομοίωση της μεθόδου και αναλύεται η υποροουτίνα που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή παραμενουσών τάσεων σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με παράλληλη παραμετροποίηση του προβλήματος. Επίσης, δίδονται διαγράμματα παραμενουσών τάσεων μετά την επιβολή των κρούσεων από το PIN.

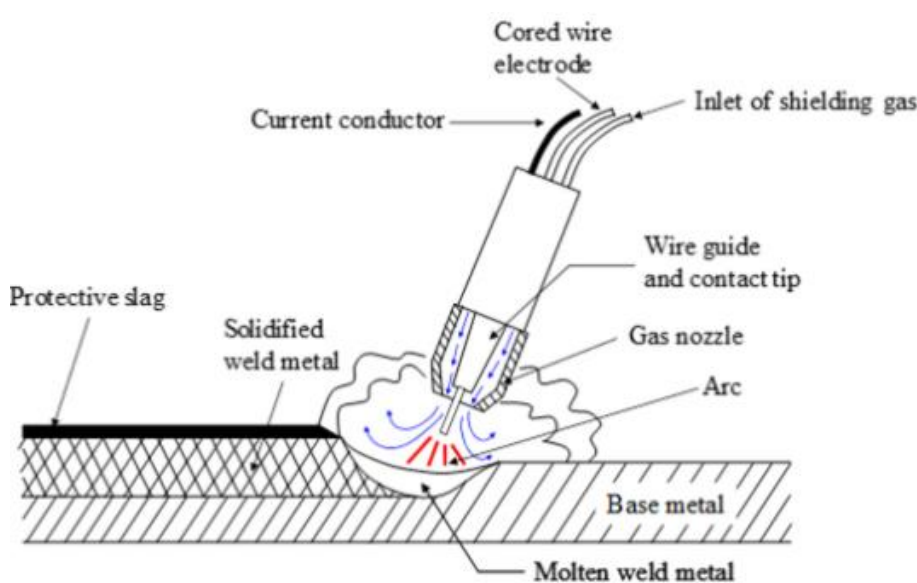
Στο **Κεφάλαιο 5** αξιολογούνται τα αποτελέσματα, σχολιάζονται οι αποκλίσεις και αναλύονται αδυναμίες του λογισμικού και πιθανά σφάλματα κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής διαδικασίας. Δίνονται χρήσιμα συμπεράσματα από τη συνολική μελέτη.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ GMAW

Η συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW) περιλαμβάνει τη τήξη των προς συγκόλληση μετάλλων και ενός μηχανικά τροφοδοτούμενου καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου μέσω ηλεκτρικού τόξου που σχηματίζεται μεταξύ των προηγούμενων τεμαχίων, επιτυγχάνοντας με αυτό το τρόπο σύνδεση των εμπλεκόμενων υλικών (Σχήμα 1). Το παραγόμενο κατά τη τήξη λουτρό συγκόλλησης καλύπτεται από στρώμα προστατευτικού αερίου το οποίο εμποδίζει την προσβολή του πρώτου από τα βασικά στοιχεία του ατμοσφαιρικού αέρα, O_2 , H_2 και N_2 . Η μέθοδος αυτή όταν εμφανίστηκε εθεωρείτο σαν μία μέθοδος υψηλής πυκνότητας ρεύματος, στην οποία γινόταν χρήση γυμνών μεταλλικών ηλεκτροδίων μικρής διαμέτρου με παράλληλη παροχή αδρανούς αερίου. Ο κύριος σκοπός εμφάνισης αυτής της μεθόδου ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και για αυτό δόθηκε η ονομασία MIG (Metal Inert Gas Welding). Οι μετέπειτα εξελίξεις περιέλαβαν τη λειτουργία με ρεύμα χαμηλής πυκνότητας και με παλλόμενο συνεχές ρεύμα, τη χρήση της και σε συγκολλήσεις άλλων μετάλλων και την επίτευξη προστασίας του τηγμένου μετάλλου με ενεργά αέρια (CO_2) λαμβάνοντας έτσι το όνομα MAG (Metal Active Gas Welding). Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η μετονομασία αυτής της μεθόδου συγκόλλησης σε GMAW [1,2].

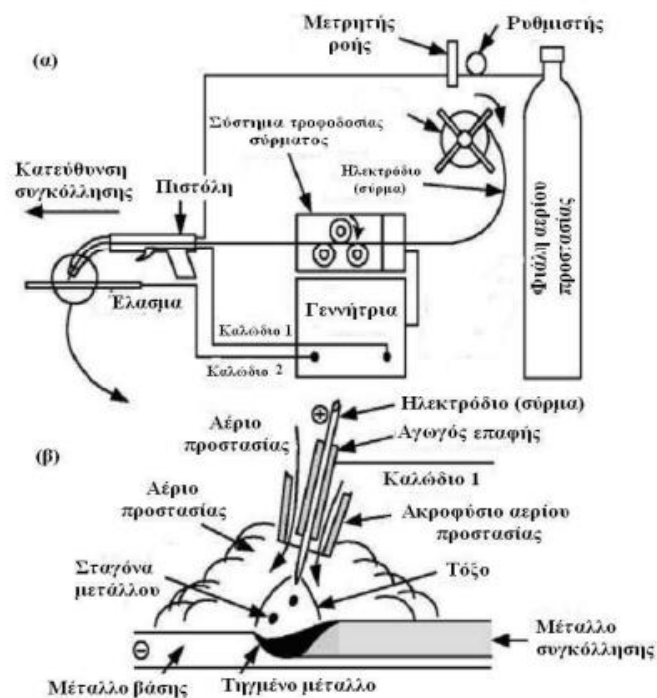


Σχήμα 1. Συγκόλληση GMAW [3].

2.1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ GMAW

Η συγκόλληση GMAW βασίζεται στο γεγονός ότι ένα καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται με στόχο τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και του μεταλλικού ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρικό αυτό τόξο παράγει μεγάλη ποσότητα θερμικής ροής η οποία οδηγεί σε τήξη του ηλεκτροδίου και του μετάλλου συγκόλλησης τοπικά και στη τελική μορφή της συγκόλλησης. Στη πιο βασική της μορφή, η συγκολλητική διάταξη της μεθόδου GMAW αποτελείται από τα εξής στοιχεία (Σχήμα 2) [1,4]:

- Πιστόλι/Όπλο συγκόλλησης
- Μηχανή τροφοδοσίας σύρματος
- Μηχανή συγκόλλησης – παροχής ηλεκτρικής ισχύος (σταθερής τάσης ή έντασης)
- Καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο/σύρμα
- Αγώγιμες συνδέσεις ηλεκτροδίου-βασικού μετάλλου
- Φιάλη προστατευτικού αερίου
- Σύστημα ψύξης (για υδρόψυκτες διατάξεις)



Σχήμα 2. (α) Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου [5].

(β) Μεγέθυνση της περιοχής συγκόλλησης [5].

Όσον αφορά τη συγκόλληση GMAW είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με συνεχές ρεύμα ορθής ή ανάστροφης πολικότητας. Συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας η μεταφορά υλικού γίνεται με σταγόνες ενώ παράλληλα το μεταλλικό ηλεκτρόδιο δρα ως άνοδος και το μέταλλο συγκόλλησης ως κάθοδος. Αντίθετα, με χρήση ανάστροφης πολικότητας, έχουμε μεταφορά υλικού με σταγονίδια και η άνοδος και κάθοδος αντιστρέφονται σε σχέση με τη προηγούμενη μέθοδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι για μετατροπή από μεταφορά με σταγόνες σε μεταφορά με σταγονίδια (ψεκασμός) γίνεται σε μία συγκεκριμένη τιμή έντασης ρεύματος I_{TR} καλούμενη ως τιμή μετάβασης [1,4].

Τα τελευταία χρόνια για την συγκόλληση λεπτών ελασμάτων σε όλες τις θέσεις χωρίς την χρήση αδρανών αερίων έχει εδραιωθεί η τεχνική μεταφοράς προστιθέμενου μετάλλου με βύθιση ή βραχυκύκλωμα. Σύμφωνα με αυτή τη τεχνική μεταφορά γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια επαφής του ηλεκτροδίου με το τηγμένο μέταλλο κάνοντας χρήση μικρών εντάσεων ρεύματος και μικρών τάσεων. Με αυτό τον μηχανισμό μεταφοράς δηλαδή, το τηγμένο μέταλλο στην άκρη του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο λουτρό συγκόλλησης όταν το ηλεκτρόδιο αγγίζει την επιφάνεια του λουτρού, δηλαδή προκαλώντας βραχυκύκλωμα του τόξου [1,4].

Σχετικά με τα αέρια προστασίας το Ar, το He και τα μίγματά τους χρησιμοποιούνται ως αέρια προστασίας για τα μη σιδηρούχα μέταλλα, καθώς επίσης και για τους ανοξείδωτες κραματωμένους χάλυβες. Είναι γνωστό ότι στο τόξο πλάσματος του Ar λόγω χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας από του He η ενέργεια διαδίδεται λιγότερο ομοιόμορφα. Στα σιδηρούχα μέταλλα, το He ως αέριο προστασίας μπορεί να παράγει εκτινάξεις ενώ το Ar μπορεί να προκαλέσει μικρή διείσδυση. Για τον παραπάνω λόγο γίνεται συχνά προσθήκη O_2 με σκοπό την αποφυγή των εκτινάξεων, την υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης, τη μεγαλύτερη διείσδυση και το χαμηλότερο κόστος. Πολλές φορές γίνεται προσθήκη CO_2 αντί για O_2 έχοντας όμως σαν αποτέλεσμα αρκετές εκτινάξεις αν η τάση είναι σε υψηλά επίπεδα.

Όσον αφορά τις πηγές ρεύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο τύποι πηγών :

- Πηγές σταθερής τάσης (constant voltage)
- Πηγές σταθερής έντασης (constant current – drooping characteristic)

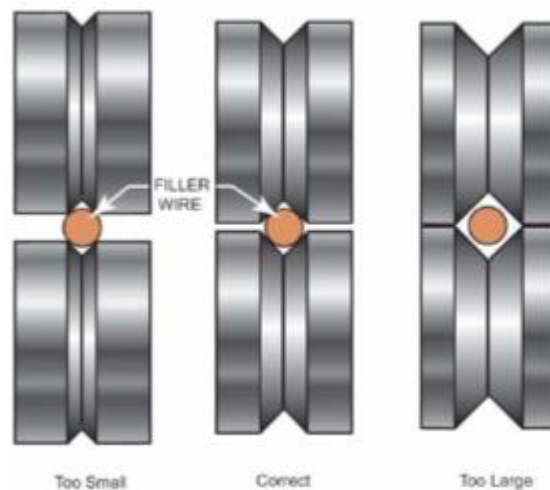
Οι πηγές σταθερής τάσης χρησιμοποιούνται κατά πλειοψηφία. Σε αυτές, η τάση της συγκόλλησης, και κατά συνέπεια το μήκος του τόξου, διατηρούνται σχεδόν σταθερά, ανεξάρτητα από το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι παράμετροι της συγκόλλησης ορίζονται από πριν στη μηχανή της συγκόλλησης. Αν για οποιοδήποτε λόγο, το μήκος του τόξου μεταβληθεί, το ρεύμα θα προσαρμοστεί ανάλογα με τέτοιο τρόπο που αυξάνοντας ή μειώνοντας το ρυθμό τήξης του σύρματος, με σταθερή πάντα τη ταχύτητα τροφοδοσίας αυτού, το μήκος του τόξου θα επανέρθει στη προηγούμενη τιμή του, αυτόματα [1,4].

Στη περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πηγές σταθερής έντασης, θα πρέπει να υπάρχει μηχανισμός ελέγχου του ρυθμού τροφοδοσίας του σύρματος. Σε αυτή τη περίπτωση, οποιαδήποτε μεταβολή του μήκους του τόξου θα οδηγήσει σε ανάλογη μεταβολή της τάσης της συγκόλλησης. Η πληροφορία αυτή περνάει στο πίνακα ελέγχου της μηχανής, ο οποίος στη συνέχεια επεμβαίνει στο μηχανισμό τροφοδοσίας του σύρματος, που με τη σειρά του ρυθμίζει ανάλογα το ρυθμό τροφοδοσίας, ώστε το μήκος τόξου να επιστρέψει στην αρχική του τιμή. Οι πηγές αυτού του τύπου δε συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις MIG/MAG. Κυρίως χρησιμοποιούνται στις χειρωνακτικές μεθόδους συγκόλλησης (TIG και με

επενδεδυμένα ηλεκτρόδια), και σε μεθόδους συγκόλλησης με μηχανική τροφοδοσία σύρματος, μόνο σε πλήρως αυτοματοποιημένες παραλλαγές, όπου επιπλέον, χρησιμοποιούνται μεγάλες διαμέτροι σύρματος (κυρίως κάποιες εφαρμογές της μεθόδου συγκόλλησης με βυθισμένο τόξο).

Υπάρχουν πιστόλια για χειροκίνητη και ημιαυτόματη συγκόλληση GMAW. Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το πιστόλι πρέπει απαραίτητα να διαθέτει μία ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνα επαφής) για τη διοχέτευση ρεύματος. Πρέπει, επίσης, να διαθέτει ακροφύσιο για την παροχή αερίου προστασίας ενώ παράλληλα είναι υδρόψυκτο ή αερόψυκτο. Τα αερόψυκτα πιστόλια συγκόλλησης χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το θερμικό φορτίο είναι χαμηλό ή όταν δεν είναι δυνατή η ψύξη με νερό. Πιο συγκεκριμένα τα πιστόλια αυτά αντέχουν ρεύμα έως 600A όμως στη πράξη η χρήση τους δεν συνηθίζεται για πάνω των 200A. Τα υδρόψυκτα πιστόλια είναι παρόμοια με τα αερόψυκτα με μόνη διαφορά την ύπαρξη αγωγών για κυκλοφορία υγρού ψύξης. Το υγρό ψύξης κυκλοφορεί μέσω των αγωγών και ψύχει κυρίως την ηλεκτρική επαφή και το ακροφύσιο του αερίου. Η υγρόψυξη επιτρέπει τη συνεχόμενη χρήση του όπλου συγκόλλησης, με αυξημένη ικανότητα χρήσης ρεύματος και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα οι εφαρμογές που γίνεται χρήση της είναι για ένταση ρεύματος που κυμαίνεται από 200A έως 750A. Η χρήση αγωγών ψυκτικού υγρού προσθέτει βάρος και καθιστά πιο δύσκολη τη μετακίνηση του εξοπλισμού συγκόλλησης [4].

Σχετικά με το σύστημα τροφοδοσίας σύρματος, αποτελείται από ράουλα με μηχανική κίνηση, τα οποία συνεργάζονται με άλλα ράουλα (Σχήμα 3) που απλώς περιστρέφονται και τραβούν το σύρμα της συγκόλλησης, με στόχο την εξασφάλιση της ευθύτητας και της σωστής τροφοδοσίας του. Τα ράουλα και όλος ο μηχανισμός, πρέπει να είναι σωστά επιλεγμένα, ανάλογα το τύπο και τη διάμετρο του σύρματος συγκόλλησης, και σωστά συντηρημένα. Τα ράουλα για αλουμίνιο πρέπει να είναι διαφορετικά από τα ράουλα για χάλυβα [2,4].



Σχήμα 3. Ορθός τρόπος τοποθέτησης ράουλων σε συγκόλληση GMAW [4].

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου είναι τα εξής:

- Εύκολος χειρισμός από συγκολλητή.
- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μήκος του ηλεκτροδίου όπως σε άλλες μεθόδους.
- Η διείσδυση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη SMAW, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει τη χρήση μικρότερων ραφών σε αυχενικές συγκολλήσεις για ίδια αντοχή.
- Αποδοτική μέθοδος συγκόλλησης, με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής.
- Η συγκόλληση μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλες τις θέσεις με χρήση των κατάλληλων παραμέτρων.
- Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Απαιτείται ελάχιστος καθαρισμός μετά τη συγκόλληση λόγω της απουσίας βαριάς σκουριάς
- Περιορισμός αναθυμιάσεων κατά τη συγκόλληση.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου είναι τα εξής:

- Το τόξο πρέπει να προστατεύεται από ρεύματα αέρα που παρασύρουν το αέριο προστασίας κάτι που περιορίζει την εφαρμογή της μεθόδου σε εξωτερικούς χώρους.
- Απαιτείται πολύ καλό σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου.
- Πολλές φορές είναι δύσκολη η μεταφορά του εξοπλισμού.
- Αυξημένη πιθανότητα ατελούς τήξης, εάν οι παράμετροι της συγκόλλησης δεν ελέγχονται.
- Αναγκαία η χρήση προστατευτικού αερίου.
- Τα σχετικά υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας και η ένταση του τόξου μπορεί να δυσκολέψουν το συγκολλητή να κρίνει την ποιότητα της συγκόλλησης
- Υψηλό κόστος συγκόλλησης λόγω μεγάλων απαιτήσεων σε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος παρόλο που το κόστος του σύρματος θεωρείται χαμηλό.

2.1.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ GMAW

Ένα βασικό θέμα στις συγκολλήσεις, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του πολλά άλλα φαινόμενα είναι τα θερμοδυναμικά φαινόμενα που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έχουμε παράλληλη ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κοντά στη ραφή ενώ οι θερμοκρασίες παραμένουν χαμηλές πιο μακριά. Το παραπάνω γεγονός συνοδεύεται με ταυτόχρονη μετακίνηση της θερμικής πηγής προσθέτοντας πολυπλοκότητα στο θερμικό αυτό πρόβλημα. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη ανομοιομορφου θερμοκρασιακού πεδίου τόσο σε χρονικό όσο και σε τοπικό επίπεδο. Με τη σειρά του, το θερμοκρασιακό πεδίο επηρεάζει σημαντικά μηχανικά και μεταλλουργικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης, όπως [1,3]:

- Το εύρος και τη δομή του μετάλλου συγκόλλησης.
- Το εύρος και τη δομή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ).
- Τις παραμένουσες τάσεις.
- Τις παραμορφώσεις.

Είναι λοιπόν αντιληπτό ότι το θερμοκρασιακό πεδίο μίας συγκόλλησης επηρεάζει άμεσα την μηχανική συμπεριφορά και την ποιότητα των συγκολλητών κατασκευών. Εν γένη υπάρχουν διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν τη διείδυση, τη γεωμετρία και γενικότερα την ποιότητα της συγκόλλησης όπως [1,3]:

- Το ρεύμα συγκόλλησης (πρακτικά ο ρυθμός τροφοδοσίας ηλεκτροδίου).
- Η τάση του τόξου (στην πράξη το μήκος τόξου)
- Η ταχύτητα
- Η προέκταση του ηλεκτροδίου
- Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου (γωνία πιστολιού)
- Η διάμετρος του ηλεκτροδίου

Όλες οι παραπάνω παράμετροι είμαι ύψιστης σημασίας για την πραγματοποίηση μίας ποιοτικής συγκόλλησης. Προφανώς υπάρχει αλληλεξάρτηση των παραμέτρων και συχνά χρειάζεται προσαρμογή γιατί μία αλλοίωση πιθανώς να επιφέρει ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, κρίνεται αναγκαία η θεωρητική γνώση καθώς και η εμπειρία για την επίτευξη καλύτερου αποτελέσματος. Αξίζει να σημειωθεί, ότι μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην επιλογή των παραμέτρων μιας συγκόλλησης προσθέτει ο τύπος του μετάλλου βάσης, η θέση της συγκόλλησης, οι ποιοτικές απαιτήσεις και τέλος ο αριθμός των απαιτούμενων συγκολλήσεων. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι ιδιότητες της συγκόλλησης από την κάθε παράμετρο [1,3].

Ένταση Ρεύματος συγκόλλησης : Με την αλλαγή του ρυθμού τροφοδοσίας, αλλάζει και η τιμή του ρεύματος συγκόλλησης όταν πρόκειται για πηγή σταθερού ρεύματος. Συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στις μικροαλλαγές στην τάση που προκαλείται όταν αλλάζει ο ρυθμός τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, μια ενδεχόμενη αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση του βάθους και του πλάτους της διείδυσης, του ρυθμού απόθεσης και του μεγέθους της ραφής.

Πολικότητα : Η πλειοψηφία των συγκολλήσεων με χρήση GMAW γίνεται με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στο θετικό πόλο της πηγής (ανάστροφη πολικότητα), διότι προσφέρει σταθερότητα στο τόξο, μικρό πιτσίλισμα, καλό προφίλ ραφής και μεγαλύτερη διείδυση.

Τάση τόξου : Η τάση και το μήκος τόξου είναι όροι οι οποίοι δεν είναι ταυτόσημοι. Η τάση του τόξου είναι ένα μέγεθος το οποίο αντικατοπτρίζει το φυσικό μήκος του τόξου με ηλεκτρικούς όρους. Από την άλλη, το φυσικό μήκος τόξου μπορεί να αποδώσει διαφορετικές τιμές τάσης, ανάλογα με το αέριο προστασίας, το ρεύμα και την έκταση του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι παράμετροι παραμένουν σταθεροί η τάση με το μήκος τόξου συνδέονται με μία συστηματική σχέση. Με αύξηση της τάσης του τόξου παρατηρούνται πιο επίπεδες ραφές και αύξηση του πλάτους της ζώνης τήξης.

Ταχύτητα : Ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο κινείται το τόξο κατά μήκος της συγκόλλησης. Όταν έχουμε σταθεροποίηση των υπολοίπων παραμέτρων, υπάρχει μία μέση ταχύτητα στην οποία η διείσδυση της συγκόλλησης γίνεται μέγιστη. Όταν η ταχύτητα μειώνεται, ο ρυθμός απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους αυξάνεται. Είναι γεγονός, ότι σε πολύ μικρές ταχύτητες το τόξο επιδρά περισσότερο στο λουτρό συγκόλλησης παρά στο βασικό μέταλλο, με συνέπεια την μη αποτελεσματική διείσδυση. Με αύξηση της ταχύτητας, η θερμότητα που μεταδίδεται στο μέταλλο βάσης από το τόξο αυξάνεται διότι το τόξο επιδρά περισσότερο σε αυτό. Όμως περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη ροή θερμότητας στο μέταλλο βάσης.

Προσανατολισμός ηλεκτροδίου : Όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει σε αντίθετη κατεύθυνση με αυτή της ταχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οπισθέλκουσας γωνίας. Αντίθετα, όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει προς την κατεύθυνση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πρόσω γωνίας. Για όλες τις θέσεις συγκόλλησης, μία οπισθέλκουσα γωνία ($5^\circ - 15^\circ$) ως προς την κατακόρυφο επιτυγχάνει τη βέλτιστη προστασία του λουτρού συγκόλλησης. Εντούτοις, είναι πιο σύνηθες να διατηρείται κατά τη συγκόλληση μία πρόσω γωνία με στόχο την καλύτερη ορατότητα και μικρότερη κυρτότητα στην τελική ραφή.

Έκταση του ηλεκτροδίου : Αύξηση της απόστασης αυτής, οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία προκαλεί επιπλέον θερμότητα στο ηλεκτρόδιο και συμβάλλει σε υψηλότερους ρυθμούς τήξης. Η βέλτιστη έκταση του ηλεκτροδίου κυμαίνεται γενικά μεταξύ 6,4-13 mm για μεταφορά με περιοδικές βραχυκυκλώσεις του τόξου και μεταξύ 13-25 mm για μεταφορά με σταγόνες ή ψεκασμό.

Διάμετρος του ηλεκτροδίου : Επηρεάζει άμεσα τη μορφή της ραφής. Ένα μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο απαιτεί υψηλότερη κατώτατη τιμή ρεύματος απ' ότι ένα μικρότερο για να επιτύχει ίδια ποσότητα μεταφοράς μετάλλου. Υψηλότερες τιμές έντασης ρεύματος με τη σειρά τους οδηγούν σε περεταίρω τήξη ηλεκτροδίου και συνεπώς περισσότερη απόθεση μετάλλου [1].

Στις συγκολλήσεις, το συνολικό ποσό της θερμότητας που εισάγεται στο μέταλλο εξαρτάται από την ταχύτητα και τη θερμική ισχύ Q . Συγκεκριμένα έχει οριστεί ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας

$$h \text{ (PEΘ)} = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{u} \text{ ως εξής :}$$

$$h = \frac{Q}{u} \text{ (J/m)} \quad [2.1]$$

όπου, η θερμική ισχύς Q ισούται με το γινόμενο έντασης ρεύματος (I) με τάση (V) και βαθμό απόδοσης τόξου (η). Ο βαθμός απόδοσης τόξου εξαρτάται άμεσα από τη μέθοδο συγκόλλησης και τη περίπτωση της GMAW κυμαίνεται από 0.7-0.9. Με u ορίζεται η ταχύτητα της συγκόλλησης. Εκτός από την ηλεκτρική ισχύ του τόξου $V \cdot I$ πηγές θερμότητας σε μία συγκόλληση μπορεί να είναι η θερμότητα από χημικές αντιδράσεις μεταξύ αερίων που

περιβάλλουν το τόξο και λίμνης συγκόλλησης. Ακόμα οι αλλοτροπικοί μηχανισμοί μπορούν να παράγουν θερμότητα [1].

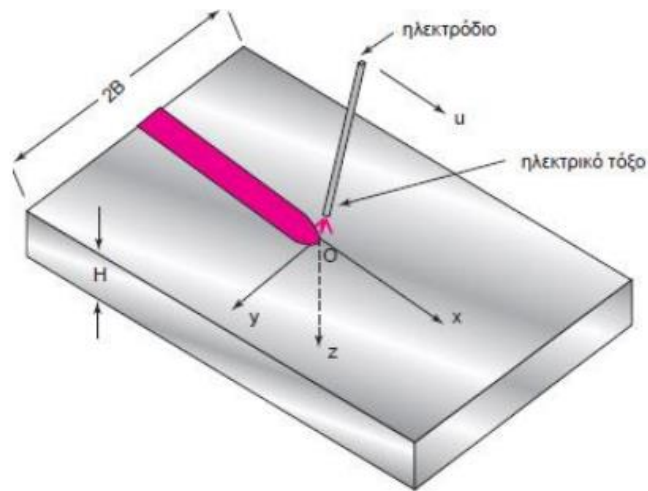
Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Η αγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός στερεού από μία περιοχή υψηλότερης σε μία περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Στη συγκόλληση η θερμότητα δημιουργείται από το ηλεκτρόδιο και μεταφέρεται διαμέσου του μετάλλου συγκόλλησης, όπου αυτό οδηγεί το βασικό μέταλλο να υπερβεί το σημείο τήξης του και κατ' επέκταση να δημιουργήσει λίμνη συγκόλλησης. Η συναγωγή από την άλλη, επιτυγχάνεται μέσω της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της κίνησης μίας υγρής ή αέριας μάζας. Στη συγκόλληση αυτό επιτυγχάνεται όταν η θερμική πηγή οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας της αέριας μάζας κοντά στη περιοχή της ραφής, δημιουργώντας έτσι ένα ρεύμα συναγωγής. Η ακτινοβολία είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, σε μία συγκόλληση η θερμική πηγή, εκπέμπει ακτινοβολία σε μορφή υπέρυθρου φωτός δημιουργώντας έτσι θερμική ροή προς το βασικό μέταλλο. Συνολικά, είναι κατανοητό ότι σε μία εργασία συγκόλλησης γίνεται μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρόδιο μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Το ποσό εκπεμπόμενης θερμικής ροής μπορεί να ελεγχθεί ελέγχοντας τις προαναφερθέντες παραμέτρους με στόχο ικανοποιητική μηχανική αντοχή και ποιότητα [1].

Μία καλή προσέγγιση στη κατανόηση της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας σε μία συγκόλληση δίνουν οι λύσεις που έχουν προταθεί από τον Rosenthal. Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται ότι η συγκόλληση έχει αξονική συμμετρία και ότι η πηγή θερμότητας είναι πάνω από την επιφάνεια του προς συγκόλληση ελάσματος. Βασική θεώρηση του μοντέλου είναι η μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή. Επίσης, γίνεται υπόθεση ότι η κατανομή θερμοκρασίας στο μοντέλο είναι συνάρτηση χρόνου και απόστασης από το σημείο της θερμικής πηγής. Παράλληλα υπολογίζεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία στην πλάκα σημειώνεται σε απόσταση από τη θερμική πηγή ανάλογη με τη τετραγωνική ρίζα του χρόνου συγκόλλησης. Γίνεται πρόβλεψη της θερμοκρασιακής κατανομής, εμφανίζοντας μία συμμετρία ως προς τα σημεία περάσματος της θερμικής πηγής ενώ η κλίση της θερμοκρασιακής βαθμίδας γίνεται πιο «απότομη» εκεί. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατανομής κατά τη διάρκεια μίας συγκόλλησης, γεγονός που οδηγεί στον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων που θα προκύψουν τελικά. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι εξισώσεις του Rosenthal δεν προσεγγίζουν επακριβώς την πραγματικότητα εξαιτίας ποικίλων απλοποιήσεων και υποθέσεων που λαμβάνονται υπόψη όπως [1,4]:

- Η διαδικασία της συγκόλλησης έχει άξονα συμμετρίας οδηγώντας σε παραγωγή σφαιρικής γεωμετρίας στη ραφή.
- Η θερμική πηγή είναι σημειακή και τοποθετείται επάνω στην επιφάνεια της πλάκας.
- Το βασικό μέταλλο θεωρείται ότι φέρει ομοιόμορφες θερμοφυσικές ιδιότητες.
- Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο μέσω αγωγής.

Το μοντέλο του Rosenthal κάνει χρήση της παρακάτω εξίσωσης αγωγής για υπολογισμό των θερμοκρασιακών κατανομών :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [2.2]$$



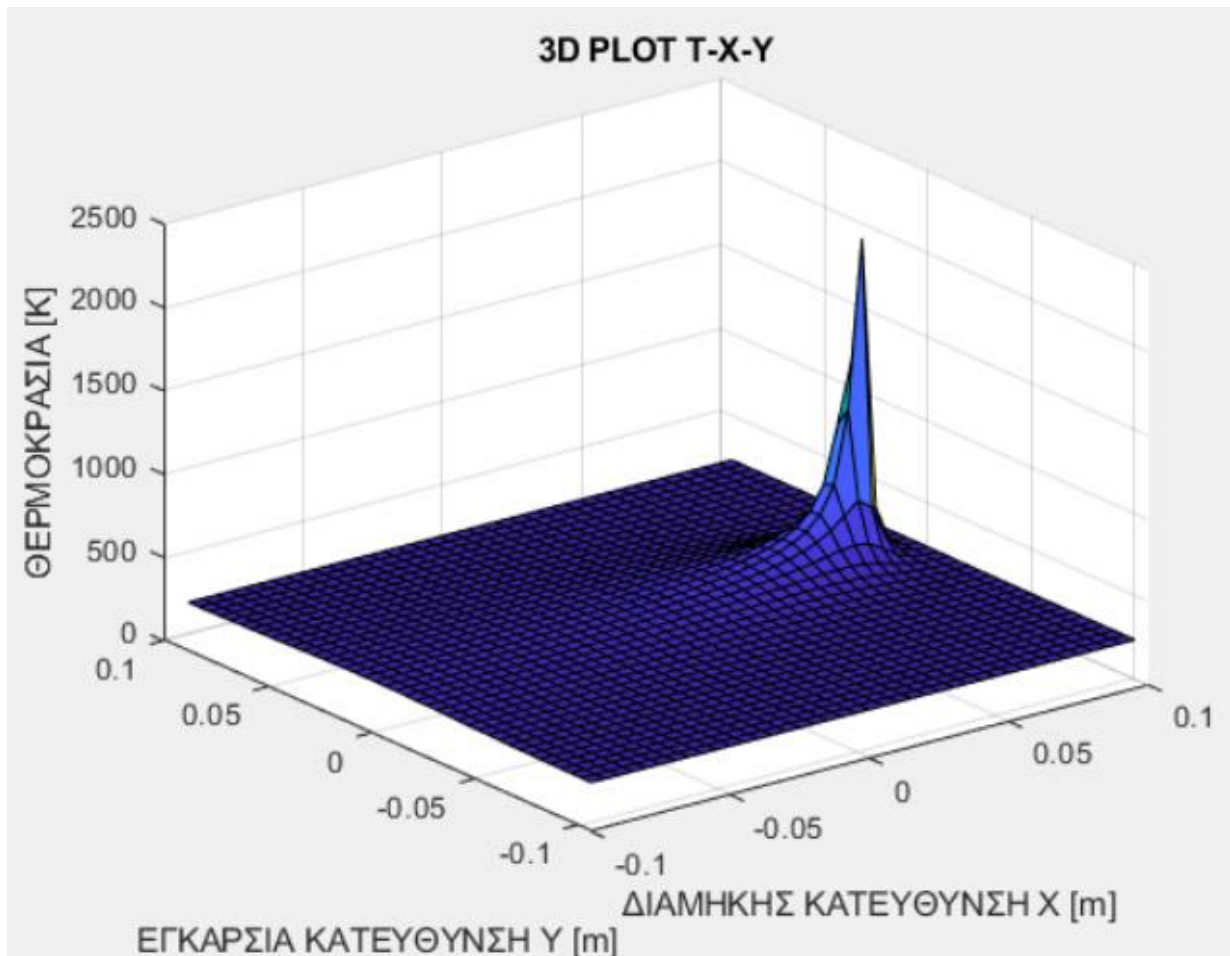
Σχήμα 4. Γεωμετρικό μοντέλο για την λύση του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας στις συγκολλήσεις [1].

Όπου : $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$ είναι η θερμοδιαχυτότητα του υλικού σε m^2/s .

- k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($W/m \cdot K$)
- ρ είναι η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3)
- c είναι η ειδική θερμότητα ($J/kg \cdot K$)
- x, y, z είναι οι γεωμετρικές συντεταγμένες με κέντρο O πάνω στο ηλεκτρικό τόξο. (m)
- T είναι η θερμοκρασία (K)

Για την επίλυση της ανωτέρω εξίσωσης είναι αναγκαία η χρήση συνοριακών συνθηκών. Παρακάτω φαίνεται ως παράδειγμα, με χρήση προγραμματισμού σε περιβάλλον Matlab, η θερμοκρασιακή κατανομή στον χώρο βασισμένη στο μοντέλο του Rosenthal . Ως συνοριακή συνθήκη έχει ληφθεί ότι το έλασμα είναι ημιάπειρο, μεγάλου πάχους. Παράλληλα έχουν θεωρηθεί ημι-μόνιμες συνθήκες συγκόλλησης, δηλαδή το σύστημα αξόνων κινείται μαζί με την πηγή. Τέλος έχει θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας από την άνω επιφάνεια του ελάσματος. Η τελική εξίσωση είναι η εξής :

$$T(w, R) - T_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot w} \cdot \frac{e^{-\frac{u}{2 \cdot a} \cdot R}}{R} \quad [2.3]$$



Σχήμα 5. Θερμοκρασιακό πεδίο στον χώρο με επίλυση της εξίσωσης του Rosenthal για ημίαιπρο έλασμα μεγάλου πάχους .

Στο Σχήμα 5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές θερμοκρασιακές κατανομές στο χώρο γύρω από τη πηγή. Στον άξονα x-y υπάρχει συγκέντρωση ισόθερμων μπροστά από το τόξο και σχηματισμός ουράς κομήτη . Πληροφοριακά το μέγεθος της ουράς κομήτη εξαρτάται από την ταχύτητα συγκόλλησης και τη θερμοδιαχυτότητα του υλικού . Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη θερμοδιαχυτότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η ουρά κομήτη. Ακόμα, υπάρχει έντονη συγκέντρωση ισόθερμων καμπυλών κοντά στη πηγή στο επίπεδο z-y.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικός είναι ο υπολογισμός του ρυθμού ψύξης της συγκόλλησης. Αυτό είναι κρίσιμο καθώς είναι δυνατό να προβλεφθούν οι μεταλλουργικές μεταβολές στη μικροδομή όπως π.χ.ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στους χάλυβες Μία αποτελεσματική μέθοδος για την μείωση του ρυθμού ψύξης είναι η προθέρμανση, ώστε να μην υπάρξει σχηματισμός ανεπιθύμητων φάσεων στη μικροδομή της ΘΕΖ. Ακόμα, ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας αν αυξηθεί, οδηγεί σε μείωση του ρυθμού ψύξης. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω της αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος ή μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης [1,4].

2.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Οι παραμένουσες τάσεις προκαλούνται από τη μη ομοιόμορφη θερμική διαστολή και συστολή του μετάλλου συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Όταν το μέταλλο θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, διαστέλλεται. Η διαστολή είναι μεγαλύτερη στις περιοχές κοντά στη θερμική πηγή. Από την άλλη, όσο το μέταλλο ψύχεται, σημειώνεται συστολή. Η αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον δεν είναι όμως ομοιόμορφη και το μέταλλο κοντά στη ραφή ψύχεται με ταχύτερους ρυθμούς απ' ό,τι το μέταλλο μακριά. Συνεπώς, σημειώνεται εντονότερη συστολή κοντά στη ραφή με αποτέλεσμα να δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις . [1]

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η παραμένουσα τάση στη συγκόλληση προκαλείται από ανομοιόμορφη κατανομή των θερμικών παραμορφώσεων. Και πιο συγκεκριμένα τη διαμήκη συστολή που συμβαίνει κατά τη ψύξη του μετάλλου.

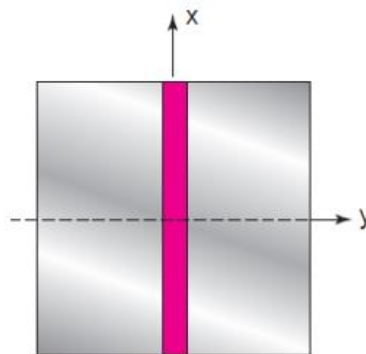
Στις μετωπικές συγκολλήσεις αναπτύσσονται παραμένουσες τάσεις, όμως οι σημαντικότερες είναι αυτές σε άξονα παράλληλα με την ραφή (σ_x) καθώς και στον κάθετο σε αυτό άξονα (σ_y). Η διαμήκης τάση (σ_x) είναι εφελκυστική κοντά στην περιοχή της ραφής και θλιπτική όσο πιο απομακρυνόμαστε από αυτήν στον άξονα y . [1]

Έχει υπολογιστεί ότι η κατανομή της διαμήκουσ τάσης είναι :

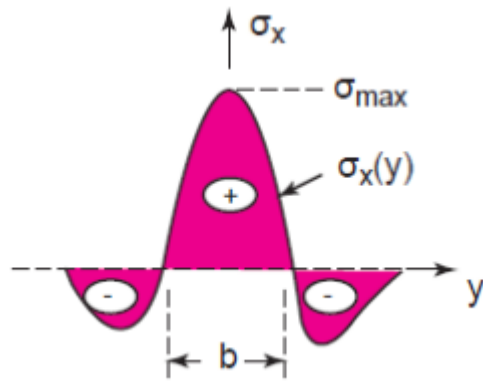
$$\sigma_x(y) = \sigma_{max} \cdot [1 - (y/b)^2] \cdot e^{-0.5 \cdot (y/b)^2} \quad [2.4]$$

- σ_{max} είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση
- b είναι το πλάτος της εφελκυστικής ζώνης
- x, y συντεταγμένες στο επίπεδο (Σχήμα 6)

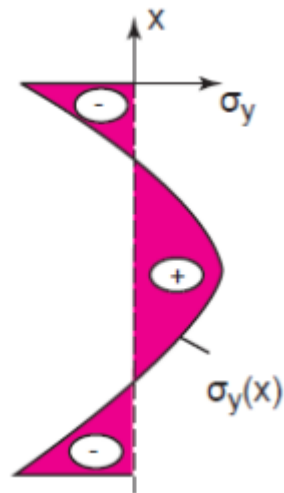
Όσον αφορά την παραμένουσα τάση σ_y προκαλείται κυρίως από την εγκάρσια συστολή κοντά στη ραφή της συγκόλλησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν υπάρξει εξωτερικός περιορισμός τότε οι τάσεις μεταβάλλονται. Για παράδειγμα σε περίπτωση ύπαρξης πάκτωσης, το πεδίο των τάσεων διαφέρει σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με το σώμα που δεν φέρει περιορισμούς.



Σχήμα 6. Σύστημα αξόνων σε συγκόλληση [1].



Σχήμα 7. Κατανομή παραμενουσών τάσεων στον άξονα x [1].



Σχήμα 8. Κατανομή παραμενουσών τάσεων στον άξονα y [1].

2.1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που επιδρούν στις παραμένουσες τάσεις. Ένας από τους πιο κρίσιμους είναι το μήκος συγκόλλησης. Είναι γνωστό, ότι για να αναπτυχθεί πλήρως η παραμένουσα τάση σε μία συγκόλληση χρειάζεται να υπάρχει αναγκαίο μήκος. Η μέγιστη τιμή της παραμένουσας τάσης είναι στο μέσο του ελάσματος ενώ στα άκρα μηδενίζεται. Έχει παρατηρηθεί, ότι για την πλήρη ανάπτυξη της παραμένουσας τάσης σε μία συγκόλληση απαιτείται ένα ικανό μήκος L_0 . Για τον χάλυβα έχει υπολογιστεί ότι $L_0 = 30 \text{ cm}$ [1]

Το πλάτος του ελάσματος και η ακολουθία συγκόλλησης δεν επηρεάζουν τις παραμένουσες τάσεις μίας συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει καθώς η άμεση επίδραση που έχουν είναι στην παραμόρφωση και όχι στις παραμένουσες τάσεις, γεγονός που έχει αποδειχθεί πειραματικά.

Κάθε κατασκευή υπόκειται σε εξωτερικά φορτία. Αυτές οι εξωτερικά εφαρμοζόμενες τάσεις εφελκυστικές ή θλιπτικές προστίθενται διανυσματικά στις ήδη προϋπάρχουσες παραμένουσες τάσεις. Αυτό σημαίνει ότι αν σε ένα προϋπάρχον εφελκυστικό πεδίο παραμενουσών τάσεων ασκηθεί εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο η θραύση θα επέλθει σε σημαντικά χαμηλότερη τιμή της εξωτερικής αυτής δύναμης σε σχέση με μία κατασκευή στην οποία δεν υπήρχαν παραμένουσες τάσεις. Ομοίως το αντίστροφο μπορεί να συμβεί σε περίπτωση που τα φορτία είναι αντίθετα. Είναι λοιπόν ευδιάκριτο ότι υπάρχει κίνδυνος για θραύση σε εφελκυσμό ή λυγισμό σε φορτία σημαντικά μικρότερα από αυτά που είχαν ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό μίας συγκολλητής κατασκευής. Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά των συγκολλητών κατασκευών εξαρτάται από το μέγεθος των εξωτερικών φορτίων. Συγκεκριμένα [1]:

- Εξωτερικό φορτίο που οδηγεί σε γενικευμένη πλαστική παραμόρφωση οδηγεί σε μηδενισμό της παραμένουσας τάσης.
- Όσο μικρότερα είναι τα εξωτερικά ασκούμενα φορτία τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση που έχει η παραμένουσα τάση.
- Επαναλαμβανόμενες φορτίσεις σε κατασκευές μειώνουν τις παραμένουσες τάσεις.
- Με την αύξηση της τιμής του εξωτερικά ασκούμενου πεδίου τάσεων στην συγκόλληση μειώνεται αισθητά το πεδίο των παραμενουσών τάσεων.

Για τον παραπάνω λόγο όταν πραγματοποιείται υδραυλική δοκιμή (σχήμα 9) σε δοχεία πίεσης για ανίχνευση σφαλμάτων μειώνονται οι παραμένουσες τάσεις στο δοχείο. Επιπρόσθετα, η διανυσματική πρόσθεση των εξωτερικών και των παραμενουσών τάσεων επιδρά στην αντοχή σε κόπωση μίας κατασκευής καθώς και στην πιθανή αστοχία λόγω λυγισμού. Είναι λοιπόν εμφανές, ότι χρειάζεται να ληφθεί υπόψη σε μεγάλο βαθμό η εξωτερική φόρτιση στη συγκόλληση σε συνδυασμό με τις παραμένουσες τάσεις ώστε να μπορέσει να μην υπάρξει απρόσμενη αστοχία στην κατασκευή. Στο παρακάτω σχήμα είναι εμφανής μία αστοχία κατά τη διάρκεια υδραυλικής δοκιμής σε αγωγό (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Υδραυλική δοκιμή πίεσης σε αγωγό με τελική αστοχία και διαρροή. [6]

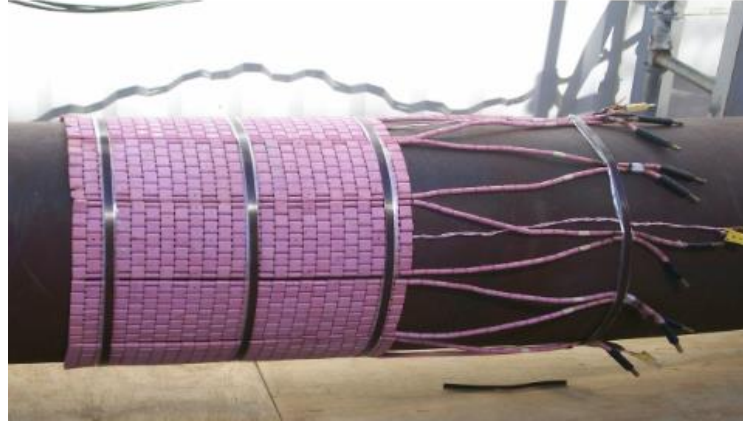
2.1.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Γίνεται αντιληπτό, ότι οι παραμένουσες τάσεις μετά από τη συγκόλληση μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά προβλήματα στη κατασκευή και να επιφέρουν ακόμα και πρόωρη κατάρρευση της. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να αναλυθούν οι πιθανοί τρόποι περιορισμού της έντασης του πεδίου των παραμενουσών τάσεων έτσι ώστε να κρατηθούν στις ελάχιστες δυνατές τιμές τους. Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι μείωσης των παραμενουσών τάσεων τους χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες:

- Σχεδιασμός πριν τη συγκόλληση.
- Διαδικασίες ανακούφισης τάσεων μετά τη συγκόλληση.

Πριν τη συγκόλληση είναι αναγκαίος ο περιορισμός του όγκου εναποτιθέμενου μετάλλου, καθώς οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζονται από τη συστολή του βασικού μετάλλου κατά τη στερεοποίησή [1,5]. Για παράδειγμα σε μία λοξοτομή σχήματος U απαιτείται γέμισμα με λιγότερο μέταλλο συγκόλλησης από μία V. Επιπρόσθετα, τα ανοίγματα της σύνδεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρά [1]. Κυρίως, σε πιο παχιά ελάσματα έχει παρατηρηθεί, ότι η χρήση λοξοτομής σχήματος V πιθανώς οδηγεί σε μικρότερες παραμένουσες τάσεις και ενδεχομένως σε μεγαλύτερη σταθερότητα. Επίσης, έχει αποδειχθεί, ότι η διαδικασία «backstepping» (Εναπόθεση υλικού και δημιουργία κάθε πάσου σε αντίθετη φορά από αυτή της δημιουργίας της ραφής της συγκόλλησης) μπορεί να επιφέρει μείωση της συστολής και έχει θετική επίδραση στην αντιμετώπιση των παραμενουσών τάσεων [5]. Τέλος, οι παράμετροι της συγκόλλησης παίζουν κρίσιμο ρόλο και πρέπει να γίνεται εκτεταμένη προμελέτη. Με τον όρο προμελέτη εννοούμε της προκαταρκτική σχεδίαση, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές μορφές και τα αίτια αστοχίας μίας συγκόλλησης.

Σχετικά με τις διαδικασίες ανακούφισης τάσεων μετά τη συγκόλληση, αφορούν κυρίως θερμικές και μηχανικές επιδράσεις. Η πιο γνωστή μέθοδος ανακούφισης των παραμενουσών τάσεων είναι η αποτατική ανόπτηση (Σχήμα 10), η οποία περιλαμβάνει θέρμανση της συγκόλλησης έως κάποια θερμοκρασία ακολουθούμενη από αργή ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την πρακτική εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται ομοιόμορφη θέρμανση σε μεγάλους φούρνους ή τοπική θέρμανση και πιθανώς χρειάζεται ελεγχόμενη επιταχυνόμενη ψύξη μετά. Πέρα από τους παραπάνω τρόπους σε μερικές περιπτώσεις γίνεται χρήση επαγωγικής θέρμανσης. Αυτή η μέθοδος είναι ανέπαφη και βασίζεται σε εκπομπή διεγερμένων ατόμων μέσω αγωγής. Αυτός ο τρόπος προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερο ποσοστό ομοιόμορφης θέρμανσης, μικρότερο κόστος αναλώσιμων και μεγαλύτερη ασφάλεια σε κάθε χρήση. Παρόλο που οι μέθοδοι ανακούφισης τάσεων έχουν ευρεία χρήση, πολλές φορές είναι πιθανό να οδηγήσουν σε ανάπτυξη ανεπιθύμητων παραμορφώσεων στη συγκόλληση [7].



Σχήμα 10. Διαδικασία αποτατικής ανόπτωσης σε συγκόλληση αγωγού [7].

Μία μέθοδος ανακούφισης τάσεων, η οποία περιλαμβάνει μηχανική επίδραση, είναι η σφυρηλάτηση (hammer peening). Η συγκεκριμένη μέθοδος, μειώνει τις παραμένουσες τάσεις σε μεγάλο βαθμό ειδικά κοντά στον πόδα της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα η διαδικασία της σφυρηλάτησης επιβάλλει θλιπτικό φορτίο οδηγεί σε χαλάρωση των τάσεων μέσω πλαστικοποίησης. Η επιβολή θλιπτικού φορτίου γίνεται μέσω ειδικού εξοπλισμού εργαστηρίου. Έχει αποδειχθεί, ότι αυτή η μέθοδος βελτιώνει την αντοχή σε κόπωση [8]. Ο εξοπλισμός αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 11. Η μέθοδος High Frequency Mechanical Impact που χρησιμοποιείται σε αυτή τη Διπλωματική είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη σφυρηλάτηση με διαφορά ότι το μέσο βάθος εισχώρησης είναι μεγαλύτερο στη HFMI. Εκτεταμένη ανάλυση της μεθόδου αυτής θα γίνει στη συνέχεια.



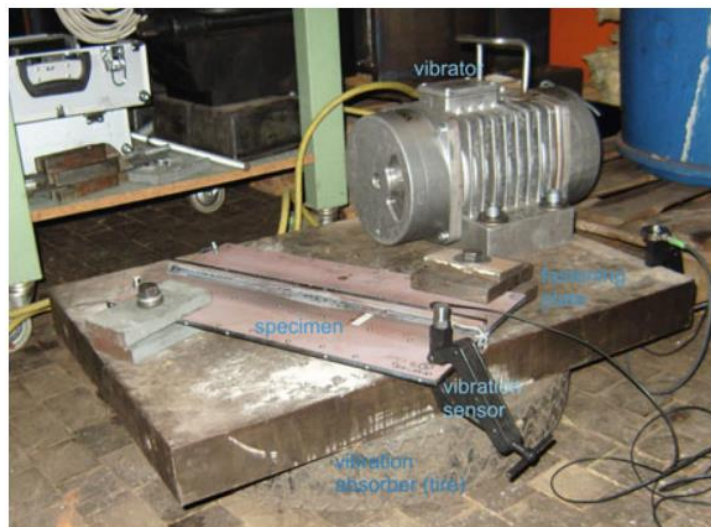
Σχήμα 11. Εξοπλισμός για Hammer Peening [8].

Μία ακόμα μέθοδος χαλάρωσης των παραμενουσών τάσεων μετά τη συγκόλληση είναι η σφαιροβολή (shot peening – σχήμα 12). Σε αυτή τη μέθοδο, γίνεται κρούση της επιφάνειας της ραφής με μεταλλικά συνήθως σωματίδια, τα οποία προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα και προκαλούν τοπική πλαστικοποίηση και χαλάρωση των τάσεων. Κατά συνέπεια, επιβάλλεται πεδίο θλιπτικών τάσεων και έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνεται η συμπεριφορά σε κόπωση σε μεγάλο βαθμό. Αξίζει να σημειωθεί, ότι αυτή η μέθοδος επιδρά θετικά ως προς τη διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Συχνά γίνεται χρήση και laser peening [9].



Σχήμα 12. Σφαιροβολή σε συγκόλληση κυλινδρικού αγωγού [9].

Η εφαρμογή ταλαντώσεων με μηχανικά κύματα ή υπερήχους (Σχήμα 13) αποτελεί και αυτή με τη σειρά της μία μέθοδο μείωσης των παραμενουσών τάσεων μετά τη συγκόλληση. Στη συγκεκριμένη καινοτόμο μέθοδο γίνεται επιβολή πολλαπλών κυκλικών φορτίων στο συγκολλημένο έλασμα είτε με μηχανικές ταλαντώσεις είτε με υπερήχους. Αυτή η μέθοδος δεν επιφέρει πλαστικοποίηση του υλικού. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι, ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Εντούτοις, η χρήση της γίνεται πιο σπάνια από τις άλλες προαναφερθέντες μεθόδους [1,10,11].



Σχήμα 13. Εξοπλισμός μεθόδου VSR σε συγκόλληση [11].

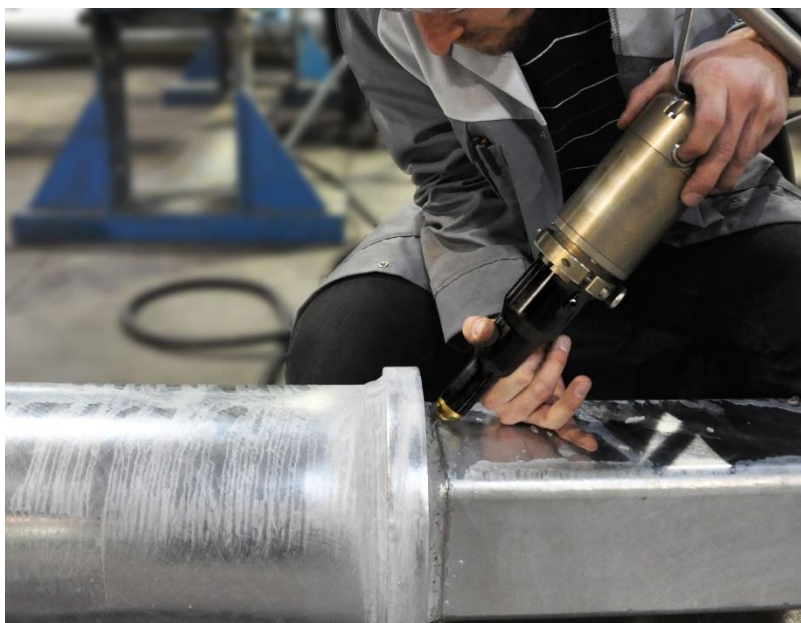
2.2 HFMI

Μία νέα μέθοδος η οποία φαίνεται να μειώνει τις παραμένουσες τάσεις σε μία συγκόλληση είναι το High Frequency Mechanical Impact (HFMI – σχήμα 14). Η μέθοδος αυτή εκτός από την επιβολή θλιπτικού φορτίου κοντά στον πόδα της συγκόλλησης, επιφέρει ομαλοποίηση της γεωμετρίας της ραφής, ενώ παράλληλα οδηγεί σε αύξηση της τοπικής σκληρότητας της επιφάνειας μέσω της πλαστικοποίησης του υλικού. Αυτός ο τρόπος μείωσης των παραμενουσών τάσεων περιλαμβάνει μηχανική επίδραση και διαφέρει με την κοινή σφυρηλάτηση (hammer reening) στο βάθος εισχώρησης του μέσου κρούσης καθώς και στην υψηλή συχνότητα με την οποία εκτελείται [12,13].

Εν γένει, οι ρωγμές ξεκινούν κυρίως από σημεία συγκέντρωσης τάσεων, όπως είναι το σημείο επαφής βασικού μετάλλου με θερμικά επηρεασμένη ζώνη με μέταλλο συγκόλλησης, φαινόμενο το οποίο περιορίζεται δραστικά από τη χρήση της μεθόδου αυτής. Μέσω της χρήσης HFMI επιτυγχάνονται τα παρακάτω:

- Μείωση σημείων συγκέντρωσης τάσης στο σημείο μετάβασης από το μέταλλο συγκόλλησης σε θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στο βασικό μέταλλο κοντά στον πόδα της συγκόλλησης.
- Εξάλειψη γεωμετρικών ασυνεχειών και ατελειών συγκόλλησης.
- Μείωση εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων μέσω εισαγωγής θλιπτικού φορτίου.

Η μέθοδος HFMI έχει προταθεί ως έμπιστη, αποτελεσματική και φιλική ως προς τον χρήστη μέθοδος μείωσης των παραμενουσών τάσεων σε μια συγκόλληση. Το 2016 ΠW υιοθέτησε πρόταση χρήσης του HFMI για τη βελτίωση της αντοχής σε κόπωση μίας κατασκευής. Αυτές οι προτάσεις δίνουν εκτεταμένες πληροφορίες για ποιοτικό έλεγχο και βελτίωση αντοχής σε κόπωση για μεγάλο εύρος χαλύβων, με όριο διαρροής 235-950 MPa. Αναφέρεται 12.5% αύξηση στην αντοχή τους σε κόπωση για κάθε 200 MPa αύξησης του ορίου διαρροής. Το παραπάνω οφείλεται στην μεγάλη ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την κρούση του PIN [13,16].



Σχήμα 14. Μέθοδος HFMI [14].

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ HFMI

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου HFMI είναι η χρήση ειδικού πιστολιού (Σχήμα 15) το οποίο στην άκρη του φέρει ειδική «μύτη» κρούσης που ονομάζεται PIN. Συγκεκριμένα το πιστόλι που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο τροφοδοτείται με πεπιεσμένο αέρα πίεσεως 6-8 bar και παροχής τουλάχιστον 250 l/min. Δεν απαιτείται εν γένει επιπρόσθετη παροχή ηλεκτρική ενέργειας πέρα από την παραπάνω. Η συχνότητα κρούσης είναι μεταξύ 180Hz έως 300Hz και καθορίζεται από την απαιτούμενη ένταση εργασίας. Υπάρχουν ειδικές διατάξεις με ρομποτική εφαρμογή της διαδικασίας. Μερικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον εξοπλισμό του HFMI είναι :

- Ειδική σχεδίαση για προσέγγιση συγκολλήσεων που έχουν δύσκολη προσβασιμότητα.
- Χαμηλό σχετικά βάρος.
- Εύκολη καθοδήγηση PIN με συνήθως ύπαρξη ειδικής διάταξης για προσαρμογή γωνίας.
- Μικρός χρόνος διεργασίας.
- Δεν υπάρχει παρουσία ακαθαρσιών μετά τη διεργασία.

Σχετικά με την εκτέλεση της διεργασίας, η HFMI συγκαταλέγεται στις ειδικές διεργασίες οι οποίες προδιαγράφουν απαιτήσεις για τον κατασκευαστή του εξοπλισμού, το άτομο/εταιρεία που πραγματοποιεί την HFMI και τη κατάρτιση του χειριστή. Προφανώς και πριν τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι αναγκαία η προμελέτη σχετικά με την τροφοδοσία του πεπιεσμένου αέρα, το υλικό στο οποίο θα γίνει η κρούση, τη γωνία επαφής του PIN και άλλων παραμέτρων. Πριν από κάθε διεργασία είναι αναγκαία η χρήση του HFMI σε ένα δείγμα και στη συνέχεια στη πραγματική συγκόλληση για αποφυγή σφαλμάτων. Όσον αφορά τον χειρισμό του όπλου, η προτεινόμενη ταχύτητα είναι μεταξύ 3-20 mm/s κατά μήκος του ποδός της συγκόλλησης. Συνήθως απαιτείται μόνο ένα πέρασμα. Το αποτέλεσμα της μεθόδου πρέπει να είναι απόλυτα εμφανές και συνήθως γίνεται ειδική μέτρηση στο τέλος για επιβεβαίωση του βάθους εισχώρησης του PIN [14].

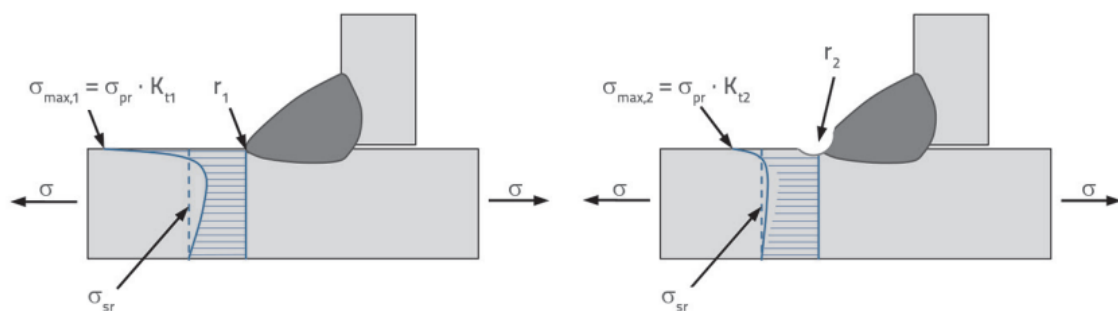


Σχήμα 15. Όπλο HFMI και ονοματολογία επιμέρους τμημάτων του [14].

2.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ HFMI

Η μέθοδος HFMI επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το εφελκυστικό πεδίο παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης, ενώ παράλληλα επιδρά σημαντικά στην σκληρότητα του του μετάλλου στο οποίο γίνεται η κρούση επηρεάζοντας επιπρόσθετα σε μεγάλο βαθμό τη γεωμετρία του.

Η συγκόλληση επιφέρει ξαφνική μεταβολή της γεωμετρίας της κατασκευής με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Η συγκέντρωση της τάσης ορίζεται από τον συντελεστή έντασης τάσης K_t . Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του κοντά στον πόδα της συγκόλλησης. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση της γωνίας τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής έντασης τάσεων. Η μέθοδος HFMI βελτιώνει τη γεωμετρία αυξάνοντας της ακτίνα r στον πόδα της συγκόλλησης όπως φαίνεται στο σχήμα 16 [14,15]:



Σχήμα 16. Επίδραση HFMI στη γεωμετρία στο πόδι της συγκόλλησης [15].

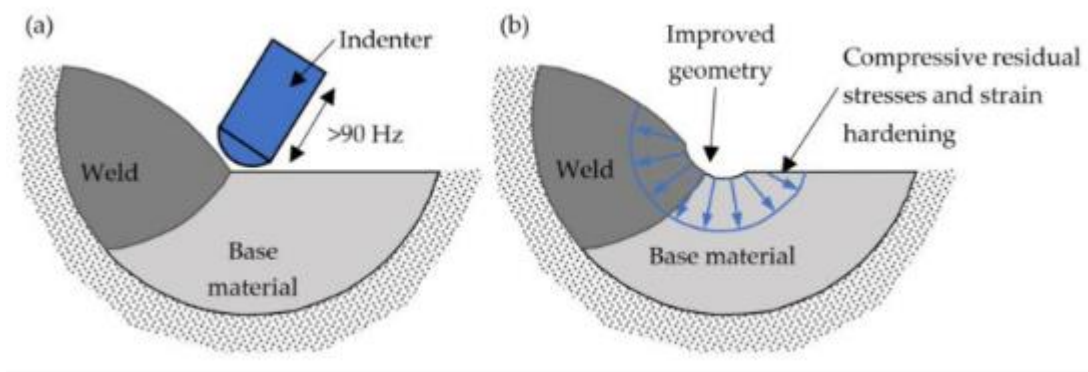
Με τη παραπάνω μέθοδο η ακτίνα από r_1 γίνεται r_2 καταφέροντας έτσι την επιβολή μίας ομαλότερης μετάβασης στη γεωμετρία μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και βασικού μετάλλου.

Όσον αφορά το πεδίο παραμενουσών τάσεων μετά τη συγκόλληση, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία ρωγμών, ενώ μπορεί να επιφέρει ψαθυρή θραύση. Ο λόγος τάσεων R ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης προς την μέγιστη τάση μίας κυκλικής φόρτισης. Η υψηλή τιμή παραμένουσας τάσης οδηγεί σε αύξηση του σ_{max} οδηγώντας σε μικρότερη διάρκεια ζωής της συγκολλητής κατασκευής. Με την εισαγωγή θλιπτικού φορτίου από τη μέθοδο HFMI το προαναφερθέν εφελκυστικό φορτίο μειώνεται, ενώ κάποιες φορές εξαλείφεται. Η θετική επίδραση του HFMI έχει παρατηρηθεί ότι είναι καλύτερη όταν το εύρος τάσης είναι μικρότερο. Ακόμα η μέση τιμή της θλιπτικής επιβαλλόμενης τάσης αυξάνεται με αύξηση του ορίου διαρροής του χάλυβα ενώ η επίδραση φτάνει μέχρι μερικά χιλιοστά κάτω από την επιφάνεια κρούσης. Οι επιβαλλόμενες θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μπορούν να χαλαρώσουν μερικώς ή εντελώς εξαιτίας μεμονωμένων τοπικών αυξομειώσεων της τάσης που προκαλούνται από εξωτερικά φορτία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής σε κόπωση της κατασκευής που φέρει τη συγκόλληση. Για παράδειγμα, ένα στατικό φορτίο με τιμή 40% του ορίου διαρροής ενός χάλυβα οδηγεί σε χαλάρωση των θλιπτικών τάσεων της μεθόδου HFMI. Το παραπάνω φαινόμενο χαλάρωσης των τάσεων εξαρτάται από παράγοντες όπως το φορτίο «προ-φόρτισης», το τοπικό όριο διαρροής, το συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων και το πεδίο εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων. Ακόμα, η θετική επίδραση της μεθόδου HFMI μειώνεται με αύξηση της μέσης τάσης :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad [2.5]$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η χαλάρωση των τάσεων συμβαίνει κυρίως σε χάλυβες χαμηλής αντοχής οι οποίοι δέχονται πεδίο υψηλών εφελκυστικών τάσεων. Εν γένει, η χαλάρωση που σημειώνεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής είναι μικρή και έτσι το πεδίο θλιπτικών τάσεων που επιβάλλεται από τις πολλαπλές κρούσεις του PIN δεν φέρει μεγάλες μεταβολές [1,14,15].

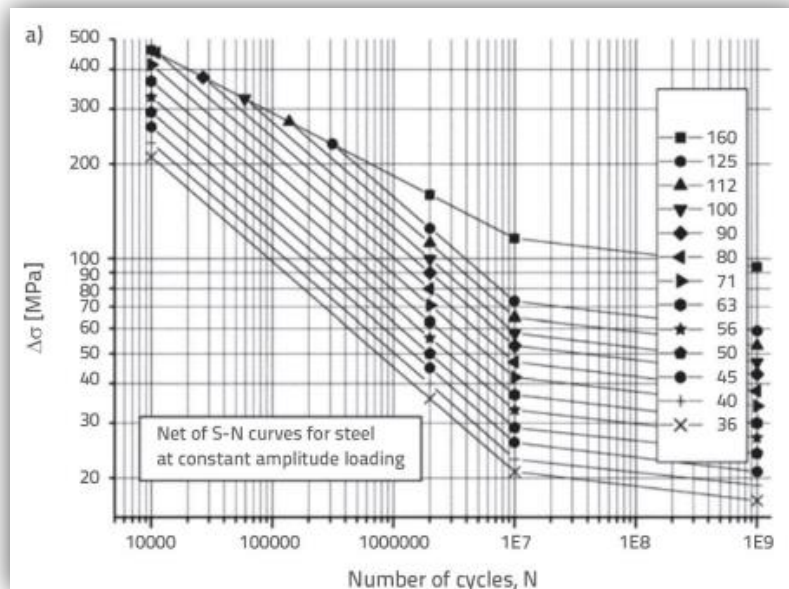
Εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης που επιβάλλεται από το PIN η μέθοδος HFMI οδηγεί σε τοπική αύξηση σκληρότητας στην επιφάνεια του υλικού όπου γίνεται η κρούση οδηγώντας σε τοπική αύξηση του ορίου διαρροής. Το παραπάνω γεγονός οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση για τη συγκολλητή κατασκευή. Γενικά, το βάθος επίδρασης της σκληρότητας φτάνει έως 1 mm. Όπως και προηγουμένως η επίδραση στη σκληρότητα (Σχήμα 17) από το HFMI μειώνεται με την αύξηση του ορίου διαρροής του χάλυβα [15].



Σχήμα 17. Επίδραση HFMI σε γεωμετρία συγκόλλησης και σκληρότητα υλικού [15].

2.2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΗΦΜΙ

Για τον υπολογισμό της αντοχής συγκόλλησης σε κόπωση γίνεται χρήση των καμπυλών S-N. Για ένα δοκίμιο και για σταθερό εύρος φόρτισης ισχύει το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 18). Σε αυτό ο άξονας x δίνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης (λογαριθμική κλίμακα) έως τη θραύση N ενώ ο y άξονας το εύρος τάσης $\Delta\sigma$. Παρακάτω παρατίθενται τυπικά διαγράμματα S-N σύμφωνα με το EN 1993-1-9 και τα δεδομένα του IIW [16].



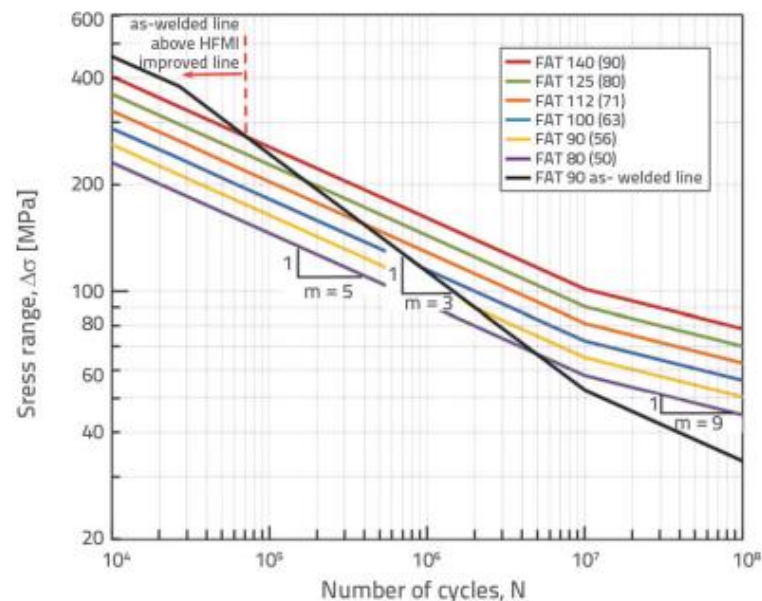
Σχήμα 18. S-N καμπύλες για συγκολλημένο χάλυβα σύμφωνα με IIW [16].

Κάθε καμπύλη S-N μπορεί να οριστεί από μία χαρακτηριστική τιμή εύρους αντοχής μίας λεπτομέρειας σε 2 εκατομμύρια κυκλικές φορτίσεις. Αυτή η τιμή καλείται ως «Fatigue Class» (FAT). Επίσης, οι καμπύλες S-N εξαρτώνται από έναν συντελεστή κλίσης m ο οποίος παίρνει τιμές συνήθως από 3-5. Για $m=3$ το συμβατικό όριο διαρκούς αντοχής, δηλαδή όταν πρακτικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής γίνεται άπειρη για εύρος τάσης κάτω από το όριο διαρκούς αντοχής σ_e , γίνεται ίσο με $N_f=10^7$ κύκλους. Για $m=5$ γίνεται 10^8 κύκλους [16]. Οι παραπάνω καμπύλες S-N αναφέρονται σε συγκεκριμένες λεπτομέρειες συγκολλήσεων και σε συγκεκριμένους τρόπους θραύσης αυτών [16]. Με τον όρο λεπτομέρεια εννοούμε διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις συγκολλήσεων σύμφωνα με το International Institute of Welding βασιζόμενοι σε :

1. Γεωμετρία συγκόλλησης.
2. Διεύθυνση εναλλασσόμενων τάσεων.
3. Μέθοδος συγκόλλησης και προετοιμασία ακμών.
4. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι που εφαρμόστηκαν στη συγκολλητή κατασκευή.
5. Τοποθεσία ατέλειες

Μία συγκόλληση συμβολής για παράδειγμα με ατελή διείδυση ανήκει στη κατηγορία FAT36 ενώ μία αυχενική συγκόλληση με ρωγή στον πόδα ανήκει ομοίως στην κατηγορία FAT36 [16].

Οι καμπύλες S-N για συγκολλήσεις που έχουν υποστεί HFMI βασίζονται σε κλίση $m=5$, ενώ παράλληλα, όπως προαναφέρθηκε η τιμή FAT ορίζεται για $N=2 \cdot 10^6$ κύκλους. Η επίδραση του HFMI αφορά κυρίως λεπτομέρειες FAT50 έως FAT90. Το παραπάνω οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα FAT αφορούν λεπτομέρειες που έχουν ήδη διορθωθεί ή λεπτομέρειες που δεν έχουν άμεση σχέση με τη περιοχή συγκόλλησης. Επίσης, για Fatigue Class κάτω από 50 αυτές οι λεπτομέρειες έχουν υψηλό ρίσκο θραύσης στη ρίζα της συγκόλλησης και συνεπώς η μέθοδος HFMI δεν μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις. Η μέγιστη τιμή FAT που μπορεί να επιτευχθεί σε μία λεπτομέρεια ισούται περίπου με τη κατηγορία του FAT πολλαπλασιασμένη με το 1.6. Για παράδειγμα, αν μία λεπτομέρεια FAT71 υποστεί διεργασία HFMI η νέα κατηγορία είναι η FAT112. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 19) αυτή η λεπτομέρεια φαίνεται ως 112(71). Επιπρόσθετα, είναι εμφανές, ότι για την καμπύλη της λεπτομέρειας FAT90 σημειώνεται σημείο τομής με την καμπύλη με συντελεστή $m=3$ (Καμπύλη συγκόλλησης η οποία δεν έχει υποστεί κάποια διεργασία) για $N=72,000$ κύκλους. Αυτό σημαίνει, ότι το HFMI δεν προσφέρει ικανοποιητική αύξηση και αντοχή σε κόπωση στη λεπτομέρεια FAT90 για διάρκεια ζωής μικρότερη των 72000 κύκλων [16,17,18].



Σχήμα 19. Καμπύλη S-N για συγκολλήσεις με λεπτομέρειες οι οποίες έχουν υποστεί μέθοδο HFMI για χάλυβες με $\sigma_{yield} \leq 355$ MPa και $R \leq 0.15$. Η τιμή στις παρενθέσεις υποδηλώνει την κλάση της λεπτομέρειας μετά το HFMI σύμφωνα με τον Hobbacher [17,18].

2.3 ΧΑΛΥΒΕΣ HSLA

Οι χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης και υψηλής αντοχής (HSLA) αντιπροσωπεύουν μία ομάδα ελαφρά κραματωμένων φερριτικών/φερριτοπερλιτικών χαλύβων που περιέχουν χαμηλό ποσοστό C (0.05-0.2 %) και όριο διαρροής $\sigma_y = 350-800$ MPa (Σχήμα 20) [20].

Στους χάλυβες η χημική σύσταση και οι θερμομηχανικές διεργασίες επηρεάζουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής διακρίνονται για την καλή αντοχή, την καλή συγκολλησιμότητα, διαμορφωσιμότητα και αντίσταση σε διάβρωση και κόπωση. Οι κύριοι παράγοντες που ευθύνονται για τις ανωτέρω ιδιότητες είναι η εκλέπτυνση των κόκκων της φερριτικής μήτρας, και η σκλήρυνση από την κατακρήμνιση των δευτερευουσών φάσεων που προκύπτουν μέσω των μικροκραματικών προσθηκών και τον έλεγχο της γεωμετρίας των εγκλεισμάτων κατά την παραγωγή [21].

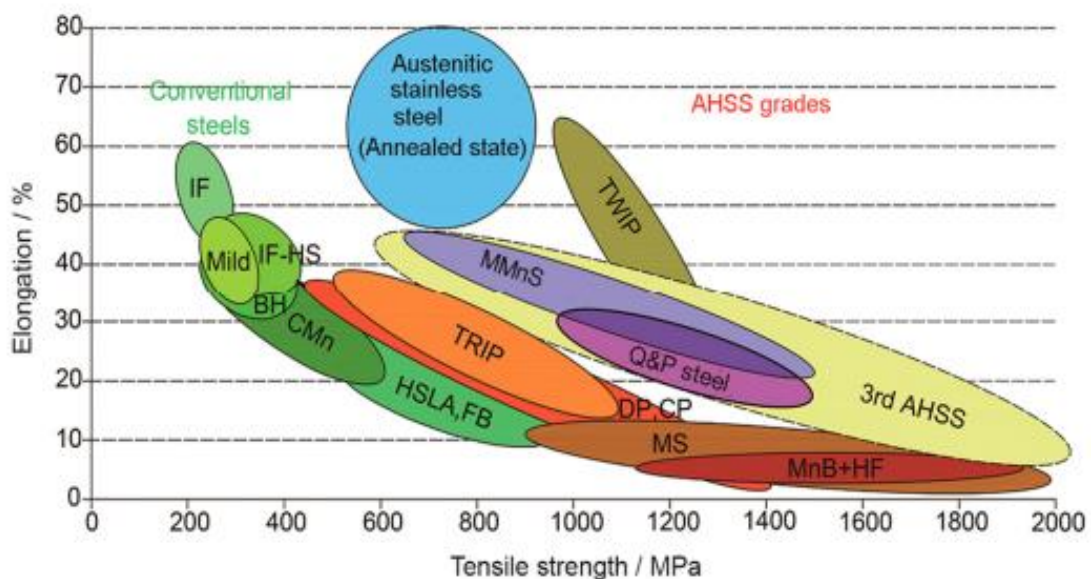
Εκτός από τα παραπάνω, η ανάπτυξη αυτών των χαλύβων επηρεάστηκε άμεσα από την ανάγκη της παραγωγής να μειώσει το κόστος της. Οι χάλυβες HSLA εμφάνισαν πολύ υψηλότερες τιμές αντοχής από τους κοινούς τύπους C-Mn (έως και 200% αύξηση), ενώ παράλληλα η μείωση βάρους έφτανε στο 50%. Μπορεί το κόστος παραγωγής να είναι υψηλότερο, εντούτοις όπως προαναφέρθηκε, η μείωση κόστους προήλθε από τη μείωση των διαστάσεων με δεδομένες μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί, ότι η ανάπτυξη των HSLA πρωτοστάτησε στην αλλαγή της μέχρι τότε θεώρησης για σκλήρυνση των κοινών χαλύβων μέσω της αύξησης του ποσοστού της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Οι νέες τεχνολογίες αφορούσαν τη βελτιστοποίηση θερμικών και μηχανικών κατεργασιών στα μεταλλικά υλικά ενώ παράλληλα, οι Cottrell, Hall και Petch συνεισέφεραν δραστικά στον προσδιορισμό των πρώτων κανόνων συσχέτισης πολυκρυσταλλικών υλικών με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, οδηγώντας στην ανάπτυξη και παραγωγή των πρώτων χαλύβων σκληρυνόμενων μέσω της τροποποίησης των μικρογραφικών τους χαρακτηριστικών. Ο έλεγχος των κραματικών στοιχείων, συνδυαστικά με τα παραπάνω είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαλύβων, με εξαιρετικές τιμές αντοχής, ολκιμότητας και τέλος συγκολλησιμότητας, η οποία μάλιστα τελευταία αυτή παράμετρος «θυσιάζονταν» για την υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Στη σύγχρονη εποχή, η ανάπτυξη HSLA στοχεύει σε ελεγχόμενες χημικές συστάσεις, βελτίωση σχεδίασης, ελεγχόμενη κατεργασία, αύξηση μηχανικής αντοχής, διαμορφωσιμότητας και συγκολλησιμότητας [21,22]. Στον πίνακα 1 φαίνεται η μεταβολή της στοιχειακής σύστασης του χάλυβα τα τελευταία 100 χρόνια.

Πίνακας 1. Μεταβολή στοιχειακής σύστασης δομικού χάλυβα τα τελευταία 100 χρόνια (έλασμα πάχους 19mm, min. YS 355 MPa), [22]

STRUCTURE	C	Si	S	P	Mn	Cr	Al	Nb	CEV
Forth Rail Bridge (1890)	0.23	0.02	0.024	0.046	0.69	*	*	*	0.35
Sydney Harbour Bridge (1929)	0.34	0.20	*	*	1.00	*	*	*	0.51
Melbourne King Street Bridge (1961)	0.23	0.19	0.026	0.017	1.58	0.24	<0.005	*	0.54
Offshore UK (1994)	0.08	0.31	0.002	0.012	1.41	0.027	0.034	0.028	0.32

2.3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ – ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Οι χάλυβες HSLA αποτελούν μία ομάδα πολύ ελαφρά κραματωμένων φερριτικών – φερριτοπερλιτικών χαλύβων, οι οποίοι περιέχουν πολύ μικρό ποσοστό άνθρακα μεταξύ 0.05% έως 0.2%. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το παρακάτω διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη οι χάλυβες HSLA αποτελούν υποευκτητοειδείς χάλυβες, οι οποίοι κατά τη θερμοκρασιακή τους απόψυξη σχηματίζουν προευτηκτοειδή φερρίτη, κυρίως και σε μικρότερο ποσοστό περλίτη. Όσον αφορά τις κραματικές προσθήκες, το Cr, Ni, Cu, Mo προστίθενται συνήθως, αλλά σε ποσοστά λιγότερο από 1.5% συνολικά. Αξίζει να σημειωθεί, η μικροκραματική προσθήκη στοιχείων, όπως το Ti, Nb, V τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στη σκλήρυνση των χαλύβων HSLA [21]. Συγκεκριμένα, το Ti σχηματίζει κατακρηνίσματα μέσω των οποίων συνεισφέρει στη σκλήρωση ενός χάλυβα Το V χρησιμοποιείται ως μικροκραματική προσθήκη στους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες λόγω της δυνατότητας του να σχηματίζει πολύ πλούσιες κατανομές καρβιδίων στη μικροδομή ελέγχοντας το μέγεθος των κόκκων. Το Nb αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο σκλήρωσης σε χάλυβες HSLA μέσω του σχηματισμού καρβονιτριδίων του νιοβίου. Εν γέννη, τα στοιχεία αυτά αυτά παρεμποδίζουν την ανακρυστάλλωση του ωστενίτη κατά τη θερμή έλαση. Αυτό έχει ως συνέπεια την διατήρηση του μεγέθους του ωστενιτικού κόκκου σε χαμηλά επίπεδα ώστε κατά το μετασχηματισμό να προκύψει λεπτόκοκκος φερρίτης. [21,22].



Σχήμα 20. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στο οποίο επισημαίνονται οι κύριες κατηγορίες χαλύβων [21].

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι οι χάλυβες HSLA διαφέρουν εμφανώς από τους συμβατικούς φερριτοπερλιτικούς χάλυβες C-Mn. Το όριο διαρροής των πρώτων κυμαίνεται από 350-800 MPa.

Η θερμομηχανική κατεργασία χαλύβων HSLA αποτελεί μία αυστηρώς σχεδιασμένη τεχνική θερμικής παραμόρφωσης με στόχο τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω του ελέγχου

όλων των σταδίων παραμόρφωσης. Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες, που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη συγκεκριμένη θερμική κατεργασία. Μερικοί από αυτούς είναι :

- Ποσοστό παραμόρφωσης υλικού
- Τρόπος και ρυθμός απόψυξης
- Έλεγχος θερμοκρασιών που επιλέγονται για θερμή έλαση

Στη σύγχρονη παραγωγή ελασμάτων HSLA πέντε είναι οι πιο βασικές διεργασίες (Σχήμα 21) που συμβάλλουν περισσότερο στο τελικό προϊόν :

1. Αναθέρμανση υλικού (Slab Reheating)

Στη παραπάνω διεργασία, ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 1150 °C και 1300 °C με στόχο την ωστενιτοποίηση της μικροδομής. Παράλληλα, ελέγχεται το αρχικό μέγεθος των κόκκων του υλικού, ενώ παράλληλα, έχει διαλυτοποιηθεί το μεγαλύτερο ποσοστό των δευτερευουσών φάσεων και η όποια περαιτέρω διάχυση των στοιχείων [21].

2. Πρώτο στάδιο παραμόρφωσης (Roughing)

Στο παραπάνω στάδιο γνωστό και σαν πρώτο στάδιο έλασης, το υλικό ψύχεται, ώστε να παραμορφωθεί για πρώτη φορά σε μία σειρά ελάστρων, σε θερμοκρασία ανώτερη των 1000 °C και μετατρέπεται σε έλασμα. Σκοπός της συγκεκριμένης διεργασίας είναι η επίτευξη μίας ομοιογενούς και παράλληλα εκλεπτυσμένης ωστενιτικής μικροδομής [21].

3. Θερμοκρασία τελικού σταδίου παραμόρφωσης (Finishing Temperature)

Με τη παραπάνω ελεγχόμενη θερμομηχανική κατεργασία παράγεται εκλεπτυσμένη φερριτική μήτρα στη μικροδομή ενός HSLA με αποτέλεσμα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Ύστερα από το πρώτο στάδιο παραμόρφωσης, το υλικό ψύχεται ελεγχόμενα σε μία θερμοκρασία T_1 όπου γίνεται παραμόρφωση των ωστενιτικών κόκκων και φύτρωση φερρίτη [21].

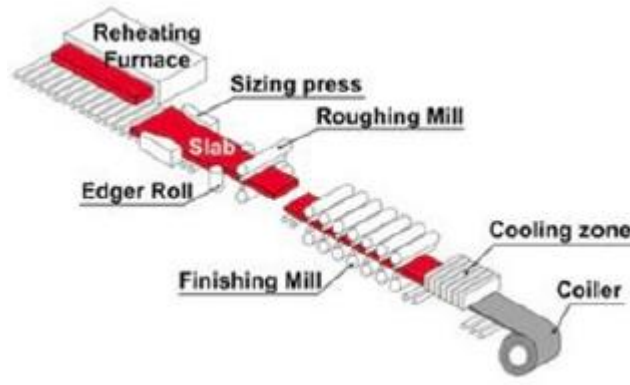
4. Ρυθμός απόψυξης (Cooling Rate)

Οι χάλυβες HSLA αποψύχονται με συγκεκριμένο ρυθμό από την θερμοκρασία τελικού σταδίου παραμόρφωσης μέχρι τη θερμοκρασία συσπείρωσης. Η απόψυξη πρέπει να είναι ελεγχόμενη και ταχεία. Ο ρυθμός απόψυξης προσδιορίζει τη τελική μικροδομή του υλικού και παίζει κομβικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες του ελάσματος [21].

5. Θερμοκρασία δημιουργίας ρολού (Coiling Temperature)

Το έλασμα μετά από την ελεγχόμενη απόψυξη, τυλίγεται σε ρόλους. Η επιλογή της τελικής θερμοκρασίας συσπείρωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στη τελική μικροδομή. Συγκεκριμένα, επηρεάζεται η μορφολογία, οι μετασχηματισμοί φάσεων, και οι τελικές μικροδομές ανάλογα με την επιλογή διαφορετικής θερμοκρασίας συσπείρωσης [21].

Όσον αφορά τα κραματικά στοιχεία προσθήκης, ο ρόλος τους είναι η μείωση της θερμοκρασίας, στην οποία πραγματοποιείται ο περλιτικός μετασχηματισμός με άμεση συνέπεια την παραγωγή λεπτόκοκκου περλίτη. Η παρουσία λεπτόκοκκου περλίτη είναι στην ουσία ο κύριος παράγοντας, που οδηγεί στην αύξηση αντοχής αυτών των χαλύβων [20].



Σχήμα 21. Βασικές διεργασίες παραγωγής χάλυβα HSLA [21]

Σε γενικές γραμμές, η σύνδεση της μηχανικής αντοχής με τους μηχανισμούς ισχυροποίησης περιγράφεται από την παρακάτω σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_\tau + \Delta\sigma_p + \Delta\sigma_D + k \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad [2.6]$$

όπου :

- σ_0 , η φυσική αντίσταση Peierls-Nabarro του κρυσταλλικού πλέγματος φερρίτη που αντιμετωπίζουν οι αταξίες κατά τη κίνηση στα επίπεδα ολίσθησής τους,
- $\Delta\sigma_s$, η συνεισφορά στην ισχυροποίηση λόγω της δημιουργία στερεών διαλυμάτων (αντικατάστασης/παρεμβολής),
- $\Delta\sigma_\tau$, η συνεισφορά λόγω ανισοτροπίας της μικροδομής,
- $\Delta\sigma_p$, η συνεισφορά λόγω κατακρήμνισης κραματικών στοιχείων,
- $\Delta\sigma_D$, η συνεισφορά λόγω παρεμπόδισης κίνησης των αταξιών σε περιοχές με αυξημένη πυκνότητα, ως αποτέλεσμα διεργασιών εργοσκλήρυνσης, και
- $k \cdot d^{-\frac{1}{2}}$, k παράμετρος εξαρτώμενη από το υλικό και d η μέση διάμετρος των κόκκων. Η συνεισφορά του μεγέθους των κόκκων στη μηχανική αντοχή σύμφωνα με τη σχέση Hall-Petch [21]

2.3.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΧΑΛΥΒΩΝ HSLA

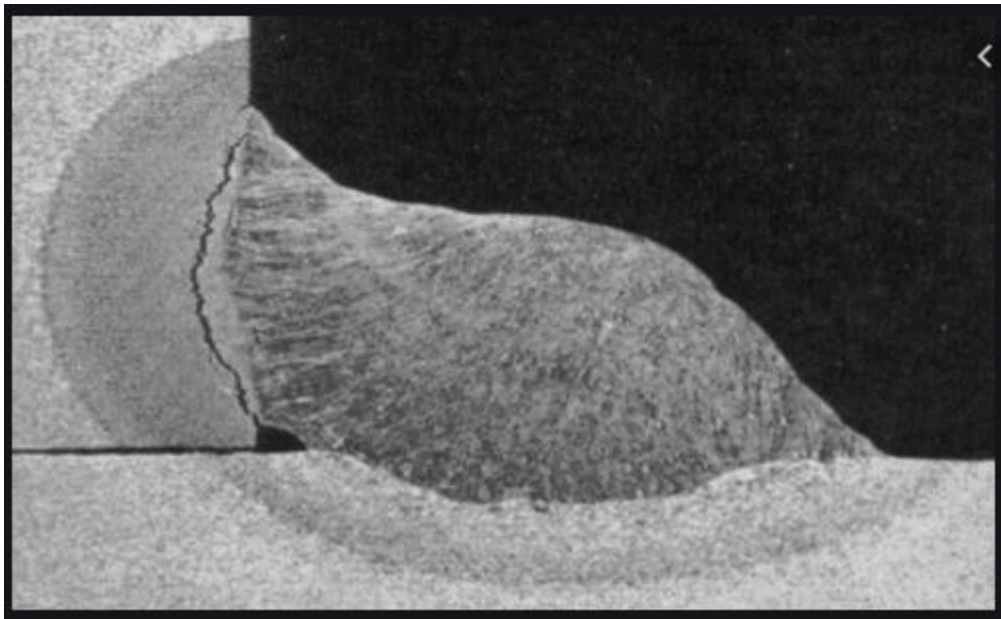
Οι μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής μπορούν να συγκολληθούν απευθείας με χρήση όλων των μεθόδων συγκόλλησης με τόξο, που χρησιμοποιείται για συγκόλληση των κοινών ανθρακούχων χάλυβων. Μία σημαντική διαφορά των HSLA με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες είναι, ότι οι πρώτοι δεν υφίστανται σκλήρυνση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, σε αντίθεση με τους δεύτερους. Κατά τη συγκόλληση HSLA με υψηλή συγκέντρωση σε C και Mn, και γενικότερα σε κατασκευές μεγάλου πάχους, απαιτείται προθέρμανση των προς συγκόλληση τεμαχίων ή χρήση μέτρων για περιορισμό του υδρογόνου. Συνηθισμένοι τύποι ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση χάλυβων υψηλής αντοχής, είναι τα τύπου E60, όπου 60 είναι η ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό σε ksi. Σε περίπτωση που χρειάζονται ιδιαίτερα υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων συγκολλήσεις, ίσως γίνει χρήση ηλεκτροδίων E70 ή ακόμα και άλλων με υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες [20,21].

Οι χάλυβες HSLA αντιμετωπίζουν πρόβλημα ψυχρής ρηγμάτωσης (cold cracking) εφόσον δεν ακολουθηθούν διαδικασίες συγκόλλησης χαμηλού υδρογόνου, με συνέπεια την εμφάνιση ρηγματώσεων στην ΘΕΖ λίγες ημέρες μετά το πέρας της συγκόλλησης. Σε περίπτωση συγκόλλησης GMAW επιτρέπεται η χρήση κοινών ηλεκτροδίων-συρμάτων και αδρανών αερίων που χρησιμοποιούνται και σε συγκολλήσεις κοινών ανθρακούχων χάλυβων. Η τελική μικροδομή του χάλυβα καθορίζει άμεσα την ολκιμότητα και τη σκληρότητα της συγκόλλησης. Για τον παραπάνω λόγο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες συγκόλλησης, όπως η ροή θερμότητας, ο ρυθμός απόψυξης, ενώ παράλληλα αρκετά σημαντική κρίνεται η προθέρμανση, ώστε να μη λαμβάνουν χώρα ανεπιθύμητοι μετασχηματισμοί. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε περίπτωση υψηλής θερμικής ροής, όπως κατά τη συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου ή κατά τη παρουσία αδρανούς αερίου και βραδείας απόψυξης, ενοείται η ανάπτυξη φερρίτη και περλίτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, για συγκόλληση HSLA με πάχος μικρότερο της μίας ίντσας και με απαίτηση σε μεγάλη αντοχή να αποφεύγεται η χρήση μεθόδου βυθιζόμενου τόξου και συγκόλληση με παρουσία αδρανούς αερίου [20,21].

2.4 ΚΟΠΩΣΗ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η κόπωση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή αστοχίας στις συγκολλήσεις. Σε οποιαδήποτε κατασκευή, η ύπαρξη μίας συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση της αντοχής με αποτέλεσμα τα φορτία σχεδιασμού σε συγκολλητές κατασκευές που υφίστανται επαναλαμβανόμενη φόρτιση να περιορίζονται από την αντοχή των συγκολλήσεων σε κόπωση [1].

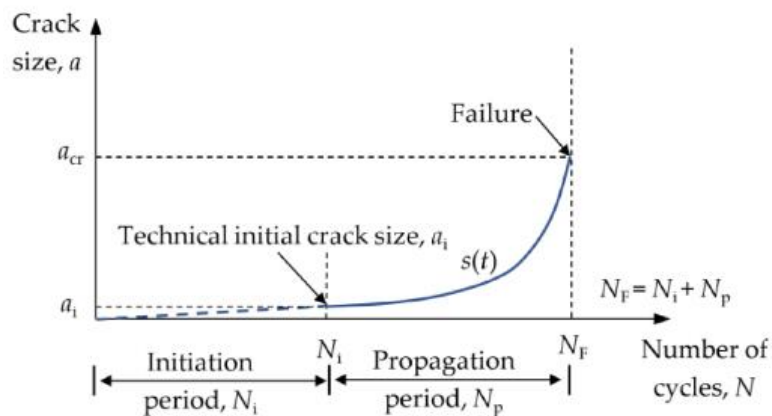
Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο σχετίζεται με τον τύπο της φόρτισης, η οποία είναι κυκλική και το υλικό δέχεται τάσεις που μεταβάλλονται από μία μέγιστη σε μία ελάχιστη τιμή. Το δεύτερο αφορά την «βλάβη» που προκαλείται στο υλικό. Η κόπωση προκαλεί τοπική και προοδευτική συσσώρευση βλάβης, η οποία συνδέεται άμεσα με ταυτόχρονη αύξηση του μήκους μίας ρωγμής. Όταν πλέον η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, τότε επέρχεται η θραύση (Σχήμα 22). Συνεπώς, ενώ στην στατική φόρτιση η θραύση προκαλούνταν με αύξηση της τάσης, στη κόπωση η θραύση προκαλείται με αύξηση του μήκους ρωγμής. Στην κόπωση λοιπόν απαιτείται ένα χρονικό πλαίσιο μέχρι την θραύση, δηλαδή μέχρι την επίτευξη του απαιτούμενου κρίσιμου μήκους ρωγμής. Αυτό το χρονικό εύρος ονομάζεται διάρκεια ζωής [1].



Σχήμα 22. Ρωγμή λόγω κόπωσης σε αυχενική συγκόλληση [23].

2.4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΠΩΣΗΣ

Η διάρκεια ζωής μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας αποτελείται από δύο περιόδους. Στη πρώτη περίοδο, γίνεται η έναρξη της ρωγμής, ενώ στη δεύτερη η διάδοσή της (Σχήμα 23). Η χρήση των καμπυλών S-N δεν διαχωρίζει άμεσα αυτές τις περιόδους και δείχνει πληροφορίες για το σύνολο της ζωής μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Η αλλαγή μεταξύ των δύο αυτών περιόδων, γίνεται σε συγκεκριμένο κρίσιμο μήκος ρωγμής a_i . Η μέθοδος HFMI επηρεάζει και τις δύο περιόδους, έχοντας άμεση επίδραση στην πρώτη [17].



Σχήμα 23. Διάγραμμα μήκους ρωγμής-αριθμός κυκλικών επαναλήψεων [16].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για υπολογισμό της περιόδου έναρξης ρωγμής. Μερικές από αυτές είναι :

- notch strain approach
- notch stress intensity factor (NS)
- fatigue notch factor

Η περίοδος διάδοσης ρωγμάτωσης μοντελοποιείται κάνοντας χρήση γραμμικής ελαστικότητας και με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των απαιτούμενων επαναλήψεων στις οποίες η ρωγμή φτάνει σε ένα κρίσιμο μήκος, στο οποίο προκαλείται αστοχία. Παρακάτω στη περίοδο έναρξης ρωγμάτωσης, γίνεται ανάλυση με χρήση της μεθόδου NS [17].

Η μέθοδος NS έχει προταθεί από τον Seeger [18]. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας, έγκειται στον καθορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στον πόδα της συγκόλλησης λαμβάνοντας υπόψη την ελαστοπλαστικότητα του υλικού και κάνοντας χρήση των καμπυλών παραμόρφωσης – διάρκειας ζωής ενός δοκιμίου βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στον πόδα της συγκόλλησης μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσα από το συντελεστή έντασης τάσης εγκοπής K_t . Βασιζόμενοι στο μοντέλο του Neuber οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην ελαστοπλαστική περιοχή δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_k \cdot \varepsilon_k = \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot K_t^2 = \frac{\sigma_n \cdot K_t^2}{E} \quad [2.7]$$

$$K_{t\sigma} \cdot K_{t\varepsilon} = K_t^2 \quad [2.8]$$

Όπου K_t είναι ο συντελεστής έντασης τάσης στην ελαστική περιοχή, $K_{t\sigma}$ είναι ο συντελεστής έντασης τάσης στην ελαστοπλαστική περιοχή, σ_k είναι η μέγιστη τάση στην εγκοπή της συγκόλλησης, ε_k είναι η μέγιστη παραμόρφωση στην εγκοπή, σ_n είναι η ονομαστική τάση και ε_n είναι η ονομαστική παραμόρφωση ($\varepsilon_n = \sigma_n/E$). Ο υπολογισμός των τάσεων και παραμορφώσεων στην εγκοπή βασίζεται στην καμπύλη κυκλικής τάσης-παραμόρφωσης. Οι τοπικές τάσεις και παραμορφώσεις ακολουθούν τη καμπύλη αυτή και προσεγγίζονται αριθμητικά από την εξίσωση Ramberg-Osgood [16,17] :

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_{\alpha,el} + \varepsilon_{\alpha,pl} = \frac{\sigma_\alpha}{E} + \left(\frac{\sigma_\alpha}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad [2.9]$$

- ε_α : συνολική τιμή της παραμόρφωσης
- $\varepsilon_{\alpha,el}$: τιμή της παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή
- $\varepsilon_{\alpha,pl}$: τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης
- σ_α : τιμή της τάσης
- E : μέτρο ελαστικότητας
- K' : συντελεστής σκληρότητας κυκλικής καταπόνησης
- n' : εκθέτης K'

Η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης διαμορφώνει ένα βρόγχο υστέρησης εξαιτίας του κυκλικού φορτίου. Τα μεμονωμένα τμήματα της καμπύλης προσεγγίζονται διπλασιάζοντας τις τιμές της αρχικής καμπύλης τάσης παραμόρφωσης. Για τους κλάδους του βρόγχου υστέρησης όπου φεύγουν εκτός των τελικών σημείων του βρόγχου, περιγράφονται από της διπλή καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2 \cdot E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \cdot K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad [2.10]$$

Η εκκίνηση της ρωγμής και η αστοχία περιγράφεται από την S-N καμπύλη παραμόρφωσης, η οποία συμπεριλαμβάνει την ελαστική και τη πλαστική περιοχή. Παρακάτω, φαίνεται η εξίσωση της καμπύλης αυτής (Manson and Coffin) μαζί με τη διόρθωση της επίδρασης της μέσης τάσης σύμφωνα με τον Morrow :

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_{\alpha,el} + \varepsilon_{\alpha,pl} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} \cdot (2 \cdot N)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N)^c \quad [2.11]$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος σ'_f είναι συντελεστής αντοχής σε κόπωση, ε'_f είναι συντελεστής ολκιμότητας, b είναι η αντοχή σε κόπωση, c είναι ο εκθέτης του συντελεστή ολκιμότητας, σ_m είναι η τάση και $2N$ είναι το σύνολο των κυκλικών επαναλήψεων μέχρι τη θραύση. Η περίοδος

έναρξης ρωγμάτωσης τελειώνει όταν το μήκος της ρωγμής είναι μεταξύ $a_i = 0.5 \text{ mm} - 0.8 \text{ mm}$ [16,17]. Ο χρόνος ζωής μέχρι τη θραύση υπολογίζεται από τον κανόνα του Miner, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά κάθε μεμονωμένης κυκλικής διαφορετικής φόρτισης, που λαμβάνει η κατασκευή στη συνολική ζημιά. Η θραύση σημειώνεται, όταν το άθροισμα ισούται με 1 :

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad [2.12]$$

Για την περίοδο διάδοσης της ρωγμής γίνεται χρήση των βασικών αρχών της θραυστομηχανικής. Η πρώτη εφαρμογή της γραμμικής ελαστικής θεωρίας θραύσης για τη διάδοση ρωγμών έγινε από τους Paris, Gomez και Anderson το 1961 [19]. Σημαντικότερη παράμετρος για τον καθορισμό του ρυθμού διάδοσης ρωγμής είναι το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων :

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad [2.13]$$

Οι τιμές K_{max} και K_{min} αντιστοιχούν στον μέγιστο και ελάχιστο συντελεστή έντασης των τάσεων αντίστοιχα. Για δεδομένη εναλλασσόμενη φόρτιση, το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του εύρους τάσης $\Delta \sigma$ και της γεωμετρίας του σώματος που φέρει τη ρωγμή [1,16,17,19]. Κατά συνέπεια προκύπτει :

$$\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [2.14]$$

Στην παραπάνω σχέση :

- Y είναι διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία της ρωγμής
- a είναι το μήκος της ρωγμής
- $\Delta \sigma$ είναι το εύρος τάσης

Όταν στην συγκόλληση ο συντελεστής έντασης τάσης γίνει ίσος ή μεγαλύτερος από τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσης, τότε επέρχεται θραύση. Ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης (K_{IC}) εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, το πάχος του βασικού μετάλλου και τον ρυθμό φόρτισης [19]. Ο Paris και Erdogan πρότειναν τη παρακάτω σχέση μεταξύ ρυθμού διάδοσης ρωγμής και εύρους συντελεστή έντασης τάσης :

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad [2.15]$$

Στη παραπάνω σχέση C και m είναι σταθερές του υλικού, εξαρτώνται από την εκάστοτε εντατική κατάσταση, τις συνθήκες περιβάλλοντος, τον βαθμό διάβρωσης και καθορίζονται πειραματικά. Υποθέτοντας ότι η παράμετρος Y είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από το μήκος της ρωγμής a , και θεωρώντας ότι η ρωγμή προχωράει από ένα αρχικό μήκος a_0 σε ένα τελικό a_f παίρνουμε [16,17,19]:

Για $m > 2$

$$N_f = \frac{2}{(m-2) \cdot C \cdot Y^m \cdot (\Delta \sigma)^m \cdot \pi^{\frac{m}{2}}} \cdot \left[\frac{1}{a_0^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_f^{\frac{m-2}{2}}} \right] \quad [2.16]$$

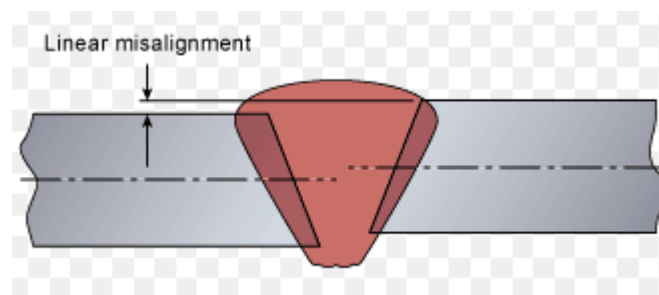
2.4.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Στις συγκολλήσεις, όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που οδηγούν σε θραύση λόγω κόπωσης. Οι σημαντικότεροι αφορούν συγκέντρωση τάσεων λόγω γεωμετρίας, παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις.

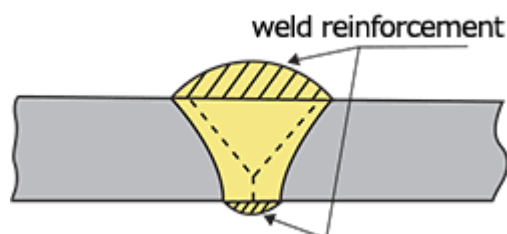
Η γεωμετρία της συγκόλλησης επιδρά σημαντικά στη γεωμετρία και επιφέρει συγκέντρωση τάσεων λόγω αλλαγής γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η ρωγμή μίας συγκόλλησης ξεκινά από τη ρίζα ή τον πόδα της συγκόλλησης. Υπάρχουν ποικίλοι γεωμετρικοί παράγοντες που επιδρούν άμεσα στην αντοχή μίας κατασκευής που φέρει συγκόλληση σε κόπωση [1] :

- Πάχος ελάσματος που συγκολλάται (T)
- Πάχος ενισχυτικού στοιχείου (t)
- Μήκος από πόδα σε πόδα (L)
- Ακτίνα καμπυλότητας (r)
- Γωνία στον πόδα (θ)

Με μείωση της ακτίνας καμπυλότητας και αύξηση όλων των άλλων παραμέτρων, η αντοχή σε κόπωση μίας συγκόλλησης μειώνεται σημαντικά. Εκτός από τα παραπάνω, άμεση επίδραση στη κόπωση έχει η διαφορά ευθυγράμμισης (s) (σχήμα 24) και η ενίσχυση (e) της συγκόλλησης (Σχήμα 25). Η αύξηση της ενίσχυσης και της διαφοράς ευθυγράμμισης επιφέρει μείωση της αντοχής εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων λόγω γεωμετρικών ανωμαλιών [1].

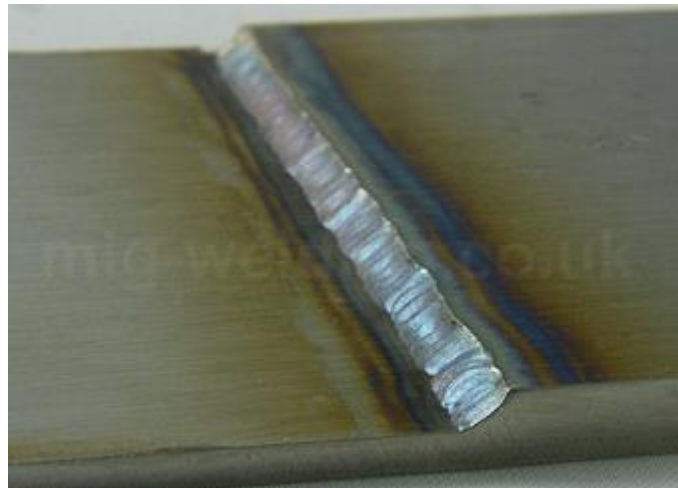


Σχήμα 24. Διαφορά ευθυγράμμισης. [1]



Σχήμα 25. Ενίσχυση της συγκόλλησης.[1]

Εξίσου σημαντική επίδραση στην αντοχή σε κόπωση μίας συγκόλλησης έχει ο τύπος σύνδεσης. Συγκεκριμένα, οι συγκολλήσεις επικάλυψης (Σχήμα 26) έχουν πολύ μικρότερη αντοχή σε σχέση με τις μετωπικές συγκολλήσεις, εξαιτίας της πολύπλοκης διαδρομής που συναντά η ροή του φορτίου. Με λίγα λόγια, εξαιτίας της ιδιαίτερης γεωμετρίας στη τελική κατασκευή η μεταβολή της ροής του φορτίου είναι έντονη και σε συνδυασμό με την πολύπλοκη γεωμετρία οδηγεί σε πιθανή έναρξη ρωγματώσεων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διακοπτόμενη συγκόλληση (Σχήμα 27) εξαιτίας των πολλαπλών πιθανών θέσεων εκκίνησης ρωγμών έχει δυσμενές αποτέλεσμα στην αντοχή σε κόπωση και καλό είναι να αποφεύγεται σε κατασκευές που πρόκειται να δεχθούν έντονα εναλλασσόμενα φορτία στη διάρκεια της ζωής τους [1].



Σχήμα 26. Συγκόλληση επικάλυψης. [24]



Σχήμα 27. Διακοπτόμενη συγκόλληση. [25]

Ιδιαίτερα κρίσιμη επίδραση έχουν οι ασυνέχειες, οι οποίες προκαλούν συγκέντρωση τάσεων. Κάποιες ασυνέχειες που φέρουν επίπεδη γεωμετρία, όπως οι ρωγμές (Σχήμα 28) έχουν σημαντική επίδραση και μειώνουν αισθητά την αντοχή σε κόπωση μίας συγκολλητής κατασκευής. Επιπλέον, η ατελής τήξη εξίσου έχει καίριο ρόλο στην συγκέντρωση τάσεων. Γενικά, οι ασυνέχειες έχουν σημαντική επίδραση όταν βρίσκονται στην επιφάνεια και ιδιαίτερα σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Οι πόροι (Σχήμα 29) και τα εγκλείσματα αξίζει να ληφθούν υπόψη μόνο όταν βρίσκονται στον πόδα ή τη ρίζα της συγκόλλησης [1].



Σχήμα 28. Ρωγμή σε συγκόλληση κυλινδρικού αγωγού. [26]



Σχήμα 29. Πόροι σε επιφάνεια συγκόλλησης. [27]

Είναι εμφανές πως ποικίλοι παράγοντες επιδρούν δραστικά στην αντοχή μίας συγκόλλησης σε κόπωση. Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων ίσως αποτελεί τον πιο σύνθετο. Συγκεκριμένα, η κατανομή μεταβάλλεται κατά τη κυκλική φόρτιση. Έχει παρατηρηθεί, ότι με την επιβολή εξωτερικής εφελκυστικής φόρτισης η κατανομή της παραμένουσας γίνεται πιο ομοιόμορφη. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική φόρτιση τόσο περισσότερο μειώνεται η επίδραση των παραμενουσών τάσεων. Συνεπώς, κατά η διάρκεια της κόπωσης, το πεδίο παραμενουσών τάσεων μεταβάλλεται και η επίδρασή του μειώνεται. Ακόμα, η παραμένουσα τάση μπορεί να έχει μικρή επίδραση στη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής με συγκόλληση, καθώς στο σημείο έναρξης της ρωγμάτωσης υπάρχει εφελκυστική τάση, ενώ διαδίδεται όμως η ρωγμή, η τάση πιθανώς να γίνεται θλιπτική (όσο απομακρυνόμαστε από τη ραφή της συγκόλλησης) επιβραδύνοντας έτσι τη διάδοση της ρωγμής. Τέλος, η επίδραση της παραμένουσας τάσης επισκιάζεται συνήθως από άλλους παράγοντες όπως είναι οι γεωμετρικοί και μόνο όταν υπάρχει απουσία ασυνεχειών μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο το πεδίο τάσεων[1].

Οι παρακάτω τρόποι βελτιώνουν την αντοχή μίας συγκολλητής κατασκευής σε κόπωση :

- Έλεγχος και μείωση επίδρασης γεωμετρικών παραγόντων
- Έλεγχος και μείωση επίδρασης ασυνεχειών
- Τροποποίηση κατανομής παραμενουσών τάσεων

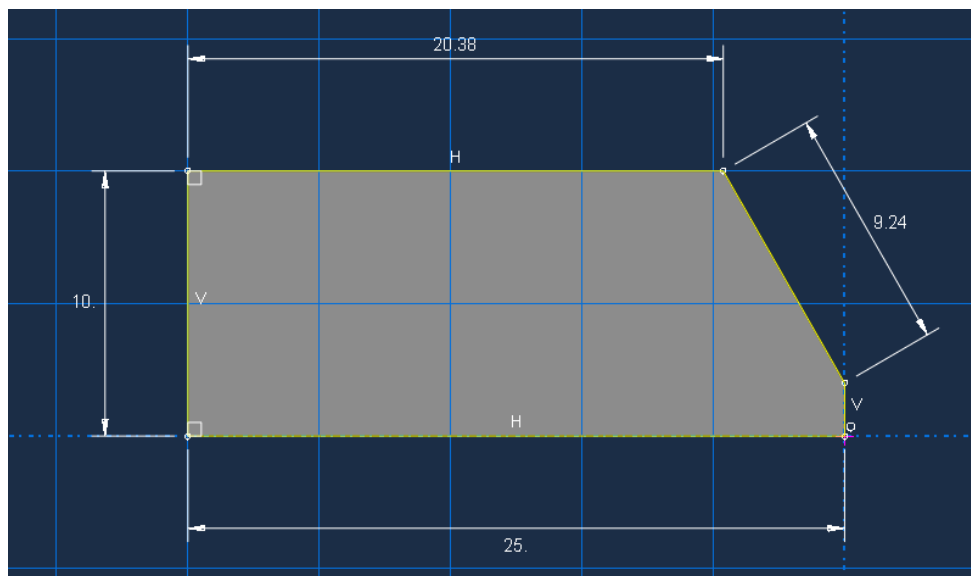
Όσον αφορά τη πρώτη κατηγορία, το τρόχισμα, η μηχανουργική αφαίρεση υλικού ή η επανάτηξη αποτελούν μεθόδους αύξησης της διάρκειας ζωής μίας κατασκευής. Επιπρόσθετα, με το κατάλληλο προγραμματισμό μεθόδων NDT μπορεί να γίνει ανίχνευση κρίσιμων ασυνεχειών αμέσως μετά της συγκόλλησης αλλά και σε τακτά χρονικά διαστήματα για αποφυγή θραύσης λόγω κόπωσης. Τέλος, με τη χρήση προέντασης, σφυρηλάτησης, σφαιροβολής και ΗΦΜΙ είναι δυνατό να τροποποιηθεί το πεδίο παραμενουσών τάσεων με την επιβολή θλιπτικού φορτίου και έτσι να επεκταθεί ο χρόνος ζωής της συγκόλλησης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι χρειάζονται να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές επιδράσεις των μεθόδων αυτών, καθώς η σφυρηλάτηση μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία εγχοπών, ενώ η ψυχρηλασία μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή θραύση μειώνοντας τη δυσθραυστότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός και να εξεταστούν όλοι οι πιθανοί τρόποι αύξησης της ζωής μίας συγκολλητής κατασκευής.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

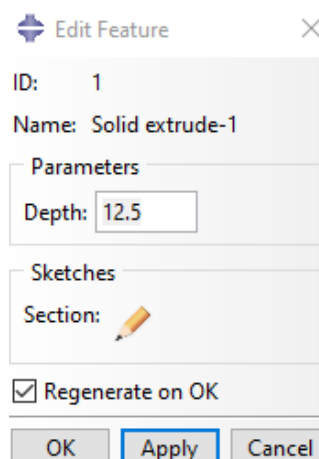
Η μοντελοποίηση της μεθόδου HFMI έγινε σε περιβάλλον Abaqus 2021. Για την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων έγινε χρήση του προγράμματος Visual Studio 2019, ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran κάνοντας χρήση της υπορουτίνας SIGINI. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση της προσομοίωσης του HFMI και θα περιγραφούν αναλυτικά όλα τα τμήματα αυτής της μελέτης.

3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όσον αφορά τη γεωμετρία του μοντέλου, κατασκευάστηκαν 3 επιμέρους τεμάχια για τη προσομοίωση του HFMI. Αρχικά, διαστασιολογήθηκαν τα τεμάχια σύμφωνα με μελλοντικά πειράματα τα οποία θα γίνουν για επιβεβαίωση της υπολογιστικής διαδικασίας. Η σχεδίαση βασίστηκε στην κατασκευή του βασικού μετάλλου σαν ένα «part» και του υλικού συγκόλλησης σαν ένα άλλο, το οποίο στη συνέχεια θα συνδεθεί με το πρώτο μέσω ειδικής εντολής στο περιβάλλον του Abaqus. Παρακάτω, φαίνεται η σχεδίαση του βασικού μετάλλου (Σχήμα 30). Στο σχήμα 30 φαίνεται αναλυτικά η σχεδίαση σε 2D επίπεδο, ενώ στο σχήμα 31 είναι ευδιάκριτη η εισαγωγή πάχους στο υλικό μέσω της εντολής extrude. Η μοντελοποίηση έγινε στο συγκεκριμένο τεμάχιο σαν 3D παραμορφώσιμο υλικό.

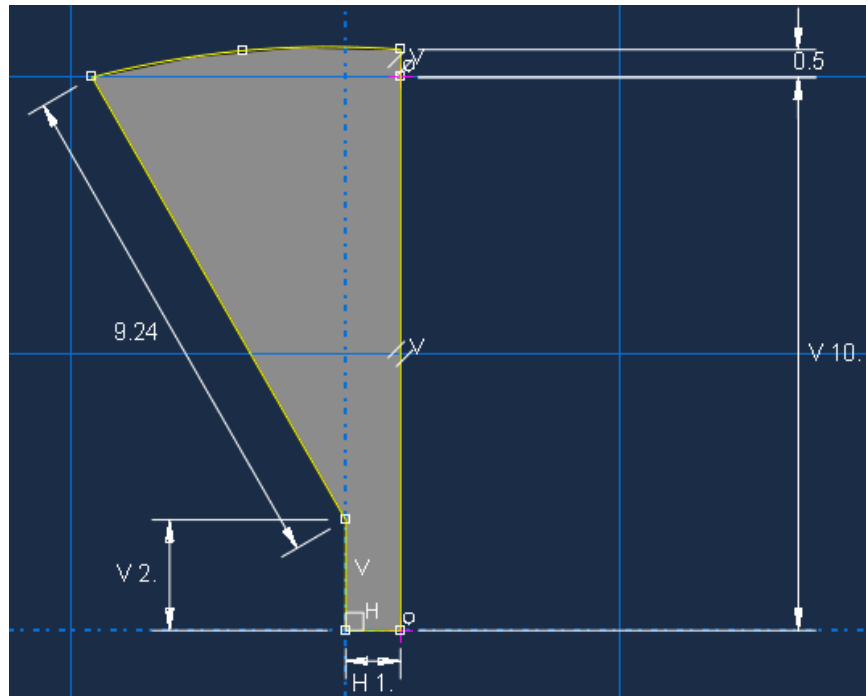


Σχήμα 30. Σχεδίαση βασικού μετάλλου συγκόλλησης σε 2D επίπεδο.

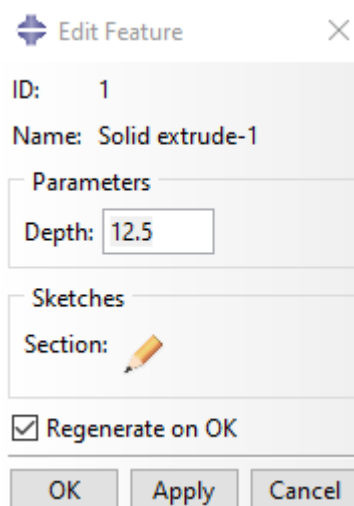


Σχήμα 31. Προσθήκη πάχους στο βασικό μέταλλο με την εντολή extrude.

Το δεύτερο τεμάχιο το οποίο μοντελοποιήθηκε και αυτό ως 3D παραμορφώσιμο σώμα είναι το υλικό της συγκόλλησης. Όπως ακριβώς και στο προηγούμενο τεμάχιο στο σχήμα 32 και σχήμα 33 περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού του.

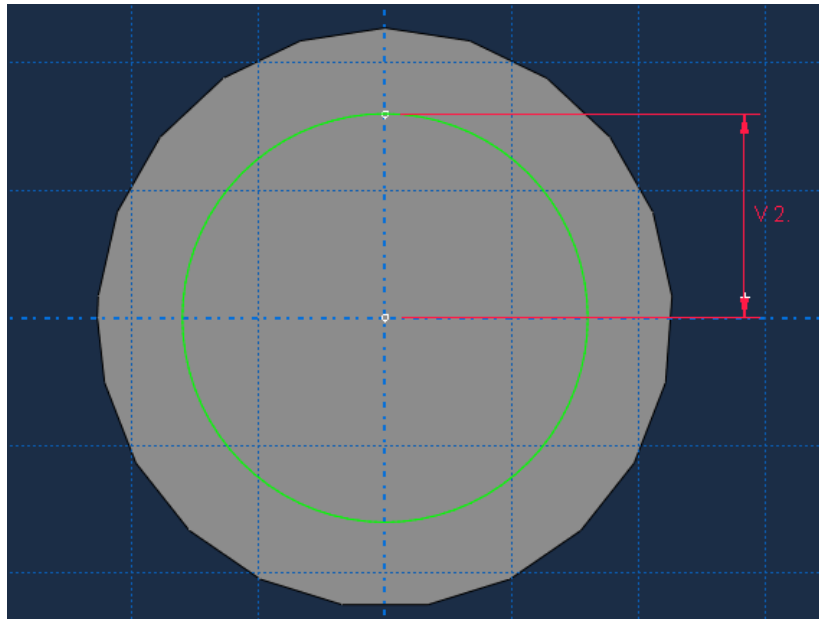


Σχήμα 32. Σχεδιασμός υλικού συγκόλλησης σε 2D επίπεδο.

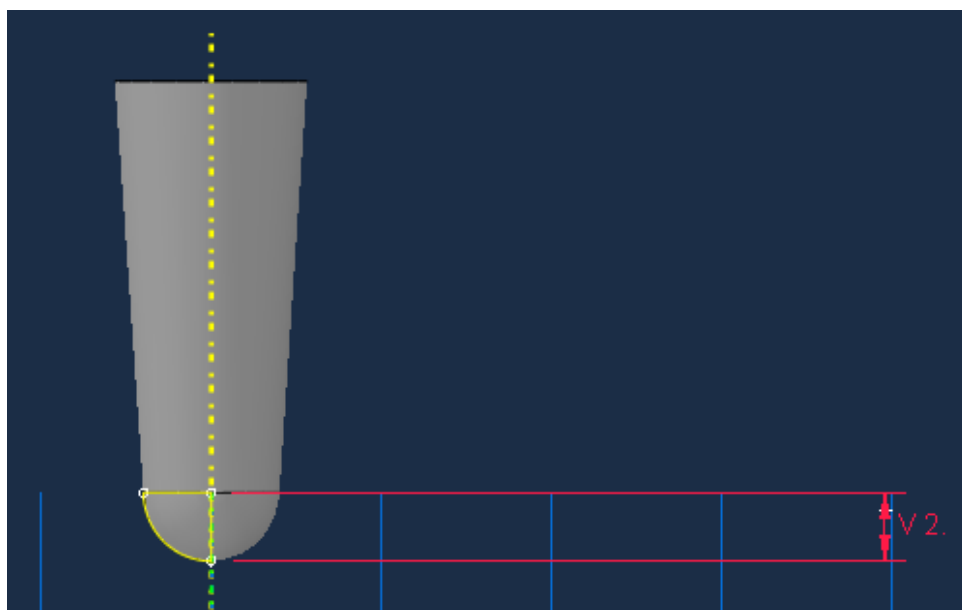


Σχήμα 33. Προσθήκη πάχους στο μέταλλο συγκόλλησης με την εντολή extrude.

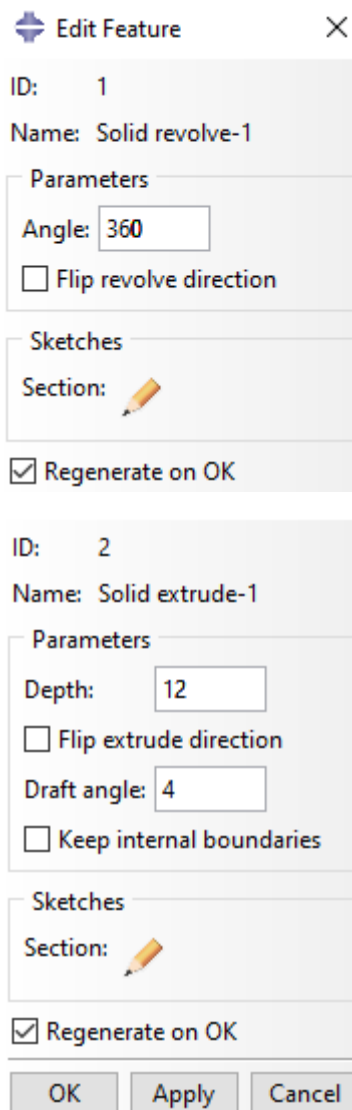
Τέλος το τρίτο και τελευταίο τεμάχιο που σχεδιάστηκε είναι το PIN δηλαδή η μύτη του πιστολιού του HFMI (Σχήμα 34,35). Το συγκεκριμένο τεμάχιο σχεδιάστηκε σαν «discrete rigid» πρακτικά δηλαδή δεν παραμορφώνεται. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ακτίνα του PIN που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση είναι 2 χιλιοστά. Για τον σχεδιασμό έγινε χρήση της εντολής resolve και extrude, ενώ παράλληλα γίνεται περιγραφή της διαδικασίας στις τέσσερις παρακάτω εικόνες. Η γωνία «draft angle» και το μήκος του PIN δεν παίζουν κάποιον άμεσο ρόλο στον υπολογισμό (Σχήμα 36).



Σχήμα 34. Κάτοψη PIN.



Σχήμα 35. Πλάγια όψη PIN.



Σχήμα 36. Χρήση εντολής revolve 360° και εντολής extrude με draft angle 4°.

3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Το Abaqus για την ελευθερία χρήσης μονάδων επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει μεταξύ πολλών διαφορετικών συστημάτων όπως φαίνεται παρακάτω στον πίνακα 2.

Πίνακας 2 Σύστημα μονάδων σε Abaqus.

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε χρήση του συστήματος SI (mm). Όσον αφορά το υλικό της μοντελοποίησης, επιλέχθηκε ο χάλυβας υψηλής αντοχής S700MC. Παρακάτω, γίνεται εκτεταμένη ανάλυση της θεωρίας πλαστικότητας για υλικά υπό κυκλική φόρτιση.

Κατά την άσκηση μικρών φορτίων, τα υλικά και κυρίως τα μέταλλα συμπεριφέρονται ελαστικά. Βασιζόμενοι στην ελαστική θεωρία, οι σχέσεις που συσχετίζουν την τάση και τη παραμόρφωση σε ένα υλικό στην ελαστική περιοχή βασίζονται στο νόμο του Hook [28-32] :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [3.1]$$

όπου σ είναι η τάση, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ε η παραμόρφωση. Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, στην πλαστική περιοχή λαμβάνουν χώρα μεγάλες παραμορφώσεις που οφείλονται σε μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Τα υλικά στην πλαστική περιοχή μπορούν να χωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες [28-32] :

- Σε τέλεια πλαστικά όπου οι περαιτέρω παραμορφώσεις στην πλαστική περιοχή δεν απαιτούν την αύξηση του φορτίου.
- Στα υλικά τα οποία για να δεχτούν πλαστικές παραμορφώσεις χρειάζονται άσκηση τάσης μεγαλύτερη από την τάση διαρροής, «Hardening».
- Στα υλικά όπου οι παραμορφώσεις στην πλαστική περιοχή προκαλούνται από φορτία μικρότερα του ορίου διαρροής, «softening».

Για τα γραμμικά μοντέλα υλικού ισχύει η σχέση «ροής ερπυσμού» :

$$\varepsilon'_p = \lambda' \cdot \frac{df}{d\sigma} \quad [3.2]$$

όπου ε_p είναι ο ρυθμός της πλαστικής ροής, $f(\sigma, \sigma_y) = |\sigma| - \sigma_y$ η συνάρτηση διαρροής και λ' είναι ο ρυθμός της πλαστικής παραμόρφωσης. Πολλές φορές γίνεται χρήση του συμβολισμού (ε_p), όπου ονομάζεται ισοδύναμος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης αντί για το λ' . Μέσω της μερικής παραγώγου, δηλώνεται το πρόσημο της τάσης. Από την παραπάνω σχέση, αποδεικνύεται ότι [28-32]:

$$\sigma'_y = H' \cdot |\varepsilon'_p| = H' \cdot \lambda' \quad [3.3]$$

Στη σχέση αυτή το H' είναι το πλαστικό μέτρο κατά Young. Αποτελεί χρήσιμο εργαλείο κατανόησης αύξησης ή μείωσης του ορίου διαρροής. Σε περίπτωση που έχει σταθερή τιμή ονομάζεται γραμμική εργοσκήρυνση. Για το λ' και την $f(\sigma, \sigma_y)$ υπάρχουν 2 σενάρια. Αν ισχύει $\lambda' > 0$ και $f=0$ σημειώνεται αύξηση πλαστικών παραμορφώσεων, ενώ αν $\lambda'=0$ και $f < 0$ εμφανίζεται κίνηση σε ελαστική περιοχή [28-32]. Επομένως :

$$\lambda' \cdot f = 0 \Leftrightarrow \lambda' \cdot f' = 0 \quad [3.4]$$

(παραγωγίζοντας ως προς τον χρόνο)

Κατά συνέπεια έχουμε $f'=0$ και η συγκεκριμένη σχέση ονομάζεται συνθήκη συνεκτικότητας και αποτελεί θεμελιώδη σχέση για την πλαστικότητα. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει :

$$f(\sigma, \sigma_y)' = \text{sign}(\sigma) \cdot \sigma' - \sigma_y = 0 \Rightarrow$$

$$\lambda' = \frac{\text{sign}(\sigma) \cdot E \cdot \varepsilon'}{(E+H')} \quad [3.5]$$

και

$$\varepsilon_p' = \frac{E}{(E+H')} \varepsilon' \quad [3.6]$$

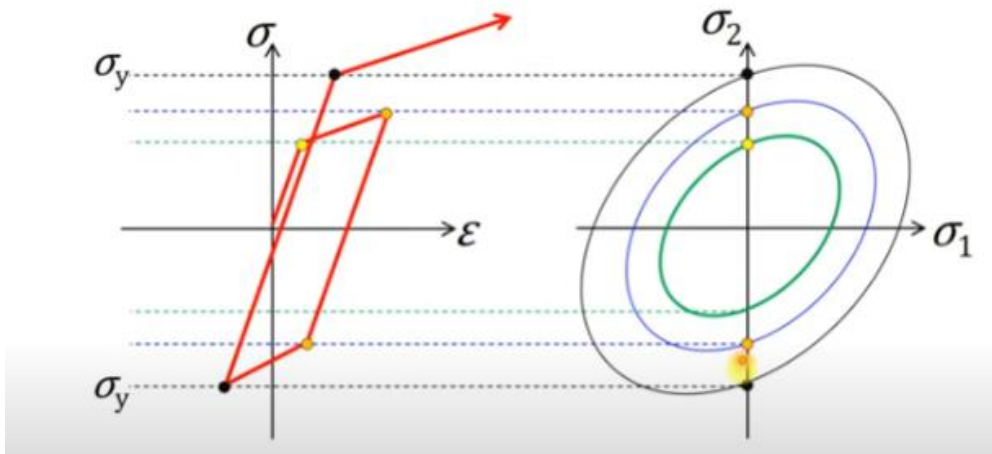
Ο ρυθμός μεταβολής της τάσης σ' ισούται με :

$$\sigma' = E \cdot \varepsilon_{el}' = E_T \cdot \varepsilon' \quad [3.7]$$

Στην παραπάνω εξίσωση E_T είναι η κλίση της ευθείας στην πλαστική περιοχή. Εν τέλει προκύπτει :

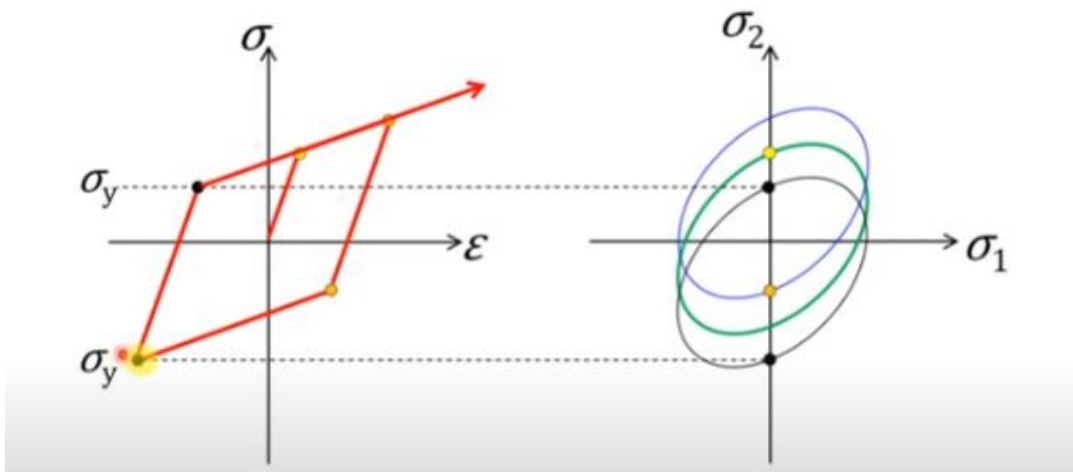
$$H' = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad [3.8]$$

Η εργοσκήρυνση χωρίζεται σε δύο τμήματα, στην ισοτροπική και στην κινηματική. Η ισοτροπική ορίζεται με βάση το πόσο αλλάζει το όριο διαρροής ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση εκφράζοντας το πόσο επεκτείνεται ή επιφάνεια διαρροής. Με απλά λόγια, το όριο διαρροής αυξάνεται ομοιόμορφα, όσο μεγαλώνει η πλαστική παραμόρφωση. Στη κινηματική εργοσκήρυνση, η επιφάνεια διαρροής μένει σταθερή, αλλά το κέντρο της μετατοπίζεται. Με απλά λόγια, το εύρος τάσης μεταξύ δύο πλαστικοποιήσεων παραμένει $2\sigma_y$ [28-32]. Η κινηματική εργοσκήρυνση καλείται και Bauschinger effect. Παρακάτω φαίνονται 2 διαγράμματα για κάθε μία κατηγορία εργοσκήρυνσης (Σχήμα 37,38) [28-32].



Σχήμα 37. Ισοτροπική εργοσκλήρυνση σε επίπεδο [29].

Διάγραμμα 1 τάσης παραμόρφωσης / Διάγραμμα 2 κύριες τάσεις



Σχήμα 38. Κινηματική εργοσκλήρυνση σε επίπεδο [29].

Διάγραμμα 1 τάσης παραμόρφωσης / Διάγραμμα 2 κύριες τάσεις

Για την κινηματική εργοσκληρύρωση ισχύει :

$$f(\sigma, \alpha, \sigma_y) = |\sigma - \alpha| - \sigma_y \leq 0 \quad [3.9]$$

Με τον όρο α ορίζονται οι τάσεις του προηγούμενου βήματος και ορίζεται ως η μέση τιμή των αλγεβρικών τιμών του ορίου θλίψης και εφελκυσμού του προηγούμενου βήματος για να μπορέσει να μεταβεί η διαδικασία στο επόμενο. Εκφράζοντας την συνθήκη συνεκτικότητας προκύπτει :

$$\alpha' = \gamma' \cdot \frac{df}{d\sigma} \quad [3.10]$$

Στην παραπάνω σχέση το γ' είναι παράμετρος του υλικού. Επίσης, μέσω των παραπάνω σχέσεων προκύπτει :

$$\lambda' = \frac{\text{sign}(\sigma - \alpha) \cdot E \cdot \varepsilon'}{(E + H')} \Rightarrow \varepsilon'_p = \frac{E}{(E + H')} \varepsilon' \quad [3.11]$$

Γίνεται λοιπόν εμφανές, ότι στην κινηματική εργοσκληρύρωση η σχέση του ρυθμού μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων και των συνολικών παραμορφώσεων είναι ίδια. Κατά συνέπεια, ανεξαρτήτως της μορφής εργοσκληρύρωσης δεν μεταβάλλεται ο ρυθμός μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων. Αυτό που μεταβάλλεται έντονα είναι το όριο διαρροής και κατά συνέπεια αν η ασκούμενη τάση ανήκει στην ελαστική ή πλαστική περιοχή. Για τα υλικά που συνδυάζουν και τις δύο μορφές γραμμικής εργοσκληρύρωσης γίνεται χρήση του γραμμικού συνδυασμού και προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις [28-32]:

$$\gamma' = \beta \cdot H \cdot \lambda' \text{ και } \alpha' = (1 - \beta) \cdot H' \cdot \lambda' \cdot \text{sign}(\sigma - \alpha) \quad [3.12]$$

με $0 \leq \beta \leq 1$ που χρησιμοποιείται ως συντελεστής για να ορίσει την ποσοστιαία συμμετοχή κάθε μιας μορφής εργοσκληρύρωσης στη συνολική [28-32].

Όσον αφορά την κυκλική φόρτιση, η κινηματική εργοσκληρύρωση μπορεί να είναι γραμμική με σταθερούς συντελεστές σκληρύρωσης ή να είναι μη γραμμική σε συνδυασμό με μη γραμμική ιστροπική εργοσκληρύρωση με μη γραμμικούς συντελεστές. Μια άλλη έκφραση για τις τάσεις του προηγούμενου βήματος α είναι [28-32]:

$$\alpha' = C \cdot \frac{1}{\sigma_o} \cdot (\sigma - \alpha) \cdot \lambda' \quad [3.13]$$

Στην παραπάνω σχέση :

- λ' είναι ο ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης
- C είναι ένας συντελεστής κινηματικής σκλήρυνσης
- σ_0 είναι η ισοδύναμη τάση, μέσω της οποίας καθορίζεται το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής.

Αν τα φαινόμενα πλαστικοποίησης που λαμβάνουν χώρα είναι ανεξάρτητα της θερμοκρασίας η παραπάνω σχέση ονομάζεται νόμος σκλήρυνσης του Ziegler. Σε πολλές περιπτώσεις, για βελτίωση των αποτελεσμάτων γίνεται χρήση υπέρθεσης των εναπομεινάντων τάσεων και άλλων προηγούμενων βημάτων, και κατ' επέκταση προκύπτει [28-32] :

$$\alpha'_k = C_k \cdot \frac{1}{\sigma_0} \cdot (\sigma - \alpha) \cdot \lambda' - \gamma_k \cdot \alpha_k \cdot \lambda' \quad [3.14]$$

και σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης θα ισχύει :

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \quad [3.15]$$

Στη παραπάνω σχέση N είναι ο συνολικός αριθμός των παραμενουσών τάσεων και C_k και γ_k είναι ιδιότητες των υλικών μέσα από δεδομένα πειραμάτων κυκλικής κόπωσης. Η τελευταία δυνατή τιμή του α αποτελεί το σημείο «κορεσμού» του υλικού, καθώς μέχρι τότε θα έχουν γίνει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Ειδικότερα, ο συντελεστής C_k ορίζεται ως ο αρχικός συντελεστής της κινηματικής σκλήρυνσης και ο όρος γ_k καθορίζει τον ρυθμό κατά τον οποίο μειώνεται η κινηματική εργοσκλήρυνση με την αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων. Όταν οι δύο παραπάνω συντελεστές γίνουν μηδέν, τότε ισχύει ο γραμμικός νόμος ιστροπικής σκλήρυνσης. Η ισοδύναμη τάση που μπορεί να ορίσει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής σ_0 μπορεί να περιγραφεί με την παρακάτω εξίσωση [28-32]:

$$\sigma_0 = \sigma|_0 + Q_\infty \cdot (1 - e^{-b \cdot \lambda'}) \quad [3.16]$$

Στην παραπάνω εξίσωση :

- $\sigma|_0$ είναι η τάση του ορίου διαρροής για μηδενική πλαστική παραμόρφωση
- Q_∞ είναι η μέγιστη αλλαγή στο μέγεθος της επιφάνειας διαρροής
- b είναι ο ρυθμός κατά τον οποίο αλλάζει η επιφάνεια διαρροής καθώς αναπτύσσεται η πλαστική παραμόρφωση

Σχετικά με την προσομοίωση στο περιβάλλον του Abaqus, γίνεται χρήση συνδυασμένης κινηματικής – ιστροπικής εργοσκήρυσης. Για την εισαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού, έγινε εκτεταμένη ανάλυση και μετατροπή της ονομαστικής τάσης σε πραγματική [33]. Παρακάτω, φαίνεται σε μορφή πινάκων η μετατροπή αυτή. Στον πίνακα 3, φαίνεται η ονομαστική τάση του χάλυβα S700MC σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έτσι, όπως μετρήθηκε από πειραματικές διατάξεις στο [33]. Στον πίνακα 4 γίνεται η μετατροπή σε πραγματική τάση. Για το εύρος ελαστικής περιοχής, μέχρι το σημείο σχηματισμού λαιμού ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις μετατροπής :

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad [3.17]$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot (1 + \varepsilon_{eng}) \quad [3.18]$$

Για την περιοχή μετά τη δημιουργία λαιμού έως τη θραύση ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad [3.19]$$

$$\sigma_{true} = a \cdot \varepsilon_{true} + b \quad [3.20]$$

$$a = \sigma_{necking}, b = \sigma_{necking} \cdot (1 - \varepsilon_{necking})$$

Στον πίνακα 5, γίνεται μετατροπή της παραμόρφωσης σε ισοδύναμη πλαστική, η οποία είναι απαραίτητη στο περιβάλλον του Abaqus για τον καθορισμό του υλικού :

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad [3.21]$$

Στην παραπάνω εξίσωση το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα υψηλής αντοχής λαμβάνεται ίσο με 216 GPa σύμφωνα με το [33].

Πίνακας 3. Ονομαστική τάση (MPa) – παραμόρφωση.

ENGINEERING		ELASTIC ZONE
Strain	Stress	
0	0	
5.24E-05	1.5300136	
0.000105	22.9242038	
0.000262	48.9064347	
0.000314	70.3006249	
0.000419	110.032978	
0.000576	148.239318	

Yield strength

0.000838	192.561712	NECK ZONE
0.001047	242.99416	
0.001309	294.956622	
0.001571	334.694975	
0.001832	391.241478	
0.002094	440.147912	
0.002408	504.336483	
0.002775	560.886986	
0.003246	622.025529	
0.003665	678.578032	
0.004398	732.086507	
0.005602	764	
0.007487	779.57293	
0.009215	782.694957	
0.010785	781.226944	
0.012304	779.756931	
0.014031	781.350945	
0.015759	782.94496	
0.017225	781.472946	
0.018796	781.532947	
0.020366	784.648975	
0.02199	787.767002	
0.023246	787.815003	
0.024869	792.461044	
0.026335	794.045058	
0.02822	795.645072	
0.029634	797.227086	
0.030995	797.279087	
0.032513	798.865101	
0.034346	803.519142	
0.036021	805.111157	
0.037382	805.163157	
0.038691	805.213157	
0.039948	808.317185	
0.044966	812.21896	
0.052349	818.422819	
0.060738	823.057886	
0.069128	829.255453	
0.07953	833.87794	
0.087248	835.392198	
0.094631	835.346057	
0.102349	835.297819	
0.110738	835.245386	

Neck point

0.119128	836.755453
0.124832	836.719799
0.132886	833.544463
0.142617	822.546141
0.150336	795.935403
0.156376	763.085151
0.160738	733.370386
0.163758	705.22651
0.167114	673.955537
0.170134	634.874161
0.172819	597.357383
0.175168	553.592701
0.177181	498.892617

Rapture point

SOFTENING ZONE

Πίνακας 4. Πραγματική τάση (MPa) – παραμόρφωση.

TRUE			
Strain	Stress		
0	0	ELASTIC ZONE	
5.24E-05	1.530094		
0.000105	22.9266		
0.000262	48.91924		
0.000314	70.32271		
0.000419	110.0791		
0.000576	148.3247		
0.000837	192.723		
0.001047	243.2486		
0.001308	295.3427		
0.001569	335.2207		
0.001831	391.9584		
0.002092	441.0697		
0.002405	505.5511		
0.002771	562.4434		
0.003241	624.0447		
0.003658	681.065		
0.004388	735.3062		
0.005586	768.28		NECK ZONE
0.007459	785.4095		
0.009172	789.9072		
0.010728	789.6527		
0.012229	789.3508		
0.013934	792.3144		
0.015636	795.2835		
0.017078	794.9339		
0.018621	796.2225		
0.020162	800.6295		
0.021751	805.0896		
0.02298	806.1286		
0.024565	812.1688		
0.025994	814.9563		
0.027829	818.0981		
0.029203	820.8517		
0.030524	821.9906		
0.031996	824.8387		
0.033769	831.1164		
0.035387	834.112		
0.0367	835.2619		
0.037961	836.3677		

Yield strength

Neck point

Rapture point

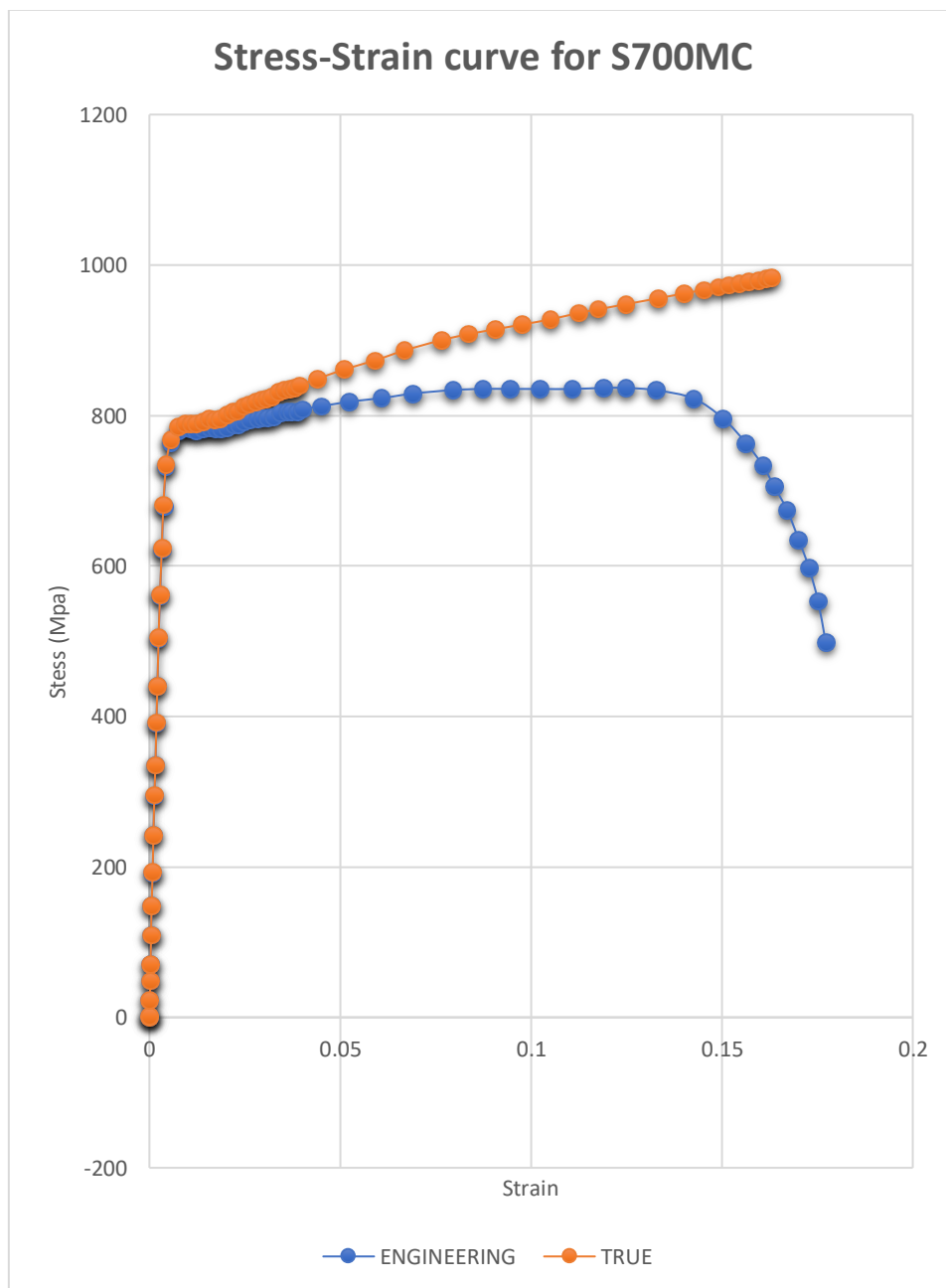
0.03917	840.6076	SOFTENING ZONE
0.043985	848.7416	
0.051025	861.2664	
0.058965	873.049	
0.066843	886.5798	
0.076526	900.1964	
0.08365	908.2788	
0.090417	914.3956	
0.097443	920.7897	
0.105025	927.739	
0.112549	936.4361	
0.117634	941.1974	
0.124768	947.8783	
0.133322	955.8879	
0.140054	962.1921	
0.145291	967.0963	
0.149056	970.6224	
0.151655	973.0557	
0.154534	975.7521	
0.157118	978.1722	
0.15941	980.3181	
0.161411	982.1918	
0.163123	983.7948	

Πίνακας 5. Πραγματική τάση (MPa) – ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

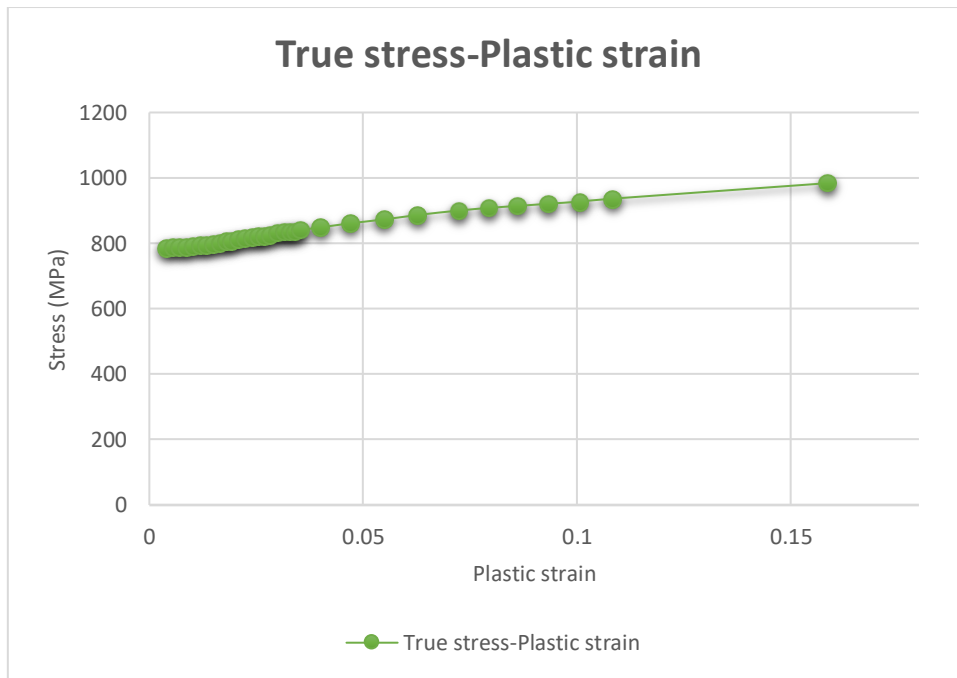
Yield strength

TRUE			
Plastic Strain	Stress		
		ELASTIC ZONE	
0	768.28		NECK ZONE
0.003822868	785.4095		
0.005515486	789.9072		
0.007071794	789.6527		
0.008574188	789.3508		
0.010265762	792.3144		
0.011954408	795.2835		
0.013398211	794.9339		
0.014935138	796.2225		
0.016455251	800.6295		
0.018023979	805.0896		
0.019247922	806.1286		
0.020804866	812.1688		
0.022221335	814.9563		
0.024041559	818.0981		
0.025402682	820.8517		
0.026718615	821.9906		
0.028177025	824.8387		
0.029921146	831.1164		
0.031525729	834.112		
0.03283347	835.2619		

Με βάση τους παραπάνω πίνακες, προκύπτουν οι καμπύλες ονομαστικής τάσης-ονομαστικής παραμόρφωσης, και πραγματικής τάσης-πραγματικής πλαστικής παραμόρφωσης :



Σχήμα 39. Καμπύλη ονομαστικής τάσης (MPa) -παραμόρφωσης, πραγματικής τάσης (MPa) - παραμόρφωσης.

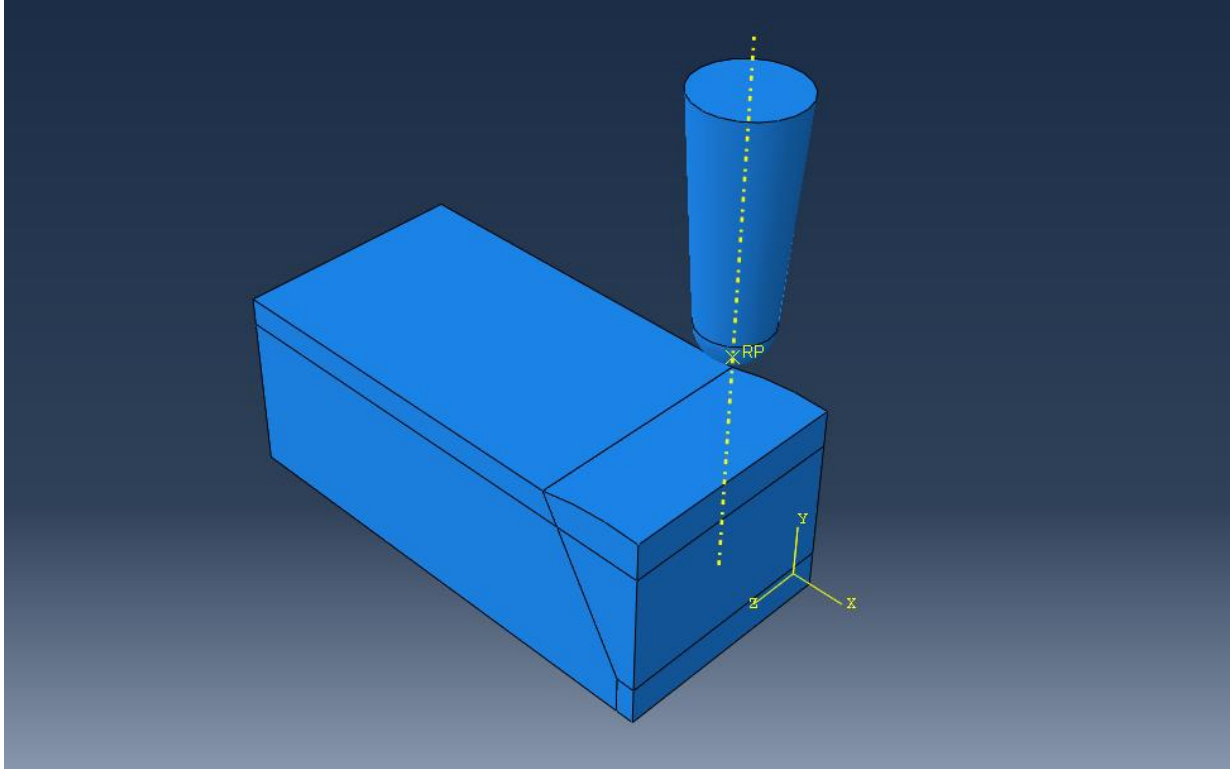


Σχήμα 40. Καμπύλη πραγματικής τάσης (MPa) - πλαστικής παραμόρφωσης.

Τα παραπάνω δύο διαγράμματα είναι αναγκαία, για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι δεν ελήφθη υπόψη η επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα HSLA, S700MC.

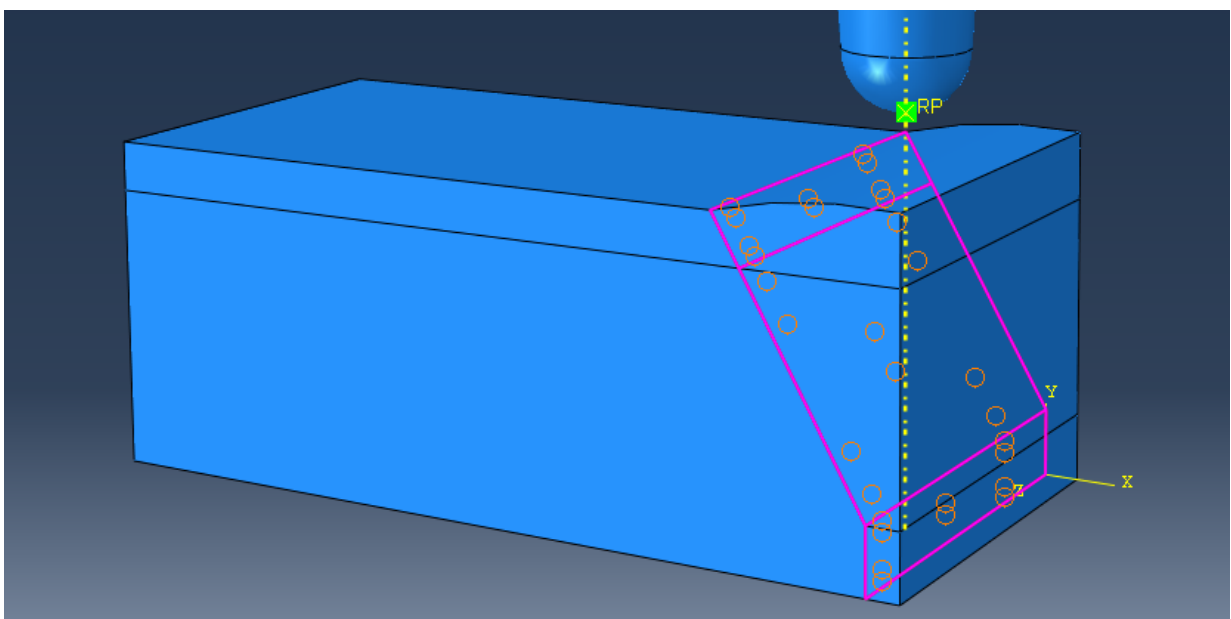
3.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΙΝ-ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Αναγκαία κρίθηκε η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών, έτσι ώστε να μπορέσει να καταστεί δυνατή η επίλυση του προβλήματος. Αρχικά τα 3 parts τοποθετήθηκαν σε κοινό περιβάλλον με στο module assembly (Σχήμα 41).



Σχήμα 41. Μοντέλο σε περιβάλλον Assembly.

Στη συνέχεια, με την εντολή «Tie» το βασικό μέταλλο και το μέταλλο συγκόλλησης γίνονται ένα τεμάχιο και πλέον αλληλοεπιδρούν όντας ένα κοινό σώμα (Σχήμα 42).

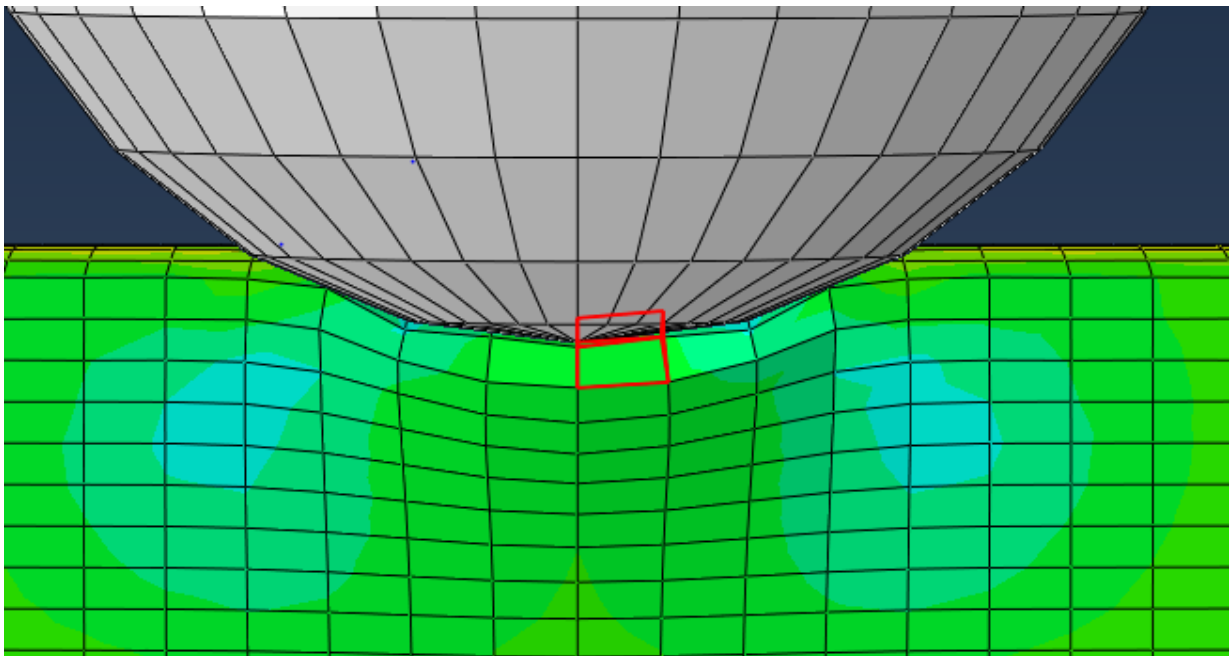


Σχήμα 42. Εντολή Tie μεταξύ υλικού συγκόλλησης και βασικού μετάλλου.

Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες, προστέθηκαν σε όλα τα steps που εφαρμόστηκαν μέσω της εισαγωγής τους από το initial step. Συγκεκριμένα, στο επίπεδο z-y στο κέντρο του υλικού της συγκόλλησης εφαρμόστηκε συνθήκη συμμετρίας XSYMM ($U1=UR2=UR3=0$). Επιπρόσθετα, στο επίπεδο z-x και συγκεκριμένα στην κάτω επιφάνεια της συγκολλητής κατασκευής, εφαρμόστηκε συνθήκη άρθρωσης $U1=U2=U3=0$. Αποφεύχθηκε η συνθήκη πάκτωσης, σύμφωνα με τα [34-41] εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου. Τέλος σταθεροποιήθηκε το μοντέλο ως προς τον άξονα z, κάνοντας χρήση της συνθήκης $U3=0$ στα δύο ακριανές επιφάνειες του επιπέδου y-z εξαιτίας της παρουσίας υλικού μετά από εκεί.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι έγινε χρήση interaction «surface to surface» μεταξύ της επιφάνειας του PIN και της επιφάνειας κρούσης του τεμαχίου. Θεωρήθηκε συνθήκη «hard contact» και «frictionless».

Στο σύνολο της προσομοίωσης δημιουργήθηκαν 103 steps. Σε αυτά, σημειωνόταν εναλλάξ κρούση του PIN στην επιφάνεια της συγκολλητής κατασκευής και απλή προχώρηση του PIN κατά 0.25 mm επιτυγχάνοντας συνολικά 51 χτυπήματα σε 12.5 mm σε πλήρη displacement-controlled simulation. Επιτεύχθηκε λοιπόν ρυθμός χτυπήματος 0.25mm/hit. Η μοντελοποίηση έγινε εξολοκλήρου σε static-general step. Για τα steps στα οποία σημειώθηκε η κρούση (Σχήμα 43), έγινε χρήση ημιτονικής συνάρτησης, έτσι ώστε να μπορέσει να προσομοιωθεί η καθοδική κίνηση του PIN εισχωρώντας κατά 1.25 mm με βάση τα [34-41]. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εντολή NIgeom παρέμεινε ανοικτή σε όλα τα steps για να ληφθούν υπόψη τα μη-γραμμικά φαινόμενα. Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος εξαιτίας των 103 step, του συνδυασμένου μοντέλου κράτυνσης και της ενεργοποίησης της παραπάνω εντολής ήταν αρκετά μεγάλος.

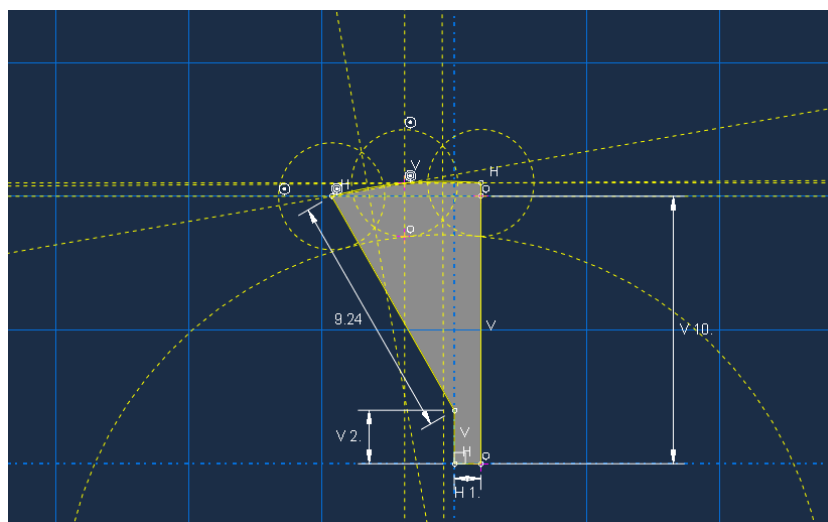


Σχήμα 43. Στιγμή κρούσης PIN στον πόδα της συγκόλλησης.

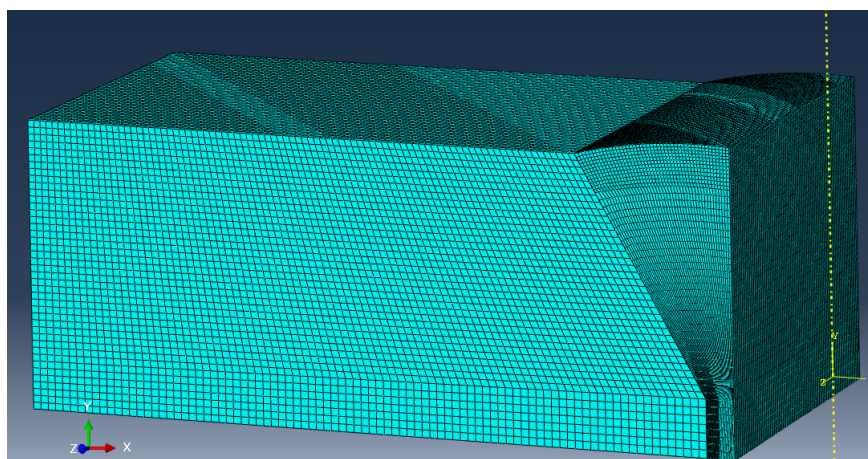
3.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η διαδικασία διακριτοποίησης (meshing) του μοντέλου έχει καίριο ρόλο στην επίλυση του προβλήματος. Η καλή διαστασιολόγηση και ομοιομορφία του πλέγματος μπορούν να επιφέρουν μείωση υπολογιστικού κόστους και να δώσουν ορθά αποτελέσματα. Οποιαδήποτε ανωμαλία, ίσως επιφέρει πολύ μεγάλο χρόνο υπολογισμού, ενώ παράλληλα δεν θα είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα. Η διαδικασία της διακριτοποίησης ήταν αρκετά δύσκολη, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Συγκεκριμένα, για την συγκολλητή κατασκευή δεν ήταν εφικτή η διακριτοποίηση όλου του μοντέλου μαζί, καθώς δημιουργούνταν ασυνέχειες και ανωμαλίες στο πλέγμα. Χωρίς κανένα partition του μοντέλου ήταν δύσκολο προσαρμοστεί το πλέγμα, έτσι ώστε να είναι πυκνό κοντά στην επιφάνεια κρούσης και πιο αραιό απομακρυνόμενοι από αυτή.

Στην πρώτη προσπάθεια δημιουργίας του πλέγματος, κατασκευάστηκε ένας ομόκεντρος κύκλος με τον κύκλο του οποίου τόξο αποτελεί η γεωμετρία της ραφής. Με αυτόν τον τρόπο έγινε εισαγωγή ενός partition γεωμετρίας κυκλικού τόξου γεγονός που θα έφερνε ομοιομορφία στο πλέγμα σε απόσταση 2 χιλιοστών από την επιφάνεια. Δυστυχώς, ο παραπάνω τρόπος επέφερε μικρές στρεβλώσεις στο πλέγμα και με την εντολή «verify mesh» κρίθηκε ακατάλληλος. Παρακάτω, φαίνεται η πολυπλοκότητα στο sketch του πρώτου τρόπου διακριτοποίησης και μία απεικόνιση του πλέγματος, στο οποίο φαίνεται η μικρή στρέβλωση, που τον ενέκρινε ακατάλληλο (Σχήμα 44,45).

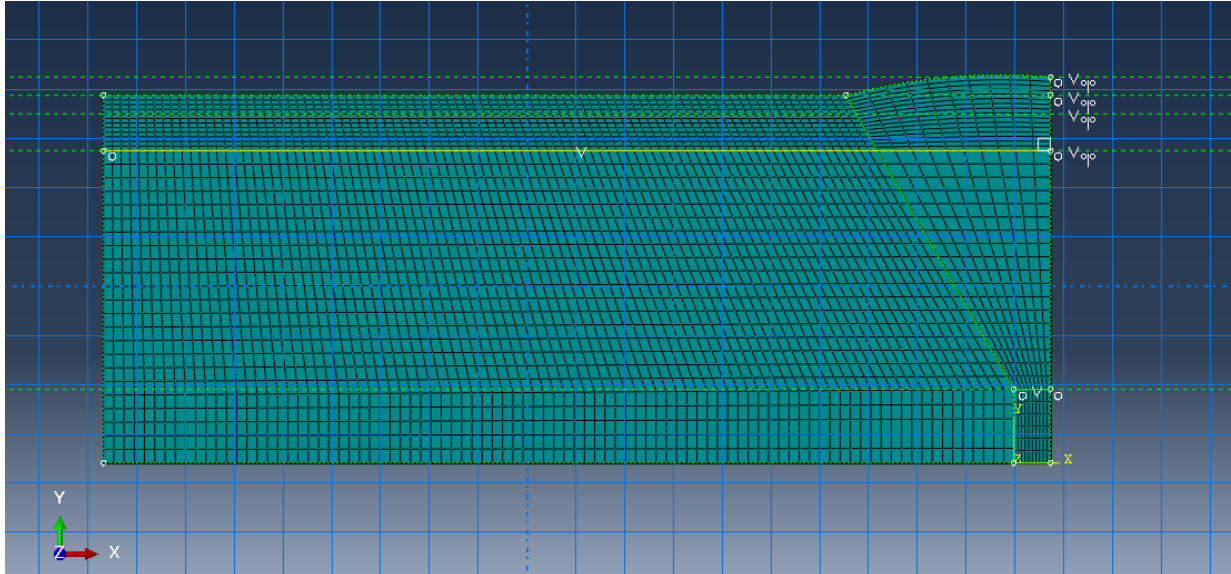


Σχήμα 44. Πολύπλοκη γεωμετρία υλικού συγκόλλησης για κατασκευή partition.



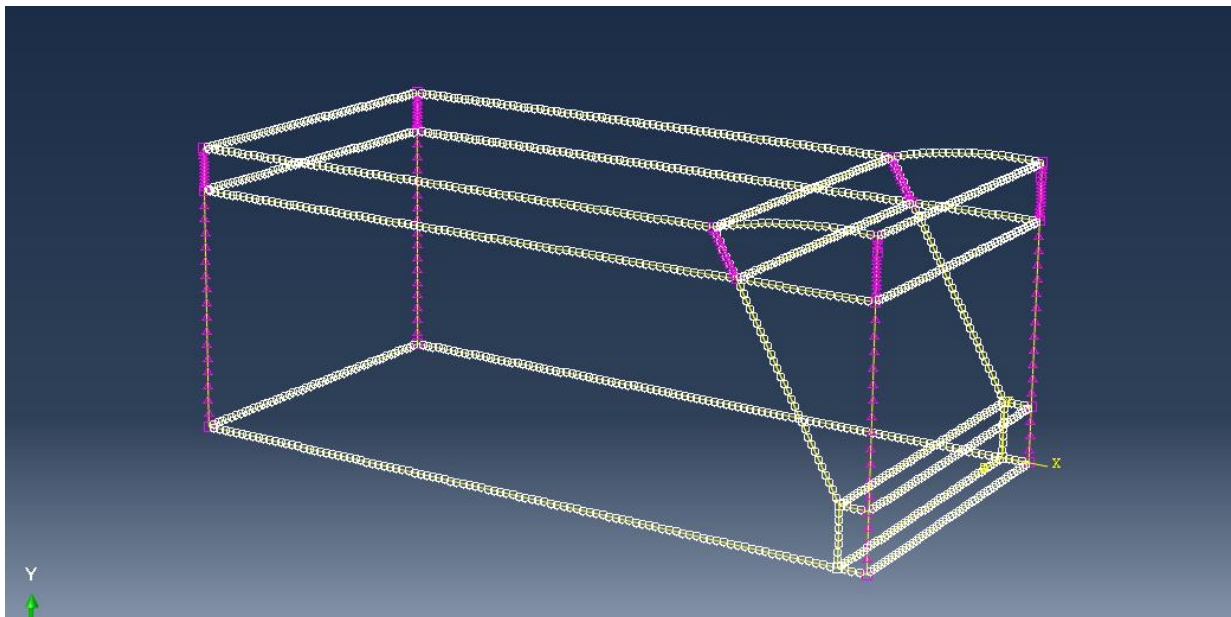
Σχήμα 45. Τρόπος 1 διακριτοποίησης με εμφανή στρέβλωση του πλέγματος.

Στη συνέχεια, έγιναν ποικίλες δοκιμές για την εύρεση του κατάλληλου τρόπου διακριτοποίησης. Εν τέλει, έγινε χρήση δύο partitions σε όλη τη συγκολλητή κατασκευή. Τα δύο αυτά partitions είναι ευθύγραμμα τμήματα, με το πρώτο να είναι 2 mm κάτω από το κέντρο του τόξου της ραφής της συγκόλλησης, ενώ το δεύτερο βρίσκεται 2 mm πάνω από τη βάση του υλικού συγκόλλησης. Στο σχήμα 46 φαίνεται πως έγινε το partitioning στο μοντέλο.



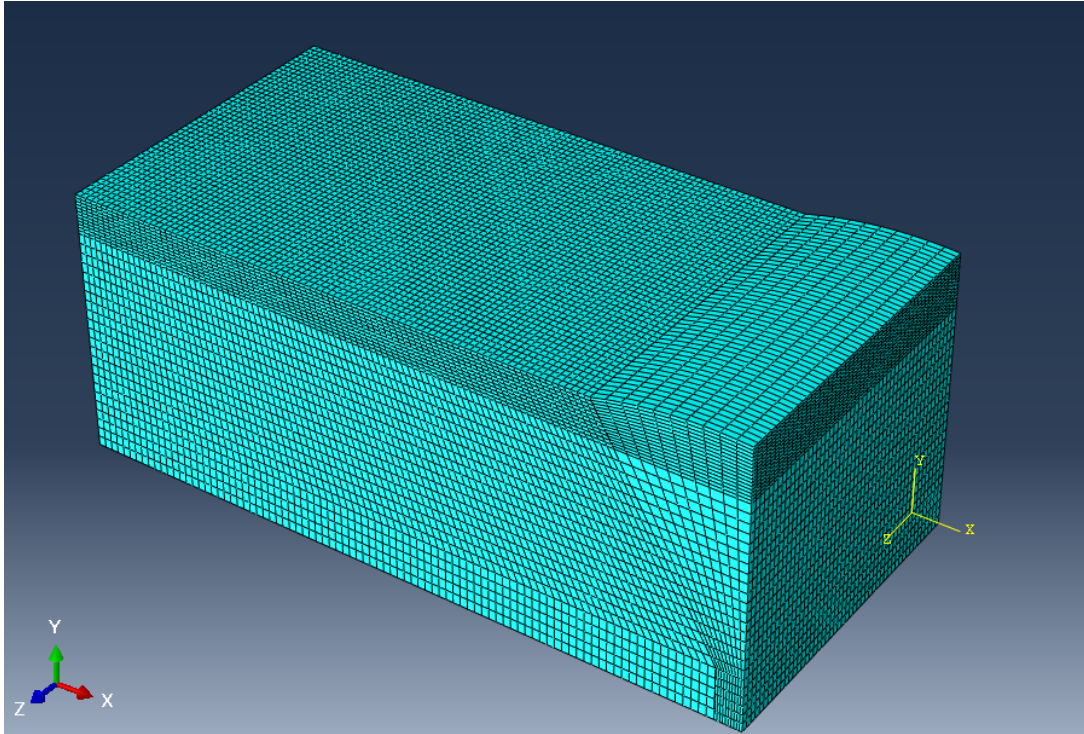
Σχήμα 46. Partitions.

Για την διακριτοποίηση έγινε χρήση C3D8R στοιχείων με reduced integration για μείωση υπολογιστικού κόστους. Αυτά τα στοιχεία φέρουν 8 κόμβους και είναι ορθογώνια. Χρησιμοποιήθηκαν λόγω της μικρής πολυπλοκότητάς τους, μειώνοντας έτσι τον συνολικό υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος. Επιπρόσθετα, το πλέγμα δημιουργήθηκε με χρήση της εντολής «seed edges» με μέση διάσταση στοιχείου 0.125 mm κοντά στην επιφάνεια κρούσης (2 mm από την επιφάνεια της ραφής) και 0.5 μακριά (Σχήμα 47).



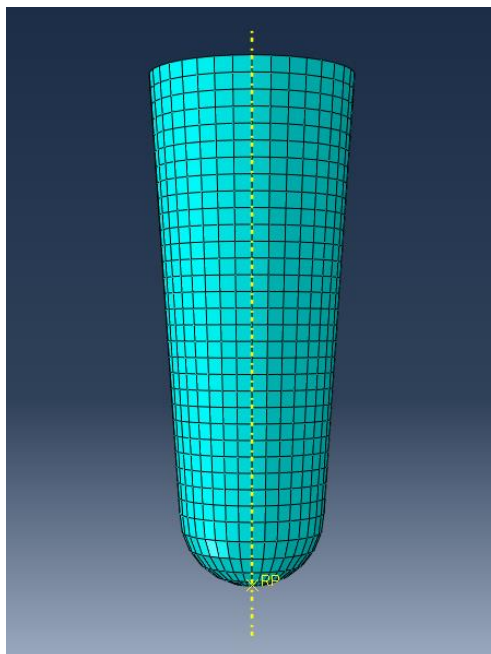
Σχήμα 47. Εντολή Seed Edges για καθορισμό του αριθμού των στοιχείων μεταξύ των partitions.

Στη συνέχεια, για την τελική δημιουργία του πλέγματος έγινε χρήση της εντολής «mesh controls». Συγκεκριμένα, έγινε επιλογή hex για το σχήμα των στοιχείων και sweep για την τεχνική meshing. Τέλος, έγινε χρήση των εντολών «medial axis» και «minimize the mesh transition» για τη δημιουργία πιο ομαλής γεωμετρίας πλέγματος. Παρακάτω, εμφανίζεται το τελικό πλέγμα της συγκολλητής κατασκευής (Σχήμα 48).



Σχήμα 48. Τελικό πλέγμα συγκολλητής κατασκευής.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι έγινε και διακριτοποίηση του PIN. Παρακάτω, φαίνεται η γεωμετρία του PIN με το πλέγμα της (Σχήμα 49).



Σχήμα 49. Πλέγμα PIN.

3.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑΣ SIGINI

Ένα από τα πιο δύσκολα στάδια αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων στο υλικό συγκόλλησης. Ο πιο εύκολος τρόπος, που αρχικά χρησιμοποιήθηκε ήταν η εντολή εισαγωγής «predefined field» μέσα από το περιβάλλον του Abaqus. Δυστυχώς, αυτός ο τρόπος δεν ήταν δυνατό να δουλέψει, καθώς έπρεπε να οριστούν οι τάσεις στο χώρο για κάθε ένα διαφορετικό στοιχείο, πράγμα αδύνατον για το μοντέλο. Κατά συνέπεια, βασιζόμενοι στην βιβλιοθήκη του Abaqus αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η υπορουτίνα SIGINI μέσω της οποίας με την κατάλληλη χρήση προγραμματισμού θα μπορούσε να εισαχθεί η συνάρτηση των παραμενουσών τάσεων.

Στην εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων ελήφθησαν υπόψη μόνο αυτές που δημιουργούνται στον διαμήκη άξονα της συγκόλλησης και θεωρήθηκαν τα άλλα δύο διανύσματα αμελητέα [34-41]. Βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν η ανάγκη στατικής ισορροπίας των τάσεων, γεγονός που αποτέλεσε σοβαρό εμπόδιο εξαιτίας των ποικίλων συνοριακών συνθηκών. Επιπρόσθετα, αρκετά δύσκολη διαδικασία αποτέλεσε η σύνδεση του Abaqus με τη γλώσσα προγραμματισμού Fortran, πρόβλημα που επιλύθηκε με τη χρήση του προγράμματος Visual Studio 2019 και επεξεργασία ποικίλων φακέλων των δύο προγραμμάτων.

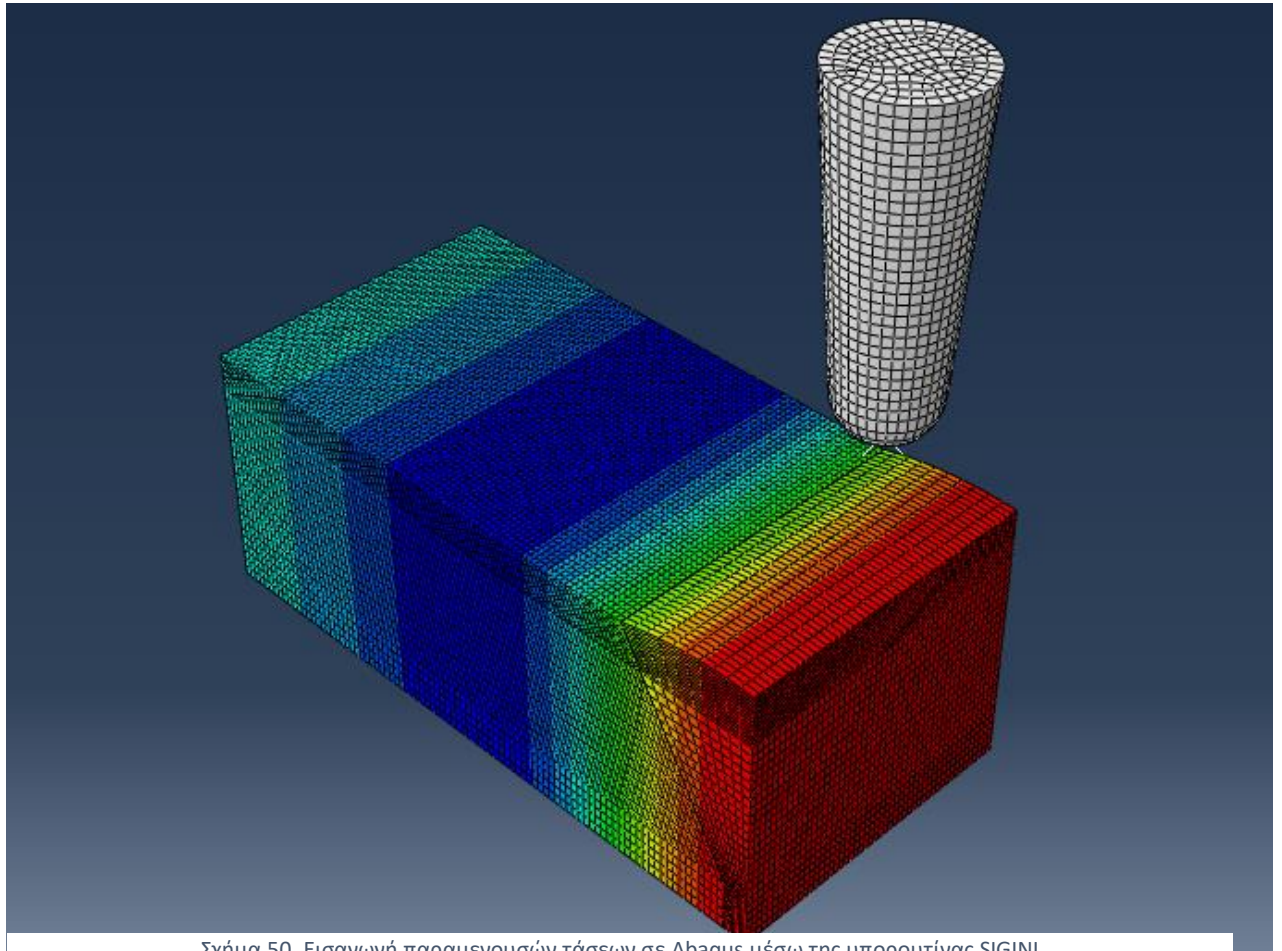
Για την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων έγινε χρήση της παρακάτω εξίσωσης :

$$\sigma_x(y) = \sigma_{max} \cdot [1 - (y/b)^2] \cdot e^{-0.5 \cdot (y/b)^2} \quad [3.22]$$

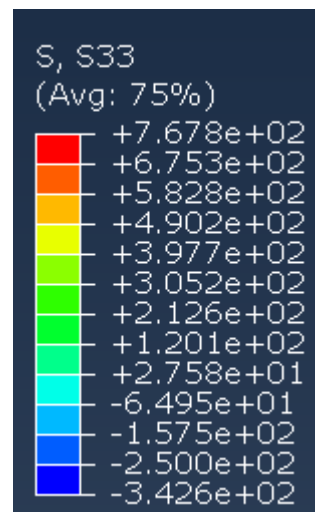
Αξίζει να σημειωθεί, ότι έγινε προσαρμογή της παραπάνω εξίσωσης με βάση τη γεωμετρία της συγκολλητής κατασκευής μας και των αξόνων στο Abaqus. Για την χρήση της υπορουτίνας SIGINI έγινε παρεμβολή στον φάκελο Abaqus.inp μέσω του menu «Edit keywords,Model». Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε ήταν «*Initial Conditions,type=stress,user» αμέσως πριν τον ορισμό του initial step. Βασιζόμενοι στην βιβλιοθήκη του Abaqus [42] προστέθηκε ένα επιπλέον static-general step μετά το initial step, έτσι ώστε να φτάσουν οι παραμένουσες τάσεις σε μία ισορροπία πριν την έναρξη των κρούσεων.

Παρακάτω, φαίνεται αναλυτικά ο κώδικας σε γλώσσα Fortran που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική μοντελοποίηση και τα τελικά αποτελέσματα μετά την εισαγωγή του (Σχήμα 50,51).

```
SUBROUTINE SIGINI(SIGMA,COORDS,NTENS,NCRDS,NOEL,NPT,LAYER,
 1 KSPT,LREBAR,REBARN)
C   Abaqus Library is taken into account
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C   Table with dimensions and coordinates of the model
  DIMENSION SIGMA(NTENS),COORDS(NCRDS)
  CHARACTER NAMES(2)*80
C   Condition in order to take into account only the region where the residual stresses will be imported
  IF(COORDS(1).GE.-25.AND.COORDS(1).LE.2) THEN
  SIGMA(1) = 0
  SIGMA(2) = 0
C   Function for residual stresses according to Rosenthal model
  SIGMA(3) = 767.8956*(1-(((COORDS(1)-1)/7.5)**2)*exp((-0.5)*(((COORDS(1)-1)/7.5)**2))
  SIGMA(4) = 0
  SIGMA(5) = 0
  SIGMA(6) = 0
  END IF
  RETURN
END
```



Σχήμα 50. Εισαγωγή παραμενουσών τάσεων σε Abaqus μέσω της υπορουτίνας SIGINI

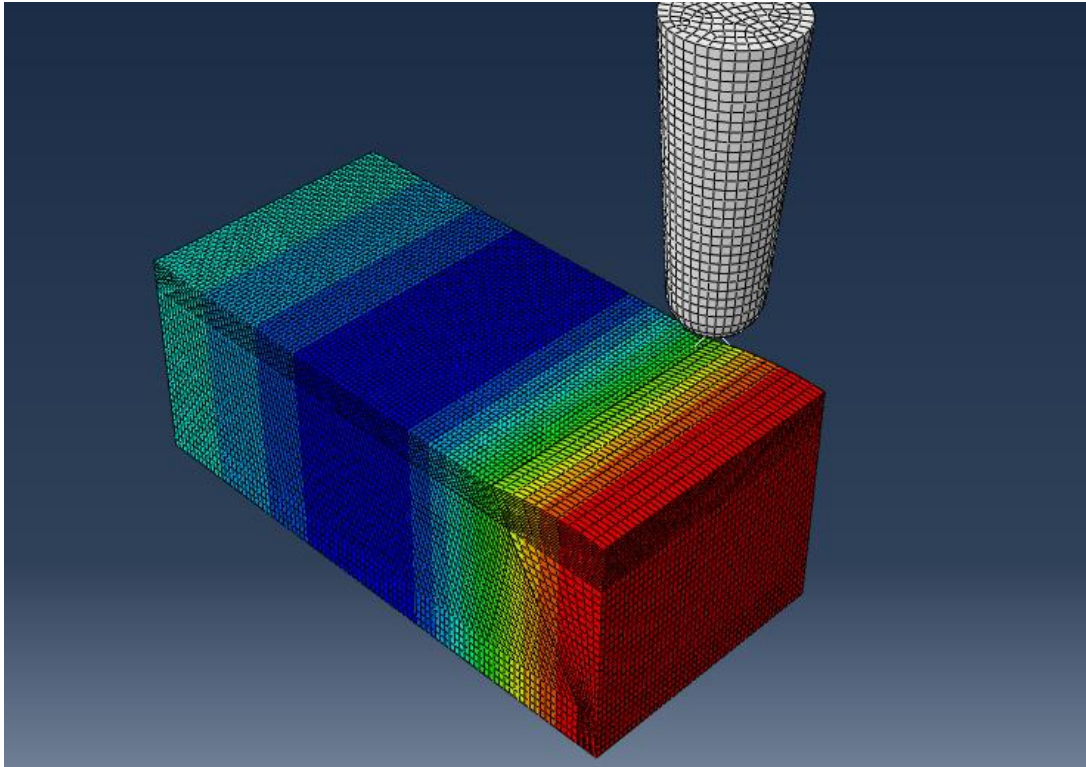


Σχήμα 51. Τιμή διαμήκουσ παραμένουσασ τάσης

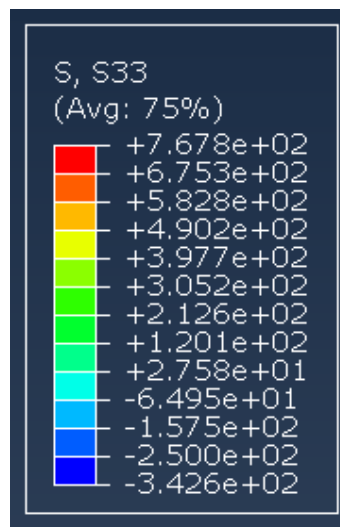
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων, έπειτα από πολλαπλές προσπάθειες και δοκιμές προσομοιώσεων. Η μοντελοποίηση και η τελική εκτέλεση πραγματοποιήθηκε σε διάστημα πολλών μηνών. Συγκεκριμένα, κάθε διαφορετική μοντελοποίηση της διεργασίας HFMI διαρκούσε από 5-7 ημέρες, γεγονός που κατέστησε απαραίτητη τη χρήση μικρότερων υπομοντέλων, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι υπάρχουν σωστοί παράμετροι πριν το τελικό τρέξιμο του προγράμματος.

Αρχικά, η τελική προσομοίωση αποτελείται από 103 steps, με συνολικά 51 χτυπήματα κατά μήκος των 12.5 χιλιοστών του μήκους της συγκόλλησης. Η κρούση έγινε στο πόδι της συγκόλλησης με συνολικό χρόνο προσομοίωσης τουλάχιστον 120 ώρες. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι το υπολογιστικό κόστος είναι μεγάλο και οποιαδήποτε αλλαγή σε βασικές παραμέτρους του προβλήματος πιθανώς να επιφέρει επιπρόσθετη επιβάρυνση. Παρακάτω, παρατίθεται το αποτέλεσμα των διαμήκων παραμενουσών τάσεων μετά την εισαγωγή της υπορουτίνας SIGINI (Σχήμα 52). Στο σχήμα 53 εμφανίζεται ένας πίνακας, μέσω του οποίου είναι αντιληπτό, ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται προσεγγίζει το όριο διαρροής του χάλυβα υψηλής αντοχής πράγμα που επαληθεύει την ορθότητα της υπολογιστικής διαδικασίας.

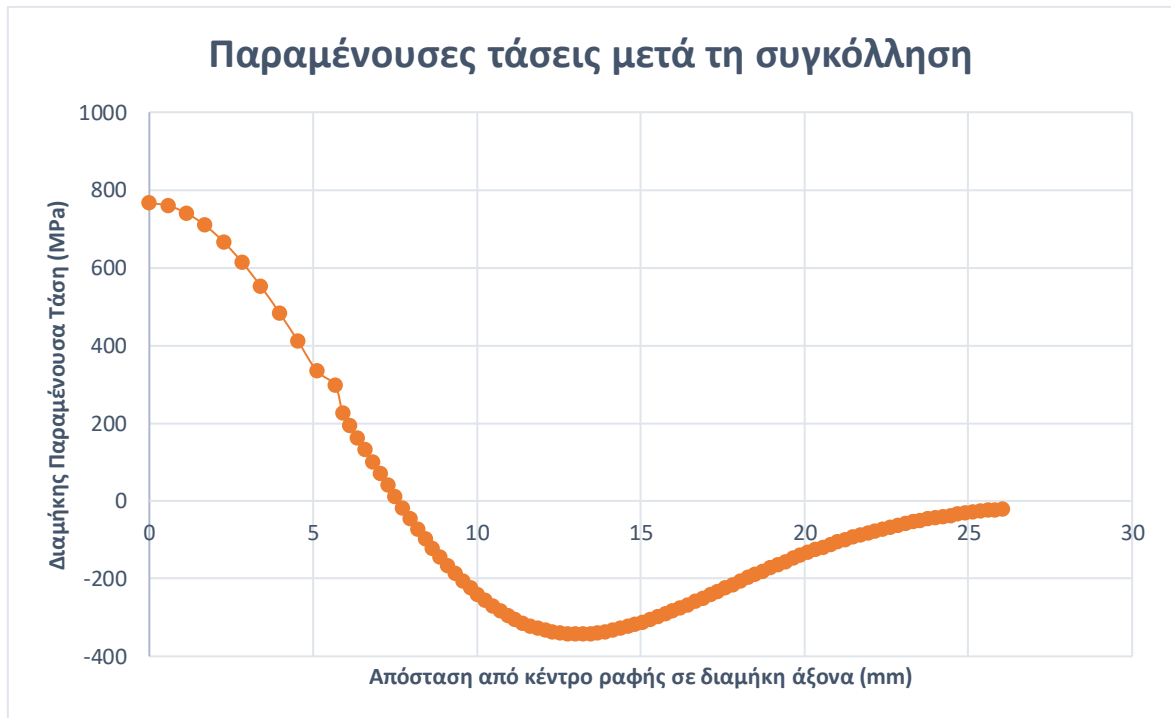


Σχήμα 52. Υπολογισμός διαμήκους παραμένουσας τάσης μετά την εφαρμογή της υπορουτίνας SIGINI.



Σχήμα 53. Τιμές διαμήκους παραμένουσας τάσης μετά την εφαρμογή της υπορουτίνας SIGINI.

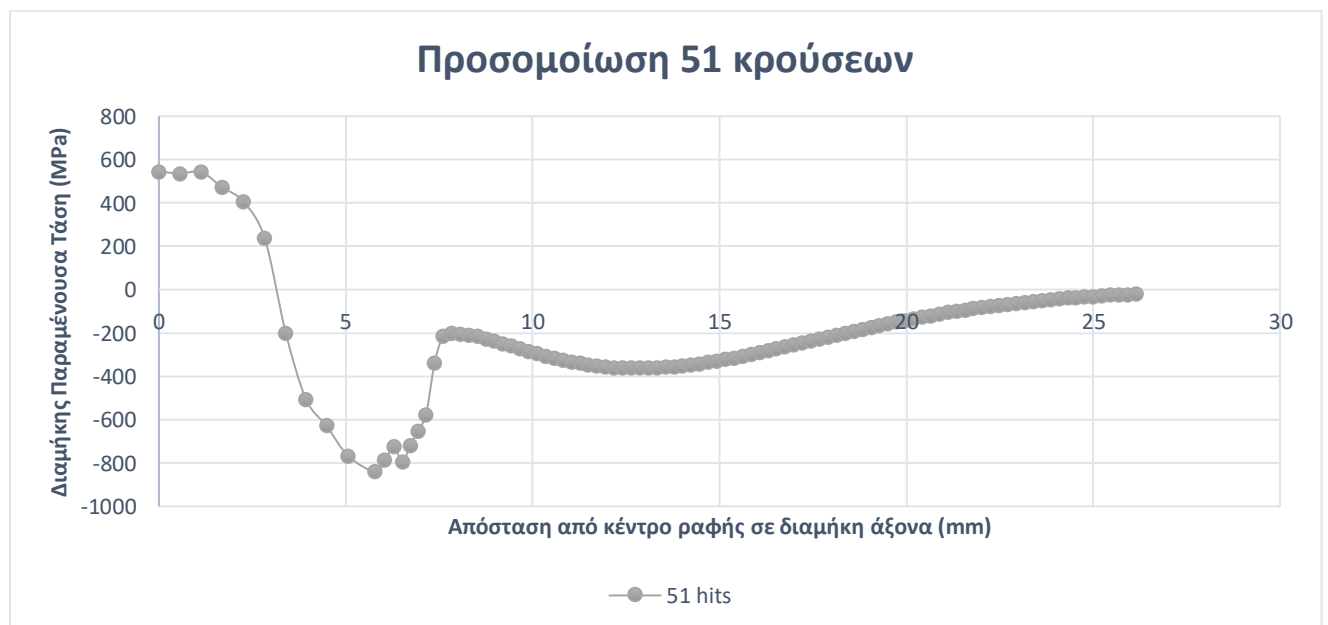
Παρακάτω, παρουσιάζονται σε διάγραμμα οι διαμήκεις παραμένουσες τάσεις σε σχέση με την απόσταση στον εγκάρσιο άξονα της συγκόλλησης από το κέντρο της ραφής.



Σχήμα 54. Διάγραμμα τάσης (MPa) - απόστασης από διαμήκη άξονα συγκόλλησης (mm) αμέσως μετά την εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων μέσω της υπορουτίνας SIGINI.

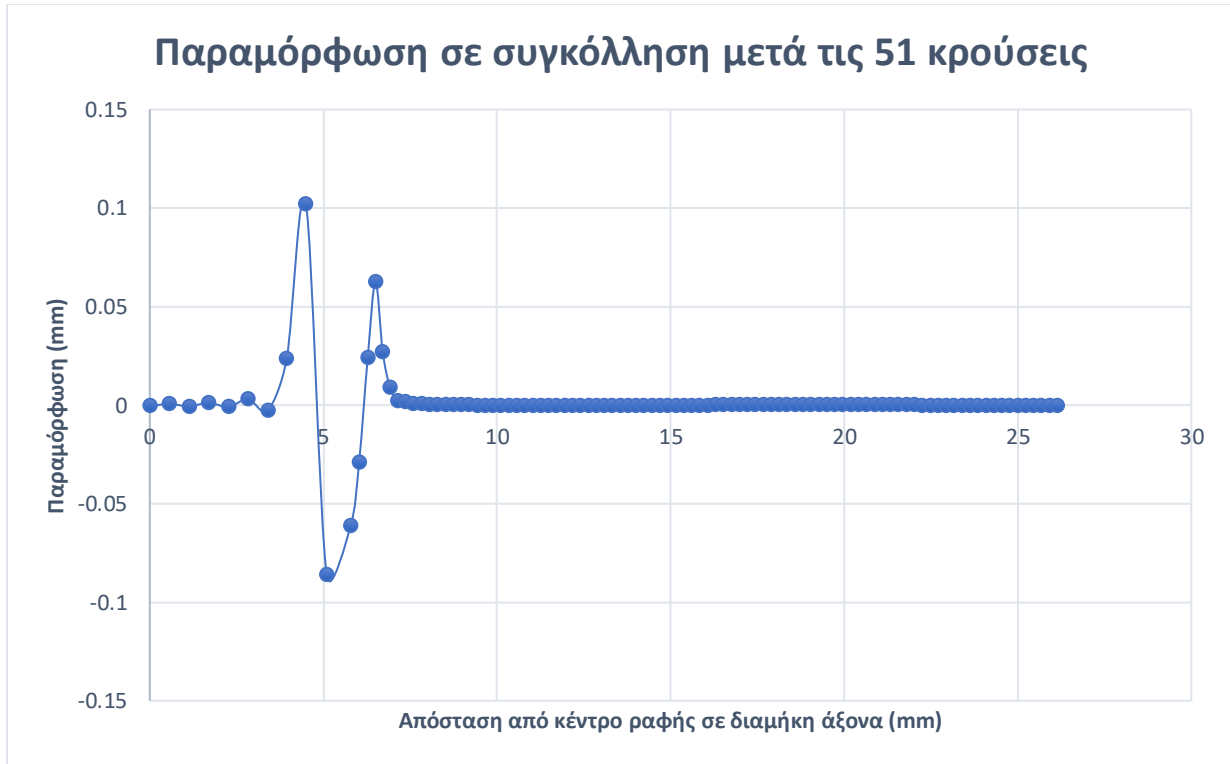
Είναι εμφανής μία μικρή ανωμαλία στην τιμή της τάσης περίπου στα 6 χιλιοστά. Το παραπάνω αποδίδεται ξεκάθαρα στην ύπαρξη γεωμετρικής ανωμαλίας, εξαιτίας της μετάβασης από το βασικό μέταλλο στο υλικό της συγκόλλησης.

Παρακάτω, παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-απόστασης από το διαμήκη άξονα της συγκόλλησης μετά την εφαρμογή των 51 κρούσεων HFMI.



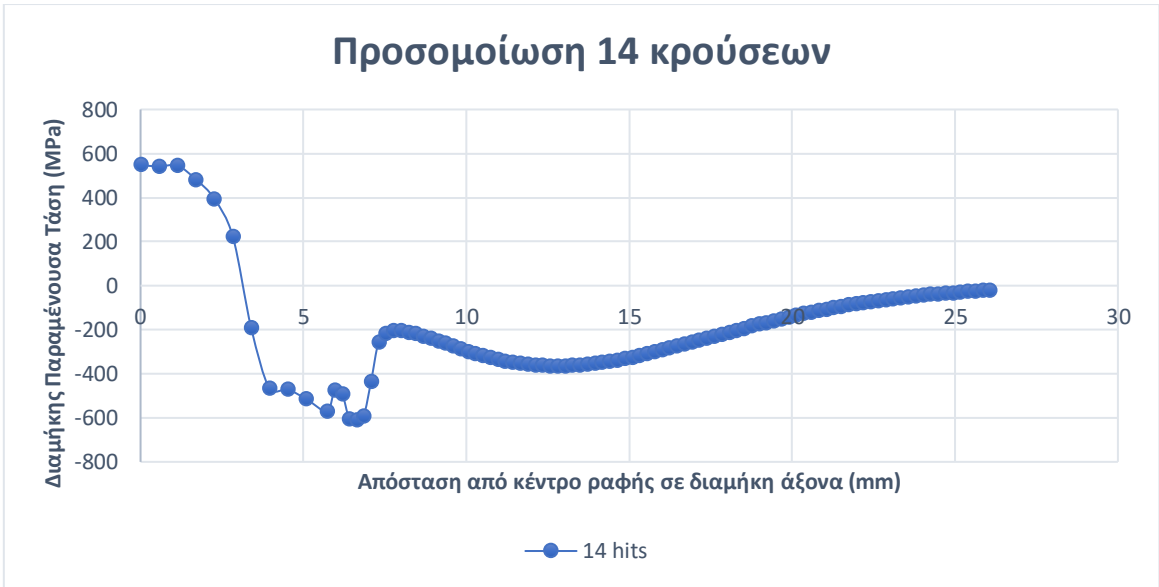
Σχήμα 55. Διάγραμμα τάσης (MPa) - απόστασης από διαμήκη άξονα συγκόλλησης (mm) για προσομοίωση 51 κρούσεων.

Όπως φαίνεται, σημειώνεται σημαντική μείωση των παραμενουσών τάσεων, κυρίως στη περιοχή του πόδα της συγκόλλησης. Προφανώς, με χρήση μεγαλύτερου βάθους διείδυσης η επίδραση στις παραμένουσες τάσεις θα εμφανιζόταν σε μεγαλύτερο μήκος. Παρακάτω, παρουσιάζεται η παραμόρφωση που υφίσταται ο χάλυβας μετά το πέρας των κρούσεων των ΗΦΜΙ.

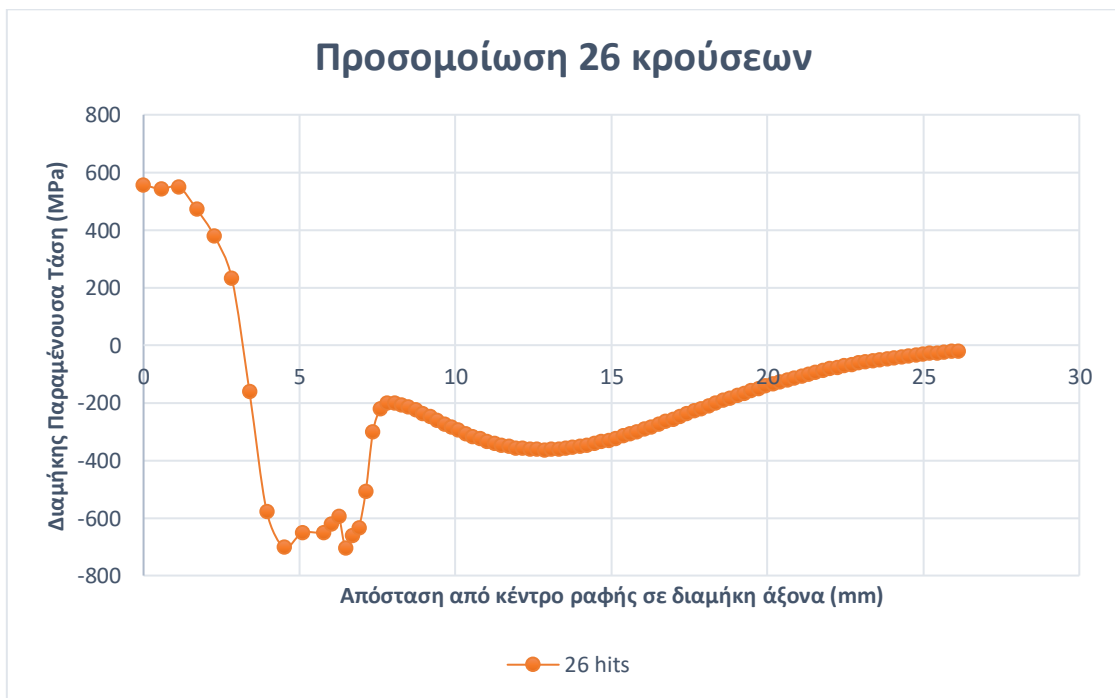


Σχήμα 56. Διάγραμμα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα (mm) - απόστασης από διαμήκη άξονα συγκόλλησης (mm).

Όπως είναι εμφανές, υπάρχει εξάρτηση των παραμορφώσεων από τις παραμένουσες τάσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όλα τα σημεία στα οποία μετρήθηκαν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις βρίσκονται στην επιφάνεια της συγκολλητής κατασκευής. Επίσης, έγινε παραμετροποίηση του προβλήματος με την εφαρμογή δύο ακόμα μοντελοποιήσεων. Στην πρώτη, έγιναν συνολικά 14 κρούσεις, ενώ στην δεύτερη 26 κρούσεις σε μήκος 12.5 χιλιοστών. Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα και για τις δύο αυτές προσομοιώσεις και παρουσιάζεται διάγραμμα, στο οποίο φαίνεται η σύγκρισή τους (σχήμα 59).

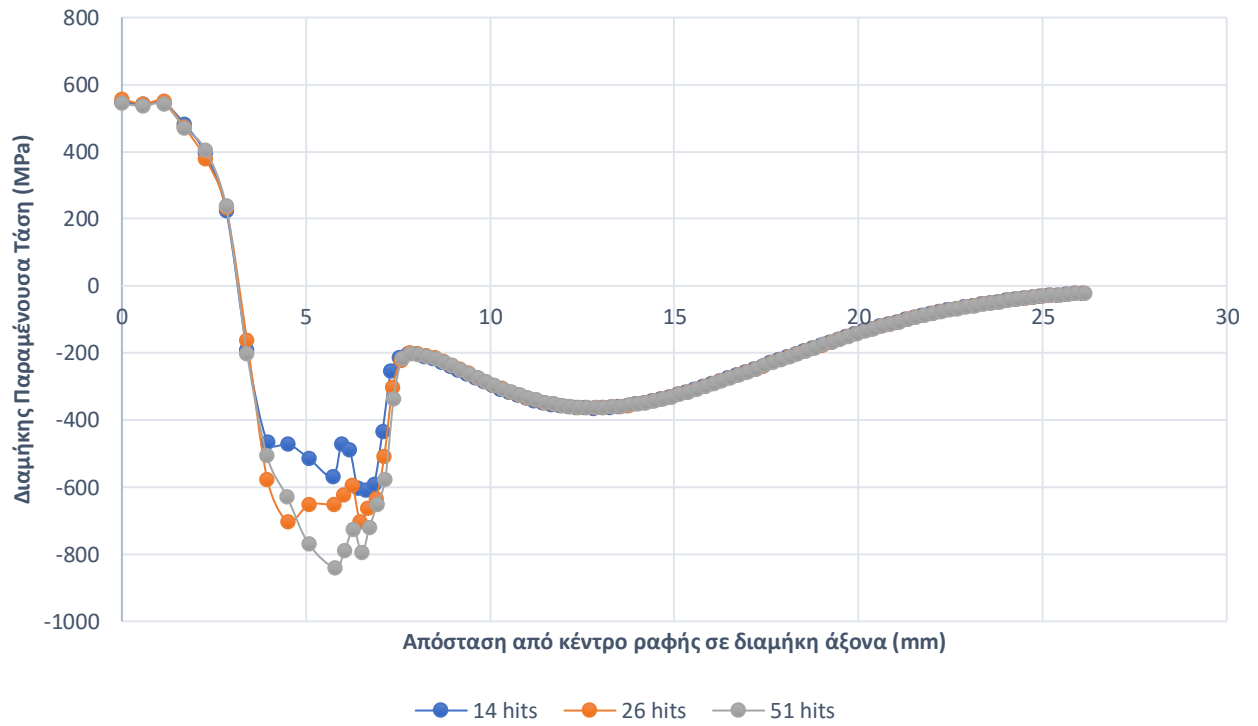


Σχήμα 57. Διάγραμμα τάσης (MPa) - απόστασης από διαμήκη άξονα συγκόλλησης (mm) για προσομοίωση 14 κρούσεων.



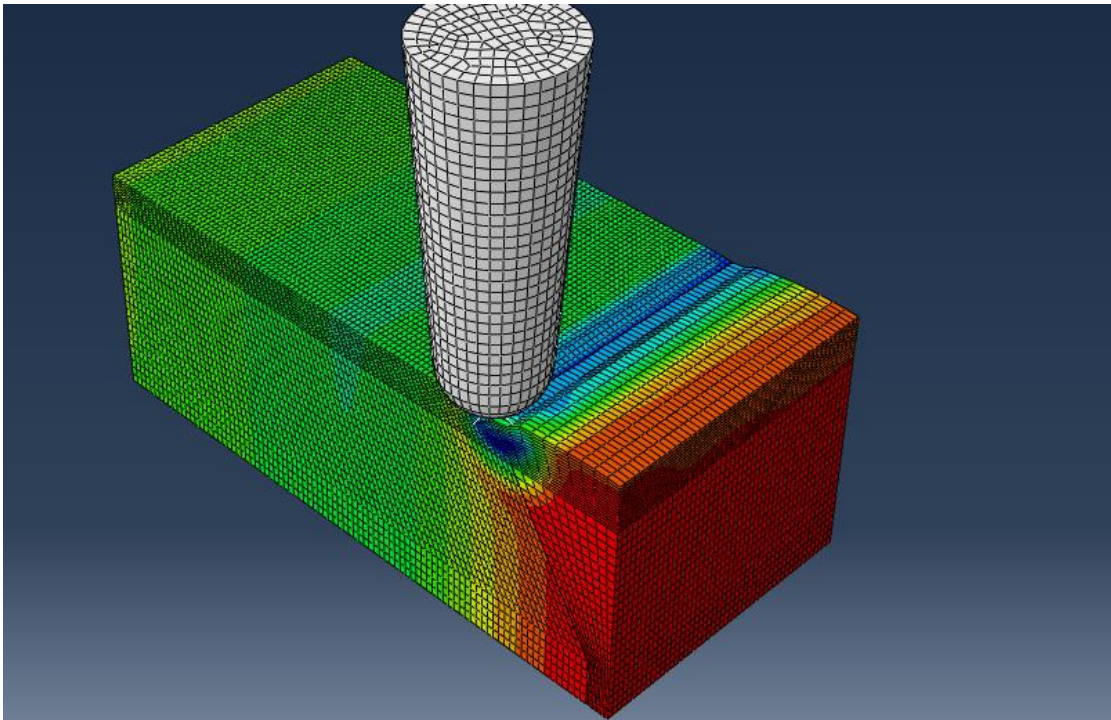
Σχήμα 58. Διάγραμμα τάσης (MPa) - απόστασης από διαμήκη άξονα συγκόλλησης (mm) για προσομοίωση 26 κρούσεων.

Σύγκριση διαφορετικού αριθμού κρούσεων HFMI

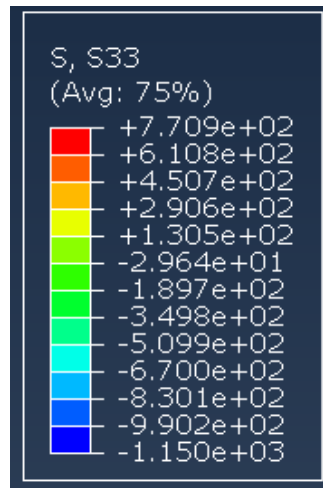


Σχήμα 59. Σύγκριση διαφορετικών αριθμών κρούσεων HFMI.

Παρακάτω, παρατίθεται σε μορφή contouring τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας για 51 κρούσεις (Σχήμα 60,61).



Σχήμα 60. Αποτελέσματα διαμήκων παραμενουσών τάσεων μετά τις 51 κρούσεις του PIN.



Σχήμα 61. Τιμές διαμήκων παραμενουσών τάσεων μετά τις 51 κρούσεις του PIN.

Παρατηρούμε, πως υπάρχει έντονη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων με μπλέ χρώμα στα σημεία όπου έγινε η κρούση του PIN. Είναι εμφανής, η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων σε πάχος μέχρι τα 2 περίπου χιλιοστά από την επιφάνεια κρούσης, ενώ παράλληλα επιβεβαιώνεται η έντονη αλλαγή του εφελκυστικού πεδίου παραμενουσών τάσεων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρήχθησαν σημαντικές πληροφορίες, σχετικά με την επίδραση της μεθόδου HFMI στις παραμένουσες τάσεις μίας μετωπικής συγκόλλησης χάλυβα υψηλής αντοχής. Συγκεκριμένα, γίνεται εμφανές, ότι με μέσο βάθος διεΐσδυσης PIN 1.25 mm οι παραμένουσες τάσεις φτάνουν ακόμα και τα -770 MPa κοντά στην επιφάνεια κρούσης. Με αυτό τον τρόπο, όχι μόνο εξαλείφεται η επίδραση των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων αλλά μέσω της απότομης επιβολής θλιπτικού φορτίου δυσχεραίνεται η ανάπτυξη μικρορωγμών και κατ' επέκταση αυξάνεται η αντοχή της συγκολλητής κατασκευής. Επιπρόσθετα, μέσω της κρούσης του PIN, τροποποιείται η γεωμετρία στον πόδα της συγκόλλησης και μειώνεται έτσι η γεωμετρική ανωμαλία που υπάρχει εκεί. Συνεπώς, το παραπάνω δρα θετικά αυξάνοντας την ζωή της κατασκευής μας.

Από τα 3 mm απόστασης από το κέντρο της ραφής στον εγκάρσιο άξονα και μετά υπάρχει μόνο θλιπτική παραμένουσα τάση γεγονός που θα επιδρούσε σε μεγαλύτερο εύρος αν το βάθος διεΐσδυσης ήταν μεγαλύτερο. Επιπλέον, η μικρή ανομοιομορφία στο διάγραμμα τάσης-απόστασης περίπου στα 6-7 χιλιοστά οφείλεται στο σημείο ασυνέχειας μεταξύ βασικού μετάλλου συγκόλλησης και υλικού συγκόλλησης. Η απότομη αλλαγή κλίσης στη θέση 7.6 mm οφείλεται στη απότομη αλλαγή του πεδίου εφελκυστικών τάσεων και στην ανάγκη από το Abaqus εύρεσης στατικής ισορροπίας. Από εκείνο το σημείο και μετά η τάση συγκλίνει προς την τιμή 0. Πιθανώς, σε χρήση μεγαλύτερου βάθους εισχώρησης να μην υπήρχε εμφάνιση της παραπάνω αλλαγής με τόσο απότομη κλίση. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τα [34-37] σε ποικίλα σημεία.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι μέσω της παραμετροποίησης είναι εμφανής η αύξηση της θλιπτικής παραμένουσας τάσης με την αύξηση της συχνότητας κρούσεων. Συγκεκριμένα, γίνεται αύξηση της μέγιστης θλιπτικής τάσης για περίπου 200 MPa ανά αύξηση των κρούσεων όπως αναγράφεται στο παραπάνω διάγραμμα. Καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι με χρήση ρυθμού χτυπήματος 0.25 mm/hit επιτυγχάνουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, έχοντας μεγαλύτερη επικάλυψη του PIN ανά κρούση. Επιβεβαιώνεται λοιπόν, γιατί ο παραπάνω ρυθμός χτυπημάτων θεωρείται ικανοποιητικός από τα [34-37].

Μέσα από την παραπάνω μοντελοποίηση παρουσιάζεται η σημαντική επίδραση που μπορεί να έχει η μέθοδος HFMI στην μείωση των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητή κατασκευή από χάλυβα υψηλής αντοχής (HSLA). Είναι κατανοητή η συνεισφορά αυτής της μεθόδου στην αύξηση της αντοχής σε κόπωση και επιβεβαιώνεται η θετική επίδραση του εξωτερικά επιβαλλόμενου θλιπτικού φορτίου. Μέσα από την χρήση διαφορετικών προσομοιώσεων με μεγαλύτερο βάθος εισχώρησης και πιθανώς μικρή γωνία στο PIN είναι δυνατή η ακόμα πιο ακριβής μοντελοποίηση της μεθόδου. Τέλος, η χρήση πειραματικών μεθόδων μπορεί να επιβεβαιώσει τα παραπάνω αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται να συμφωνούν με άλλες ερευνητικές εργασίες.

5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μέσα από τη παραπάνω διπλωματική εργασία επιβεβαιώθηκε η θετική επίδραση που έχει η διεργασία του HFMI σε μετωπική συγκόλληση χάλυβα υψηλής αντοχής, μέσω της μείωσης των παραμενουσών τάσεων. Το πρόβλημα όμως είναι πολυπαραγοντικό και η επίλυσή του σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων χρειάζεται να λάβει υπόψη επιπρόσθετους παράγοντες για να περιγράψει πλήρως τη παραπάνω διεργασία. Συγκεκριμένα, στη μοντελοποίηση σε περιβάλλον Abaqus δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση του HFMI στην εγκάρσια παραμένουσα τάση. Το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά δύσκολο, καθώς δεν υπάρχει κάποια άμεσα συνδεδεμένη μαθηματική σχέση με αυτές. Κατά συνέπεια, γίνεται να γίνει εισαγωγή των παραπάνω τάσεων με χρήση αποτελεσμάτων από πειραματικές διεργασίες ή από μοντελοποίηση ολόκληρης της συγκόλλησης και του θερμοδυναμικού φαινομένου.

Επιπρόσθετα, το βάθος εισχώρησης περιορίστηκε στο 1.25mm. Η χρήση μεγαλύτερων βαθών εισχώρησης πιθανώς να προσεγγίσει την πραγματικότητα σε μεγαλύτερο βαθμό. Επίσης, η κρούση υπό γωνία PIN 6-8° καθώς και η ανάπτυξη UMAT για περιγραφή της κράτνσης του υλικού μας θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην εξέλιξη του μοντέλου. Τέλος, η χρήση πειραματικών μεθόδων για επιβεβαίωση και συγκέντρωση χρήσιμων αποτελεσμάτων προτείνεται ανεπιφύλακτα ως αναβάθμιση της παραπάνω εργασίας.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι η καινοτόμα αυτή μέθοδος είναι δυνατό να επιφέρει σημαντική αύξηση της ζωής μίας συγκολλητής κατασκευής που υπόκειται σε εναλλασσόμενα φορτία. Η εξέλιξη του ερευνητικού έργου που γίνεται γύρω από το HFMI και εισαγωγή αυτής της μεθόδου στην βιομηχανία σε ευρύτερο βαθμό, είναι αναμενόμενη το επόμενο διάστημα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δημήτρης Ι. Παντελής, Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος. «Επιστήμη και Τεχνολογία των συγκολλήσεων». Αθήνα, 2017.
2. Maurice Stewart, 2021. “Surface Production Operations”.2021.
3. Myung-Su Yi, Joo-Shin Park, Korea 2022. “Study of Heat Source Model and Residual Stress Caused by Welding in GMAW of Al Alloy”, Metals, Vol. 12, 891.
4. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος, «Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις» Βόλος 2023.
5. Φωτόπουλος Νικόλαος, Διπλωματική εργασία, «Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα DH36 με τις μεθόδους GMAW και FCAW», 2010.
6. ARANER, 2022. “Liquid Hammer in Piping Systems & the Best Control Strategies”.
7. World Intellectual Property Organization, 2010. “International Application published under the patent cooperation treaty (PCT), WO 2008/107660 A1”.
8. Lyes Hacini, Ngan Van Le, Philippe Bocher, November 2008. “Effect of impact energy on residual stresses induced by hammer peening of 304L plates”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 208, pp.542-548.
9. Magdalena Bucior, Rafał Kluz, Tomasz Trzepieciniski, Kamil Jurczak, Andrzej Kubit, Kamil Ochal, 2022. “The Effect of Shot Peening on Residual Stress and Surface Roughness of AMS 5504 Stainless Steel Joints Welded Using the TIG Method”, Materials, Vol. 15, 8835.
10. Dragan Djuric, Rudolf Vallant, Klaus Kerchbaumer, Nobert Enzinger, 2013. “Vibration Stress Relief Treatment of Welded High-Strength Martensitic Steel”, Welding in the world, Vol. 55, pp.86-93.
11. SRE, 2018. “Stress Relief of Weld by Heat Treatment and Vibration: A Comparison Between the Two Methods”.
12. Jan Schubnell, Eva Carl, Majid Farajian, Stefanos Gkatzogiannis, Peter Knödel, Thomas Ummenhofer, Robert Wimpory, 2022. “Residual stress relaxation in HFMI-treated fillet welds after single overload peaks”, Welding in the world, Vol 64. pp. 1107-1117.
13. M. Edgren, Z. Barsoum, K. Åkerlind, M. Al-Emrani, 2019. “Evaluation of HFMI as a Life Extension Technique for Welded Bridge Details”, Procedia Structural Integrity, Vol. 19, pp.73-80.
14. HiFIT, 2023. “The revolution for welded constructions: Post-Weld treatment with HiFIT”.
15. Boris Fustar, Ivan Lukacevic, Darko Dujmovic, July 2020. “High-Frequency mechanical impact treatment of welded joints”, Gradevinar, Vol 72, pp. 421-436.
16. International Institute of Welding, December 2008. “Recommendations for fatigue design of welded joints and components iiw document iiw-1823-07 ex xiii-21515”.
17. Boris Fuštar, Ivan Lukacevic, Darko Dujmovic, Mladen Lukic, August 2021. “Two-Stage Model for Fatigue Life Assessment of High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treated Welded Steel Details”, Metals - Open Access Metallurgy Journal, Vol 11, 1318.

18. Winniefred Rudorffer, Michael Wächter, Alfons Esderts, Florian Dittmann, Igor Varfolomeev, January 2022. “Fatigue assessment of weld seams considering elastic–plastic material behavior using the local strain approach”, *Welding in the World*, Vol 66, pp. 721-730.
19. Βασίλειος Ι. Παπάζογλου, Αθήνα 2018. “Ναυπηγική Τεχνολογία”.
20. Μπόμπολης Ιωάννης, Διπλωματική εργασία, «Μελέτη δομής, ιδιοτήτων και εφαρμογών χαλύβων HSLA», Αθήνα 2015.
21. Σταύρος Φ. Δεληγιάννης, Διδακτορική Διατριβή, «Ανάπτυξη χαλύβων υψηλής αντοχής – χαμηλής κραμάτωσης, βασισμένων σε συνδυασμένες μικροκραματικές προσθήκες τιτανίου-βαναδίου», Φεβρουάριος 2021.
22. Δασκαλόπουλος Νικόλαος, Διπλωματική Εργασία, « Βελτιστοποίηση συνθηκών ρομποτικής συγκόλλησης GMAW χάλυβα S700MC βάσει του ρυθμού εισαγωγής θερμότητας», Ιούλιος 2022.
23. Λουλάκης, Νικήτας Ν, Διπλωματική εργασία, « Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς καμπύλων σωλήνων από χάλυβα σε υποθαλάσσια συστήματα παραγωγής υδρογονανθράκων», Βόλος 2021.,
24. Welding supplies direct, “TIG Welding Tutorial - Lap Joint”.
25. Arc Machines Inc, March 2022. “How Sulfur Content in Steels and Stainless Steels Changes Weldability”.
26. Hydro Inc, March 2016. “How Root-Cause Analysis Solved a Vertical Turbine Pump Failure”.
27. Yi Xin Pipe Welding, 2021. “Common problems in the welding process”.
28. Alexander R. Hartloper, Albano de Castro e Sousa, Dimitrios G. Lignos, 2017. “Constitutive Modeling of Structural Steels: Nonlinear Isotropic/Kinematic Hardening Material Model and Its Calibration”, *Journal of Structural Engineering*, Vol.147, Issue 4.
29. Ahmed Elkady, Dimitrios G. Lignos, 2018. “Improved Seismic Design and Nonlinear Modeling Recommendations for Wide-Flange Steel Columns”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 144, Issue 9.
30. Albano de Castro e Sousa, Yusuke Suzuki, Dimitrios Lignos, 2019. “Consistency in Solving the Inverse Problem of the Voce-Chaboche Constitutive Model for Plastic Straining”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 146, Issue 9.
31. Albano de Castro e Sousa, Alexander R. Hartloper, Dimitrios Lignos, 2018. “Cyclic Metal Plasticity Model Parameters with Limited Information: Constrained Optimization Approach”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 147, Issue 7.
32. R.J. Cooke, A.M. Kanvinde, November 2015. “Constitutive parameter calibration for structural steel: non-uniqueness and loss of accuracy”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 114, pp. 394-404.
33. Saani Shakil, Wei Lu, Jari Puttonen, September 2020. “Experimental studies on mechanical properties of S700 MC steel at elevated temperatures”, *Fire Safety Journal*, Vol. 116, 103157.

34. Clement Ernould, Jan Schubnell, Majid Farajian, Andreas Maciolek, David Simunek, Martin Leitner, Michael Stoschka, February 2019. "Application of different simulation approaches to numerically optimize high-frequency mechanical impact (HFMI) post-treatment process", *Welding in the World*, Vol. 63, pp.725-738.
35. Stefanos Gkatzogiannis, Peter Knoedel, Thomas Ummenhofer, May 2020. "Calibration of High-Frequency Mechanical Impact Simulation Based on Drop Tests", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.29, pp. 4879-4887.
36. Jan Foehrenbach, Volker Hardenacke, Majid Farajian, April 2016. "High frequency mechanical impact treatment (HFMI) for the fatigue improvement: numerical and experimental investigations to describe the condition in the surface layer", *Welding in the World*, Vol. 60, pp.749-755.
37. Yuki Banno, Koji Kinoshita, Zuheir Barsoum, August 2021. "Numerical investigation of influence of under- and over- treatment on residual stress state induced by HFMI, *Welding in the World*, Vol.65, pp.2135-2146.
38. M. Khurshid, M. Leitner, Z. Barsoum, C. Schneider, 2017. "Residual stress state induced by high frequency mechanical impact treatment in different steel grades – Numerical and experimental study", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 123, pp. 34-42.
39. Jan Schubnell, Eva Carl, Majid Farajian, Stefanos Gkatzogiannis, Peter Knödel, Thomas Ummenhofer, Robert Wimpory, Hamdollah Eslami, April 2020. "Residual stress relaxation in HFMI-treated fillet welds after single overload peaks", *Welding in the World*, Vol. 64, pp.1107-1117.
40. Jan Schubnell, Volker Hardenacke, Majid Farajian, August 2017. "Strain-based critical plane approach to predict the fatigue life of high frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints depending on the material condition", *Welding in the World*, Vol.61, pp.1199-1210.
41. Hector Ruiz, Naoki Osawa, Sherif Rashed, July 2020. "Study on the stability of compressive residual stress induced by high-frequency mechanical impact under cyclic loadings with spike loads", *Welding in the World*, Vol.64, pp. 1855-1865.
42. Abaqus Version 6.6 Documentation.

<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/sub/default.htm?startat=ch01s01asb17.html>