ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (SCC-SFC)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΒΙΤΣΑ Α. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
ΔΙΠΛ. ΜΗΧ/ΓΟΥ & ΑΕΡ/ΓΟΥ ΜΗΧ/ΚΟΥ Π.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΠΙΤΑΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ

Πρόλογος:

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία αποτελεί την επιτομή μιας μεγάλης προσπάθειας για βαθύτερη κατανόηση του φαινομένου της αστοχίας σωληνώσεων από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενός προβλήματος όπου συχνά καλείται να αντιμετωπίσει & να προβλέψει ένας μηχανικός σε διυληστηριακούς χώρους, μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος κλπ. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον, αν αναλογιστεί κανείς την εναλλαγή των τάσεων φόρτισης της σωλήνωση, εξαιτίας των διάφορων περιβαλλοντολογικών αλλαγών και της λειτουργίας του εξοπλισμού που ενδεχομένως συνδέει.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με στήριξαν και ιδιαίτερα τον δρ. κο Β. Σπιτά, για την την αμέριστη κατανόηση των αντίξοων παραμέτρων που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης όλους τους φίλους & συνεργάτες καθώς επίσης και την οικογένειά μου, που πάντοτε ήταν στο πλευρό μου κατά τη διάρκεια αυτής της παράλληλης επαγγελματικής & ακαδημαϊκής πορειας.

Δ. Α. Βίτσας

Μηχ/γος Μηχ/κός Π.Π.

Αθήνα, Ιούνης 2013

Περιεχόμενα

Πρόλογος: 3

Synopsis 6

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

1. ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ 10

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 10

1.2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΑΛΥΒΩΝ 10

1.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ 12

1.4. ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ 13

1.4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13

1.4.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ 14

1.4.3. ΕΙΔΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ 14

1.5. ΧΑΛΥΒΔΟΣΩΛΗΝΕΣ & ΑΛΛΑ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ 16

2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ 18

ΓΕΝΙΚΑ 18

2.1. ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 20

2.2. ΚΥΡΙΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 21

2.2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ (SMAW ή MMAW). 23

2.2.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΑΕΡΙΟΥ 24

2.2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΜΗ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΑΕΡΙΟΥ (GTAW). 25

3 Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ 27

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ 27

3.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ 27

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 29

4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ 31

5. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (SCC) ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ 44

5.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SCC ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ 49

6. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ (SFC) 52

6.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ 53

6.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SCF ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΡΑΥΣΗΣ 55

Β. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 59
1.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 59
ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 59
ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 60
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕ SPLINES ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ 60
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΛΑΝΤΖΩΝ 61
ΠΡΟΟΨΗ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΛΑΙΜΟΥ 62
1.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ. 62
1.3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ: 63

Γ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 66
1.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ 67
1.1.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ. 69
1.1.2. ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 74
2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 76
2.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 76
2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΜΕΣΩ Η/Υ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗ 78
3. ΤΕΛΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 79
3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 79
4. ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ 81

Δ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βιβλιογραφία 86

Synopsis

The scope of that postgraduate thesis was the study of the Stress Corrosion Cracking phenomenon, combined with Stress Fatigue Corrosion phenomenon, in pipeline systems. This is a complicated phenomenon which occurs due to a combination of appropriate environment, alternating stresses and material's properties. No matter how well these pipelines are designed, constructed and protected, once in place they are subjected to environmental abuse, external damage, coating disbandments, inherent mill defects, soil movements and third party damage. The phenomenon studied in one 28 inch. Large Bore Pipeline of New Elefsis Refinery.

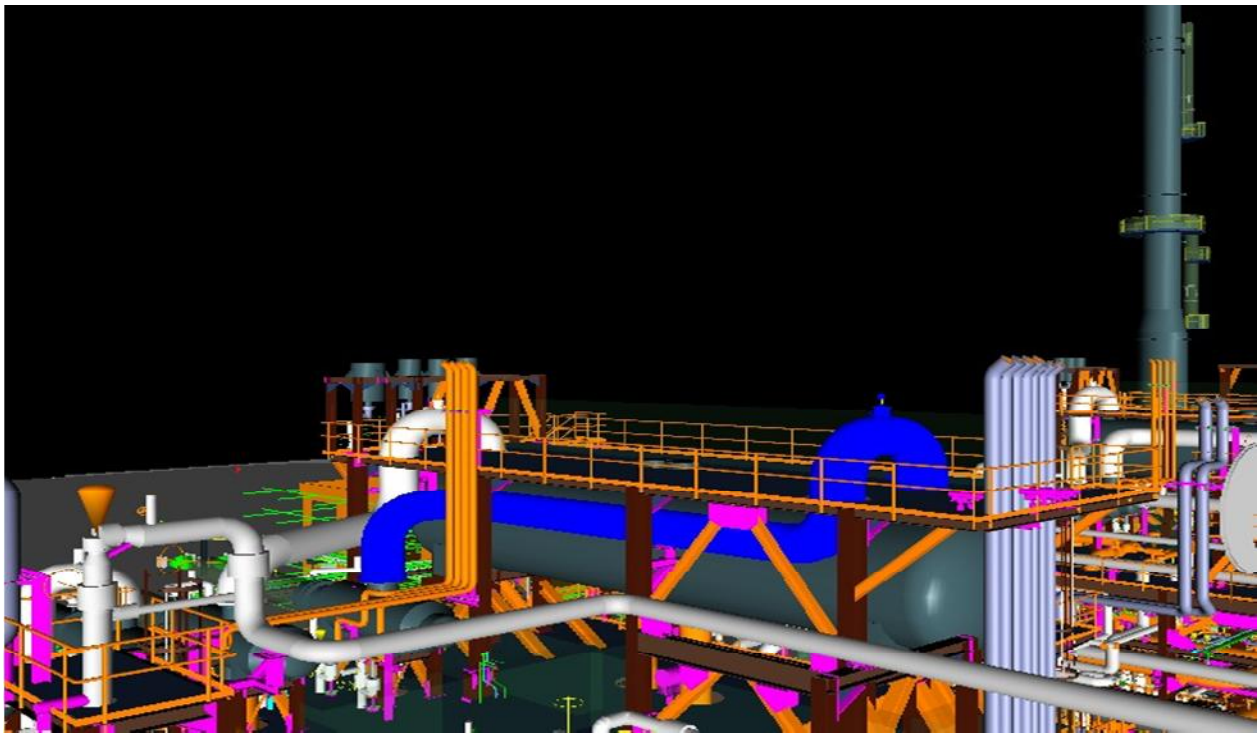
The postgraduate thesis is separated in 3 basic parts.

a. ***Theoretical Part**, which is given all the necessary informations regarding the material's properties (Steel type, amount of inclusions, surface roughness), the welding types & methods, as well as the analysis of corrosion's types in different materials & weldings.*
b. ***Designing Part**, which is given all the necessary geometry of the studied pipeline (routing & welding parts) and the pipeline's weldings.*
c. ***Calculation Part**, which is given all the pipeline's calculations of the static & thermal studies according the computational packets, as well as the problem's analysis at the thermoelastic fields.*

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία έχει ως θέμα την μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης υπό μηχανική καταπόνηση. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μελετήθηκε έχοντας ως άξονα μια χαλύβδινη σωλήνωση που αποτελεί βασικό μέρος μιας σύγχρονης μονάδος αποθείωσης (Sulphur Recovery Unit) του νέου διυλιστηρίου της Ελευσίνας. Το κύριο χαρακτηριστικό της σωλήνωσης που θα μελετήσουμε είναι πως συνδέει ένα μεγάλο αναθερμαντήρα με έναν καταλυτικό αντιδραστήρα του διυλιστηρίου και ως εκ τούτου η αστοχία από ένα τέτοιου είδους φαινόμενο θα είχε εκτός από μεγάλες κατασκευαστικές επιπτώσεις, επιπτώσεις στην ασφάλεια των εργαζομένων και τεράστιο κόστος αποκατάστασης της ζημιάς.



Εικόνα α. Απεικόνιση σωλήνωσης στις εγκαταστάσεις της Ελευσίνας

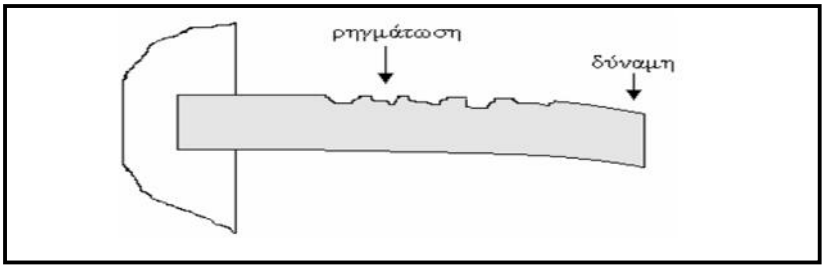
Η διάβρωση [1] που προκαλείται από την επιβολή μηχανικών τάσεων επιφέρει **απότομη αστοχία** σε μερικά **κραματικά συστήματα** των πιο γνωστών κατασκευαστικών μετάλλων. Ο τύπος αυτός της αστοχίας είναι ευρύτερα γνωστός ως αστοχία από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking-Stress Fatigue Corrosion) και προκύπτει από συνδυασμένη δράση χημικών ή ηλεκτροχημικών διαβρωτικών παραγόντων και μηχανικών τάσεων, που προϋπάρχουν στο υλικό ή επιβάλλονται εξωτερικά . Οι παράγοντες αυτοί είναι οι εξής:

A. Μεταλλουργική δομή που μπορεί να υποστεί διάβρωση.
B. Εφελκυστικές και εναλλασσόμενες τάσεις.
C. Διαβρωτικό Περιβάλλον

Εικόνα β. Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο Stress Corrosion Cracking [1]

Η έναρξη της διάβρωσης μπορεί να έχει αίτια είτε μηχανικά τα οποία στη συνέχεια προκαλούν την ηλεκτροχημική δράση είτε ηλεκτροχημικά που αρχικά επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή του υλικού το οποίο στη συνέχεια διαβρώνεται υπό την επίδραση πρόσθετων μηχανικών τάσεων. Ασχέτως μηχανισμού εμφανίζονται τελικά στο υλικό ρηγματώσεις που αναπτύσσονται καθέτως προς τη διεύθυνση των μηχανικών τάσεων (Εικόνα γ).

Το φαινόμενο εμφανίζεται σε ποικιλία μεταλλοκραμάτων (αλουμίνιο – χάλυβας). Μια ιδιαίτερη αλλά σπάνια περίπτωση αποτελεί ο ορείχαλκος (κράμα Cu-Zn) οποίος μπορεί να υποστεί διάβρωση η οποία χαρακτηρίζεται ως εποχιακή ρηγμάτωση (season cracking) με κύρια παράμετρο την εποχιακή μεταβολή της υγρασίας. Ρηγματώσεις μπορούν να εμφανισθούν σε μεταλλικά υλικά από συνδυασμό εφελκυστικών τάσεων σε περιβάλλον με υδρόθειο και νερό. Οι ρηγματώσεις αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε ψαθυρή θραύση του υλικού. Η μορφή αυτή διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση σε θειούχο περιβάλλον (sulfide stress cracking SSC).



Εικόνα γ. Διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking) [1]

Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη, συχνά δε η ύπαρξή της δε συνοδεύεται από εμφανή προϊόντα διάβρωσης.

1. ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ [2],[3],[4],[5],[6],[7]

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα Fe–C που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. (επί τοις εκατό κατά βάρος σύσταση) άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου,θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.

Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες». Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

1.2. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΑΛΥΒΩΝ [2],[3]

Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

(i) Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Περιέχουν έως 1,0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0,05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα.

(ii) Κραματωμένοι χάλυβες.

- Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
- Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
- Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging) με μεγάλα ποσοστά βολφράμιου (W), βανάδιου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρώμιου (Cr), νικέλιου (Ni) και κοβάλτιου (Co).

Όσον αφορά τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

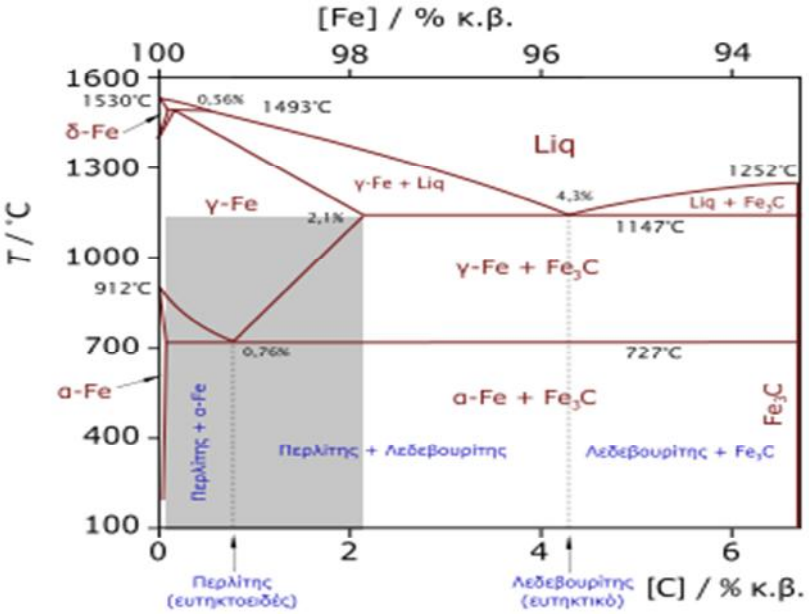
(i) **Χάλυβες διαμόρφωσης**. Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).

(ii) Χυτοχάλυβες. Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή «χελωνών».

<u>Όσον αφορά τη χρήση οι χάλυβες διακρίνονται σε :</u>

<u>(i) Χάλυβες κατασκευών</u>. Είναι χάλυβες με μικρά, σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ.
<u>(ii) Ανοξείδωτοι χάλυβες.</u> Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσεως, όπως π.χ. είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κ.λπ.
<u>(iii) Εργαλειοχάλυβες.</u> Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή.
Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόρνου, φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).
<u>(iv) Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.</u> Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών, κ.λπ..

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης, όπως είναι το γερμανικό DIN, το αμερικάνικο AISI-SAE, το γαλλικό AFNOR καιτο αγγλικό BS. Παρακάτω, θα αναπτυχθεί η ονοματολογία των χαλύβων στα πιο συνήθη συστήματα, που είναιτο γερμανικό DIN και το αμερικάνικο AISISAE.



<u>Εικόνα 1. Η περιοχή των κοινών χαλύβων στο μετασταθές διάγραμμα φάσεων Fe–C.[2]</u>

1.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ [2],[3],[7]

IRON AND STEEL STATISTICS[1]					
U.S. GEOLOGICAL SURVEY					
[All values in metric tons (t) unless otherwise noted]					
Last modification: November 29, 2012					
DIRECT REDUCED IRON STATISTICS					
Year	**Production**	**Imports**	**Exports**	**Apparent consumption**	**World production**
1984	NA	NA	NA	NA	9.240.000
1985	140.000	NA	NA	140.000	11.000.000
1986	160.000	NA	NA	160.000	12.400.000
1987	210.000	56.000	15.000	251.000	13.800.000
1988	290.000	176.000	17.000	449.000	14.400.000
1989	290.000	226.000	23.000	493.000	16.600.000
1990	390.000	333.000	4.000	719.000	18.200.000
1991	410.000	365.000	4.000	771.000	19.100.000
1992	390.000	542.000	9.000	923.000	20.500.000
1993	440.000	1.090.000	17.000	1.510.000	23.500.000
1994	480.000	1.170.000	18.000	1.630.000	27.700.000
1995	460.000	1.190.000	5.000	1.650.000	31.100.000
1996	450.000	1.050.000	3.000	1.500.000	33.000.000
1997	510.000	987.000	8.000	1.490.000	34.700.000
1998	1.600.000	939.000	5.000	2.530.000	37.800.000
1999	1.670.000	950.000	3.000	2.620.000	38.200.000
2000	1.560.000	988.000	2.000	2.550.000	42.400.000
2001	120.000	1.650.000	1.000	1.769.000	39.300.000
2002	470.000	2.010.000	1.000	2.479.000	44.600.000
2003	210.000	1.940.000	5.000	2.145.000	47.200.000
2004	180.000	2.450.000	12.800	2.617.000	53.000.000
2005	220.000	2.170.000	155	2.390.000	56.300.000
2006	240.000	2.610.000	102	2.850.000	58.700.000
2007	250.000	2.330.000	219	2.580.000	65.000.000
2008	260.000	2.340.000	804	2.600.000	66.900.000
2009	0	1.020.000	271	1.020.000	65.400.000
2010	0	1.640.000	974	1.640.000	71.000.000
2011	0	1.800.000	3.910	1.800.000	76.300.000

Πίνακας 1. Πίνακας Παγκόσμιας Παραγωγής Χάλυβα[7]

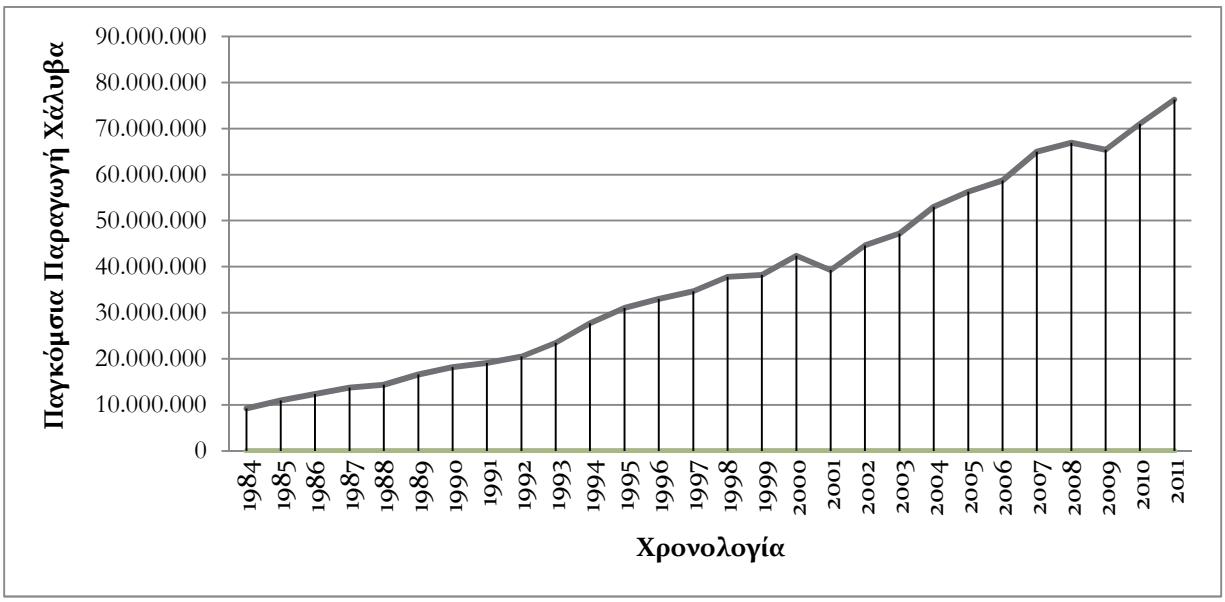
Ο χάλυβας παράγεται με τρεις βασικές μεθόδους:

1. Με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε **υψικάμινο** για την παραγωγή χυτοσιδήρου, και την μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου.
2. Με την **άμεση** αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων (δηλ. αναγωγή σε στερεά κατάσταση) σε φρεατώδη κάμινο για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου (Direct reduced iron ή DRI), και την μετατροπή
3. του σπογγώδους σιδήρου σε χάλυβα μέσα σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου· και

4. Με την **ανάτηξη παλαιοσιδήρου** (σκραπ) σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace - EAF).

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του 2005, το 65,4% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα προέρχεται από τις δύο πρώτες καθετοποιημένες μεθόδους και το 31,7% από την ανάτηξη παλαιοσιδήρων και σπογγώδους σιδήρου σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου. Ένα μικρό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα (2,9% για το 2005) προέρχεται από την μετατροπή χυτοσιδήρου σε κάμινους ανοικτής εστίας ή άλλες μεθόδους.

Στην Ελλάδα, όλη η παραγωγή χάλυβα (περίπου 2,5 εκατ. τόνοι ετησίως) προέρχεται από την ανάτηξη παλαιοσιδήρου και προορίζεται κυρίως για την παραγωγή μπετόβεργας



Διάγραμμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα (Last Update 2011) [7]

1.4. ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ [2],[3]

1.4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο **ανοξείδωτος χάλυβας** είναι κράμα σιδήρου–άνθρακα–χρωμίου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5% κ.β. (Το χρώμιο δημιουργεί ένα μικροσκοπικό στρώμα (10–100 nm) τριοξειδίου του χρωμίου (Cr_2O_3), το οποίο προστατεύει το μεταλλικό υπόστρωμα από την οξείδωση και την διάβρωση. Εκτός από χρώμιο, οι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορεί να περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία, όπως νικέλιο, μολυβδαίνιο, μαγγάνιο, κ.λπ.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παράγονται σε ηλεκτρικές καμίνους με ανάτηξη παλαιοσιδήρου (σκραπ), σιδηροκραμάτων (π.χ. σιδηροχρώμιο, σιδηρονικέλιο, κ.λπ.) και άλλων μεταλλικών προσθηκών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στην διάβρωση για λόγους οικονομικούς (π.χ. χημική βιομηχανία), για λόγους αισθητικούς (π.χ. αρχιτεκτονική) ή για λόγους υγιεινής (π.χ. μαγειρικά σκεύη).

Σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, εκτός από την πολύ υψηλότερη αντοχή στην διάβρωση, παρουσιάζουν επιπλέον και υψηλότερη μηχανική αντοχή. Ωστόσο, είναι πιο σκληροί από τους κοινούς χάλυβες και γι' αυτό πιο δυσκατέργαστοι. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν επίσης χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες.

1.4.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Ο ανοξείδωτος χάλυβας παράγεται σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου παρόμοιο μ' αυτόν που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κοινού χάλυβα από παλαιοσίδηρο και σπογγώδη σίδηρο. Στην περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα, οι πρώτες ύλες είναι παλαιοσίδηρος καισιδηροκράματα, όπως σιδηροχρώμιο και σιδηρονικέλιο. Η αναλογία των πρώτων υλών εξαρτάται από την επιθυμητή τελική ποιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα, αλλά, σε γενικές γραμμές, περίπου το 60% του φορτίου της καμίνου είναι ανακυκλωμένος παλαιοσίδηρος — κυρίως ανοξείδωτος, αλλά και κοινός.

Το υγρό μέταλλο από την ηλεκτρική κάμινο μεταφέρεται σε μεταλλάκτη AOD («Argon Oxygen Decarbonization») για την απομάκρυνση του περιεχόμενου άνθρακα με εμφύσηση οξυγόνου και αργού. Κατά την απανθράκωση, το αέριο μίγμα που εμφυσάται γίνεται όλο και πιο πλούσιο σε αργό, και έτσι η περιεκτικότητα του υγρού μετάλλου μειώνεται από 1,5% σε ποσοστό έως και 0,015% κ.β. Η απανθράκωση του τήγματος μπορεί να γίνει και σε μεταλλάκτη VOD («Vacuum Oxygen Decarbonization») με εμφύσηση οξυγόνου υπό συνθήκες κενού.

Μετά τον μεταλλάκτη AOD/VOD, το υγρό μέταλλο καθαρίζεται υπό κενό για να απομακρυνθούν τα υπολειπόμενα αέρια. Κατόπιν χύνεται σε καλούπια για να παραχθούν πλινθώματα («χελώνες»), ή χύνεται κατά συνεχή τρόπο σε δοκούς («μπιγιέτες»), ή χύνεται σε πλάκες («σλαμπ») υπό πίεση. Η έλαση των πλινθωμάτων και των δοκών γίνεται εν θερμώ ή εν ψυχρώ, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του κοινού χάλυβα, για την παραγωγή πλατέων και επιμήκων προϊόντων.

Τα φύλλα ανοξείδωτου χάλυβα συνήθως υποβάλλονται σε θερμική κατεργασία («ανόπτηση») για να γίνουν πιο μαλακά, και σε καθαρισμό μέσα σε λουτρό οξέος για να καθαριστούν και να δημιουργηθεί πιο γρήγορα το λεπτό στρώμα Cr_2O_3 που προστατεύει τον χάλυβα από την διάβρωση.

1.4.3. ΕΙΔΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

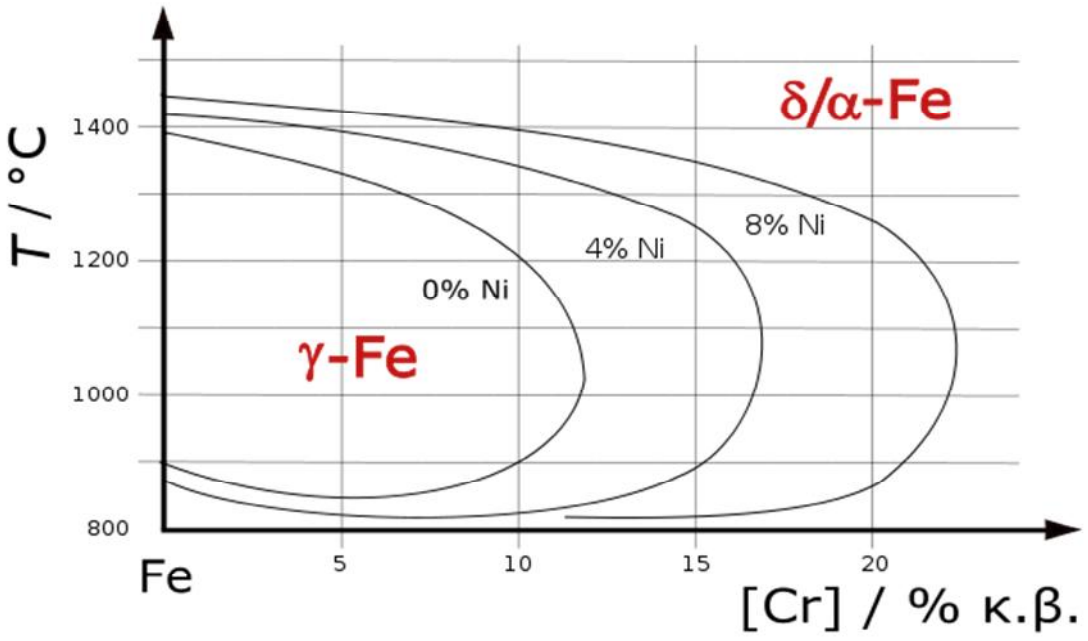
- **Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες**

Πρόκειται για ανοξείδωτους χάλυβες με κύρια φάση τον ωστενίτη (γ-Fe). Περιέχουν πολύ λίγο άνθρακα (συνήθως < 0,08% C, αλλά μερικοί περιέχουν έως 0,15% C) και τουλάχιστον 16% Cr. Ο ωστενίτης σταθεροποιείται με την προσθήκη Ni ή και Mn, και παραμένει η σταθερή φάση σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος από το σημείο τήξης του κράματος έως πολύ κάτω από το 0 °C. Επειδή ο ωστενίτης δεν είναι μαγνητικός (δεν είναι «φερρομαγνητικός»), οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι δεν είναι μαγνητικοί. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία.

Οι πιο κοινοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι ο **18/8** (18% Cr, 8% Ni) και ο **18/10** (18% Cr, 10% Ni), που ανήκουν στην σειρά 300, σύμφωνα με τα αμερικανικά πρότυπα AISI-SAE. Στους ανοξείδωτους χάλυβες AISI-SAE 304 (ISO A2), όσο πιο υψηλή είναι η περιεκτικότητα σε νικέλιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή σε διάβρωση. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες AISI-SAE 316 (ISO A4) παρουσιάζουν ακόμα πιο υψηλή αντοχή στην διάβρωση,

επειδή και μολυβδαίνιο σε περιεκτικότητα μέχρι 2%. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες AISI-SAE 304L και AISI-SAE 316L περιέχουν πολύ λίγο άνθρακα (< 0,03%), για να συγκολλούνται πιο εύκολα.

Εκτός από τους κοινούς ωστενιτικούς χάλυβες, υπάρχουν και οι λιγότερο ανθεκτικοί **μαγγανιούχοι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες** της σειρά ANSI 200, οι οποίοι περιέχουν Cr και Mn, καθώς και Ni σε σχετικά μικρή περιεκτικότητα. Υπάρχουν επίσης και οι **υπερωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες** με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε Ni (> 20%) και Mo (> 6%), για υψηλή αντοχή στην διάβρωση από οξέα, χλώριο και χλωριούχα διαλύματα. Ο χάλυβας AISI-SAE 904L (UNS N08904) είναι υπερωστενιτικός ανοξείδωτος (19–23% Cr, 23–28% Ni, 4–5% Mo) και περιέχει 1–2% χαλκό για υψηλή αντοχή σε όξινα αναγωγικά περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα το θειικό οξύ.



Εικόνα 2. Η προσθήκη νικελίου αυξάνει την σταθερότητα του ωστενίτη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα φάσης Fe-Cr [3].

- **Φερριτικοί και μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες**

Πρόκειται για ανοξείδωτους χάλυβες με κύρια φάση τον φερρίτη (α-Fe) ή τον μαρτενσίτη (μετασταθής φάση που προκύπτει με απότομη ψύξη του ωστενίτη). Περιέχουν 10,5–27% χρώμιο, αλλά ελάχιστο ή καθόλου νικέλιο (< 2%). Περιέχουν ωστόσο μολυβδαίνιο ή και τιτάνιο.

Οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες μετασχηματίζονται σε μαρτενσιτικούς με κατάλληλη θερμική κατεργασία («βαφή» με απότομη ψύξη). Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι πιο μαλακοί σε σύγκριση με τους αντίστοιχους ωστενιτικούς, και συνεπώς είναι πιο κατάλληλοι για μηχανουργικές κατεργασίες. Επίσης, οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να υποστούν σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Ένας τυπικός μαρτενσιτικός ανοξείδωτος χάλυβας περιέχει 12–14% Cr, 0,2–1% Mo,

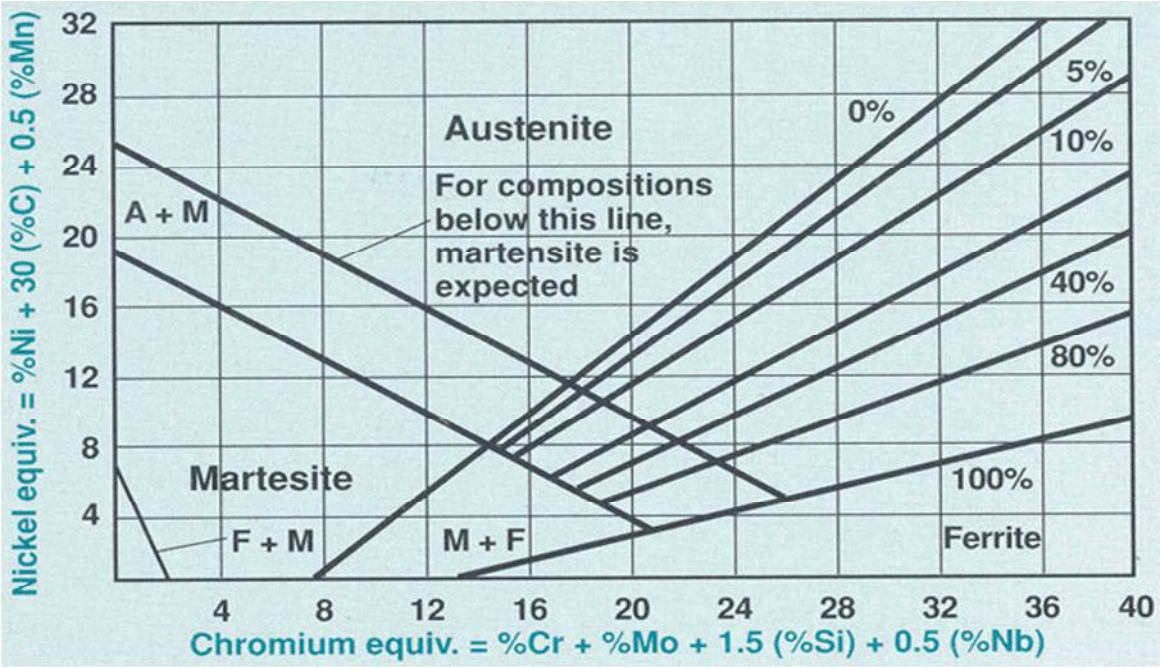
< 2.5% Ni και 0,1–1,2% C.

Οι φερριτικοί και οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες ανήκουν στην σειρά AISI-SAE 400, αλλά οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες που έχουν υποστεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση ανήκουν στην σειρά

AISI-SAE 600. Ο πλέον γνωστός ανοξείδωτος χάλυβας που έχει υποστεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι ο χάλυβας **17/4PH** (AISI-SAE 630), που περιέχει 15–17,5% Cr και 3–5% Ni.

- **<u>Διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες</u>**

Οι διφασικοί ή *ωστενοφερριτικοί* ανοξείδωτοι χάλυβες ή *ανοξείδωτοι χάλυβες διπλής φάσης* (**duplex**) περιέχουν ωστενίτη και φερρίτη σε αναλογία που κυμαίνεται από 50:50 έως 40:60. Συνήθως περιέχουν 19–28% Cr, < 5% Mo και λίγο Ni. Παρουσιάζουν εξίσου καλή αντοχή στην διάβρωση με τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, αλλά είναι πιο μαλακοί. Ο πιο κοινός ανοξείδωτος χάλυβας διπλής φάσης είναι ο AISI-SAE 2205 (UNS S31803/S32205).



<u>Εικόνα 3. Η κατάταξη ακατέργαστων ανοξείδωτων χαλύβων κατά Schäffler. Στον άξονα των *x* δίνονται τα κραματικά στοιχεία που ευνοούν τον σχηματισμό φερρίτη ως *ισοδύναμο Cr* (= (%Cr) + 1,5(%Si) + (%Mo) + 0,5(%Nb)) και στον άξονα των *y* δίνονται τα κραματικά στοιχεία που ευνοούν τον σχηματισμό ωστενίτη ως *ισοδύναμο Ni* (= (%Ni) + 0,5(%Mn) + 30(%C)). [2]</u>

1.5. ΧΑΛΥΒΔΟΣΩΛΗΝΕΣ & ΑΛΛΑ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ [3],[4],[5],[6]

Τα χαλυβουργεία παράγουν ημιτελή και τελικά προϊόντα χάλυβα. Τα ημιτελή προϊόντα χάλυβα είναι συνήθως δοκοί τετραγωνικής διατομής («μπιγιέτες») με ακμή περίπου 10 εκ. ή κυκλικής διατομής με διάμετρο περίπου 25 εκ. (κυλινδρικές «μπιγιέτες» ή «κορμοί») και μήκος μερικά μέτρα, ή ακόμα πλατιά πρίσματα (πλάκες ή «σλαμπ») διατομής 10 εκ. x 100 εκ. και με μήκος μερικών μέτρων. Η παραγωγή των ημιτελών προϊόντων γίνεται με συνεχή χύτευση σε μήτρες από χαλκό, που ψύχονται με νερό και με έλαση σε ειδικά έλαστρα.

Τα ημιτελή προϊόντα αναθερμαίνονται και υποβάλλονται σε έλαση, διέλαση, ολκή κ.λπ. για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, που μπορεί να είναι *πλατέα* ή *επιμήκη*. Τόσο τα πλατέα προϊόντα όσο και τα επιμήκη παράγονται με θερμή ή ψυχρή έλαση. Η θερμή έλαση γίνεται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 925 °C, οπότε οι παραμορφωμένοι κόκκοι του μετάλλου ανακρυσταλλώνονται. Η ψυχρή έλαση ωστόσο επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων με διαστάσεις πολύ πλησιέστερες στις τελικές διαστάσεις που θέλει ο καταναλωτής.

Τα πλατέα προϊόντα διακρίνονται σε πλάκες ή *χονδρές κατασκευαστικές λαμαρίνες* (αγγλ., plates), με πάχος 1 έως 20 εκ. για χρήση στην ναυπηγική, την οικοδομή, κ.ά., και σε *λεπτές λαμαρίνες* σε ρολά ή επίπεδα φύλλα (αγγλ. strips), με πάχος 0,1 έως 1 εκ. για την αυτοκινητοβιομηχανία, την βιομηχανία οικιακών συσκευών, την οικοδομή, κ.ά.

Τα επιμήκη προϊόντα μπορεί να είναι *ράβδοι* ή *χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος* (μπετόβεργα· αγγλ., reinforcing bars), *ελάσματα* ή *λάμες* (τσέρκι· αγγλ. narrow strips), *μορφοσίδηρος* (χάλυβας διαμορφωμένης διατομής, όπως γωνίες, ταυ, κ.λπ.· αγγλ. profiles), *κοίλες δοκοί* (αγγλ. hollow sections), ***σωλήνες με ή χωρίς ραφή*** (welded or seamless pipes-Εικόνα 4), κ.ά. Στα επιμήκη προϊόντα συμπεριλαμβάνεται και το *σύρμα* (αγγλ. wire).

Εικόνα 4.Σωληνώσεις χάλυβα σε Βιομηχανία (Φωτογραφία από SAMSUN Combine Cycle Power Plant, Turkey).

Εκτός από τα πλατέα και τα επιμήκη προϊόντα, ο χάλυβας διατίθεται ακόμα στην μορφή χυτής χελώνας (χυτοχάλυβας). Πολλές χαλυβουργίες διαθέτουν φύλλα ή ρολούς επιψευδαργυρωμένου (γαλβανισμένου), επικασσιτερωμένου και επιχρωματισμένου χάλυβα.

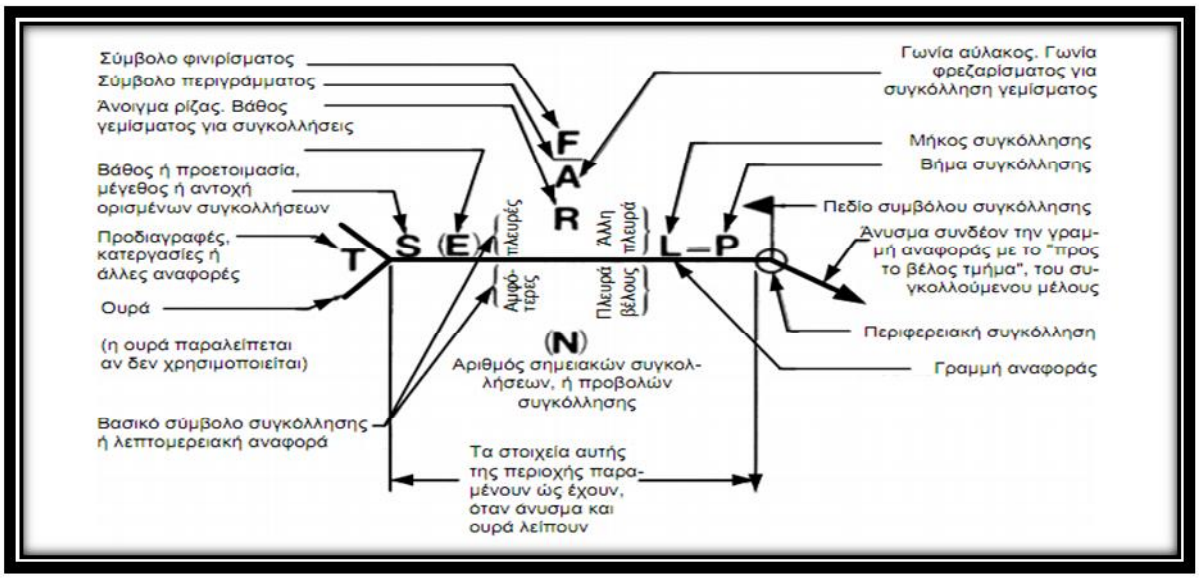
2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ [8],[9]

ΓΕΝΙΚΑ [8]

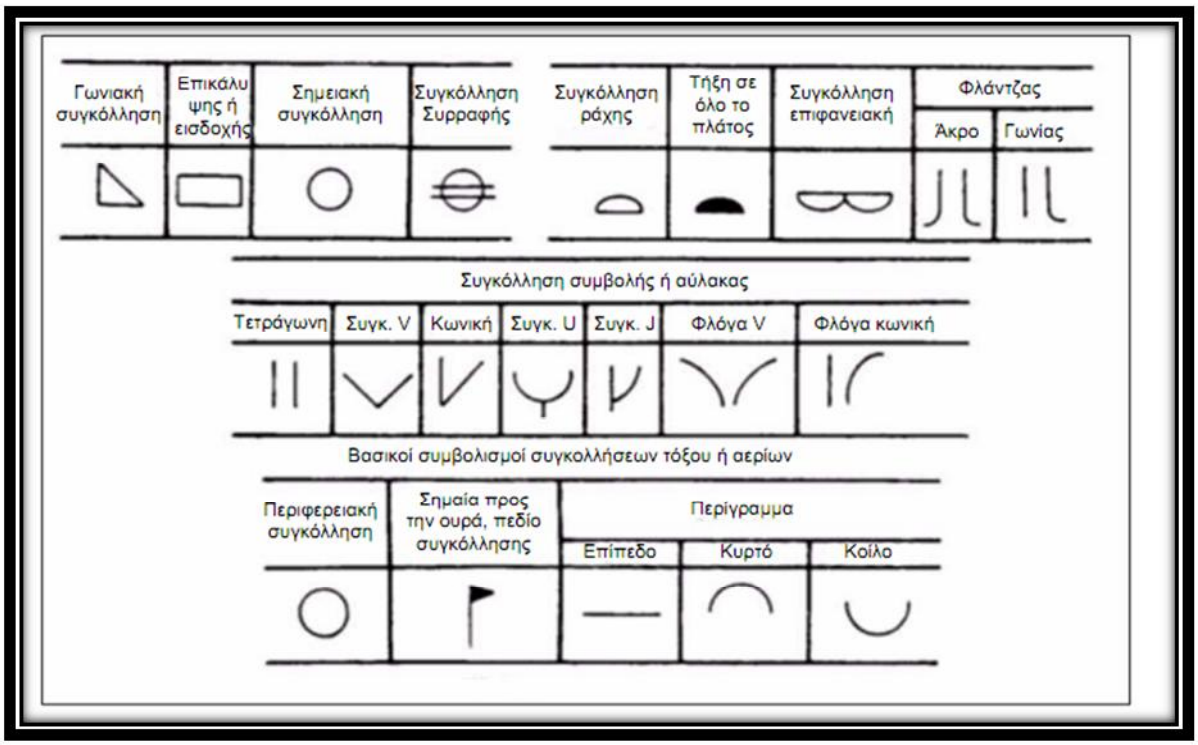
Συγκόλληση είναι η διαδικασία της μόνιμης τοπικής ένωσης μεταλλικών μερών σε ημιτετηγμένη μορφή με εφαρμογή πίεσης ή την ένωση των μερών σε κατάσταση τήξης. Η συγκόλληση είναι ο φθηνότερος και ο πλατύτερα χρησιμοποιούμενος τρόπος σύνδεσης στις κατασκευές.

Συμβολισμός συγκολλήσεων

Η τυποποίηση στο συμβολισμό των συγκολλήσεων στο μηχανολογικό σχέδιο, βοηθά στην σαφέστερη επικοινωνία μεταξύ του σχεδιαστή και κατασκευαστή μηχανικού. Στην εικόνα 5, φαίνεται η τυποποίηση της AWS (American Welding Society) στο συμβολισμό των συγκολλήσεων, η οποία χρησιμοποιείται και στην Ευρώπη με ελάχιστες διαφορές. Στην εικόνα 6 παρατίθενται μερικά βασικά και συμπληρωματικά σύμβολα συγκολλήσεων τόξου ή αερίου.
Η γραμμή αναφοράς του συμβολισμού συγκολλήσεων περιγράφει τον τύπο της συγκόλλησης, τη θέση της, τις διαστάσεις της, το περίγραμμά της και άλλες συμπληρωματικές πληροφορίες. Κάθε συγκόλληση όπως υποδεικνύεται από τον συμβολισμό της, έχει πάντα μια πλευρά “προς το βέλος” και μια προς την “άλλη της πλευρά”. Ως εκ τούτου, οι όροι πλευρά βέλους, άλλη πλευρά και αμφότερες πλευρές (Εικόνα 5) χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συγκόλλησης σε σχέση με την σύνδεση.
Η ουρά του συμβόλου χρησιμοποιείται για την υπόδειξη των διαδικασιών συγκόλλησης και κοπής καθώς επίσης και των προδιαγραφών, του πρωτοκόλλου ή των συμπληρωματικών πληροφοριών που θα χρειαστούν κατά τη συγκόλληση. Οι πληροφορίες αυτές αναγράφονται στην ουρά του συμβόλου και λαμβάνονται υπ΄όψη από το συγκολλητή.
Ο συμβολισμός των συγκολλήσεων αποτελείται από τα ακόλουθα οκτώ μέρη: 1) τη γραμμή αναφοράς, 2) το βέλος, 3) τα βασικά σύμβολα των συγκολλήσεων, 4) τις διαστάσεις και άλλα στοιχεία, 5) τα συμπληρωματικά στοιχεία, 6) τα σύμβολα φινιρίσματος, 7) την ουρά, και 8) τις προδιαγραφές, κατεργασίες ή άλλες αναφορές.



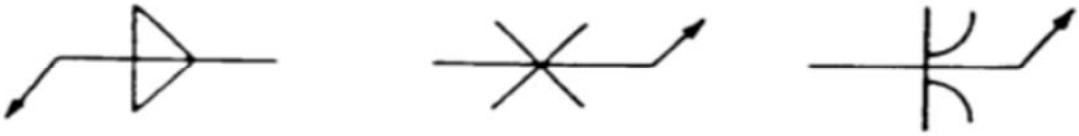
Εικόνα 5. Συμβολισμός Συγκολλήσεων AWS [8]



Εικόνα 6. Βασικά και συμπληρωματικά σύμβολα συγκολλήσεων τόξου ή αερίου [8]

Εικόνα 7. Πλευρά ανύσματος: Το σύμβολο κάτω από τη γραμμή αναφοράς δείχνει τη μορφή της συγκόλλησης και ότι θα τοποθετηθεί στη πλευρά του βέλους. [8]

Εικόνα 8. Άλλη πλευρά: Το σύμβολο πάνω από τη γραμμή αναφοράς δείχνει τη μορφή της συγκόλλησης και ότι θα τοποθετηθεί στη άλλη πλευρά από αυτή του βέλους [8]



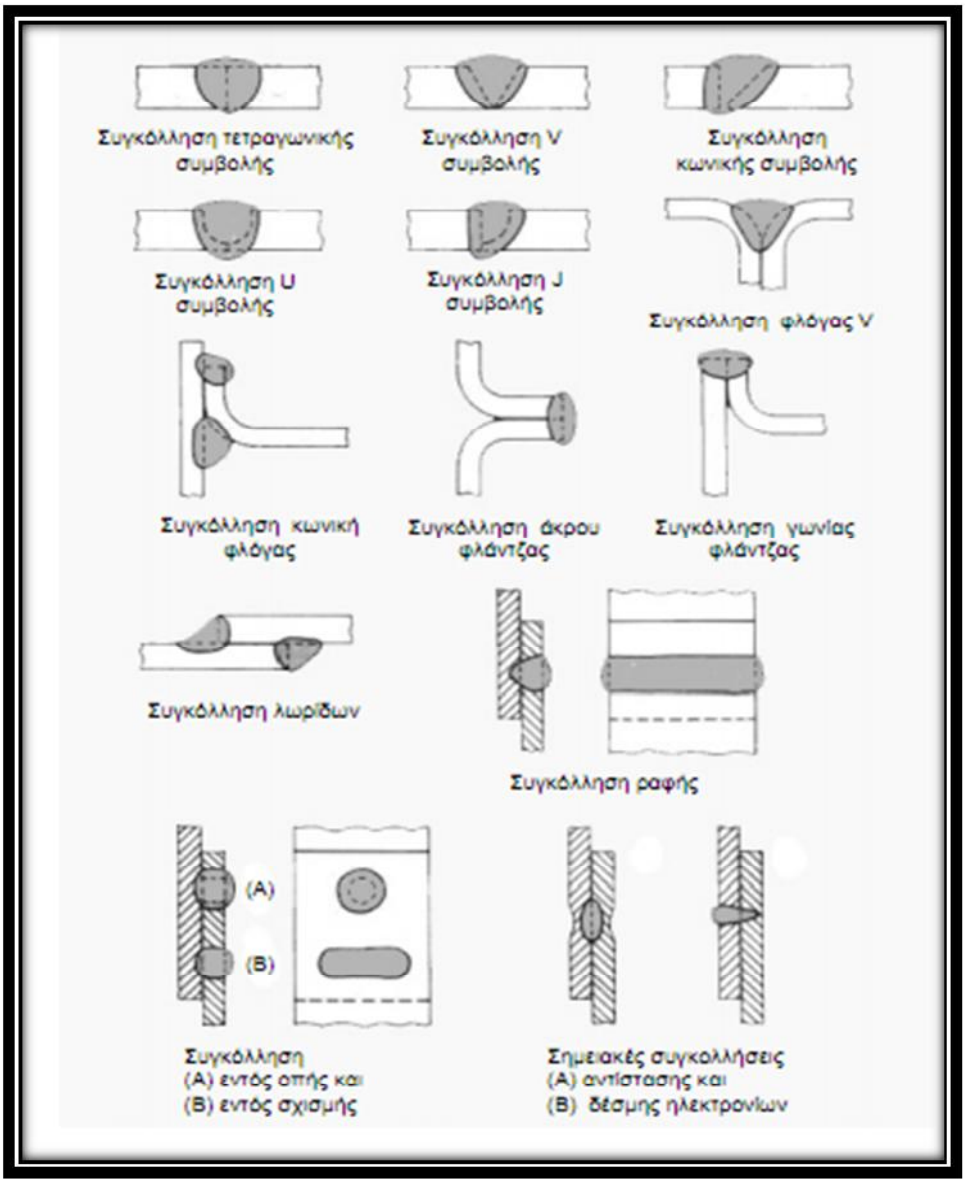
Εικόνα 9. Δύο πλευρές: Το σύμβολο πάνω και κάτω από τη γραμμή αναφοράς δείχνει τη μορφή της συγκόλλησης και ότι θα τοποθετηθεί και στις δυο πλευρές [8]

2.1. ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ [8]

Πέντε είναι οι βασικοί τύποι συγκόλλησης μεταλλικών τεμαχίων:

a. Συγκολλήσεις Συμβολής
b. Συγκολλήσεις Επικάλυψης
c. Συγκολλήσεις Ταυ
d. Γωνιακές Συγκολλήσεις
e. Συγκολλήσεις άκρων

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθενται οι παραπάνω τύποι συγκόλλησης.



Εικόνα 10. Βασικοί τύποι συγκόλλησης [8]

2.2. ΚΥΡΙΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ [9]

Οι τρεις βασικές μέθοδοι συγκολλήσεων είναι οι εξής:

- Η συγκόλληση τόξου
- Η συγκόλληση αερίου
- Η συγκόλληση αντίστασης.

Από τις τρεις μεθόδους η **συγκόλληση τόξου** καλύπτει τη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών στο βιομηχανικό πεδίο (Εικόνα 11).

Εικόνα 11. Συγκόλληση σωλήνωσης με την μέθοδο GTAW [9]

Στον τομέα της κατασκευής δικτύων σωληνώσεων οι μέθοδοι συγκόλλησης που παρατηρούνται κατά κύριο λόγο είναι οι εξής:

- Συγκόλληση Τόξου με Αναλώσιμο Ηλεκτρόδιο-SMAW ή MMAW (Χρησιμοποιείται κατά κόρον στην συγκόλληση σωληνώσεων μικρών διαμέτρων καθώς και στην γέμιση της συγκόλλησης ενώ έχει προηγηθεί η επίστρωση ρίζας με τις παρακάτω μεθόδους αδρανούς αερίου)
- Ημιαυτόματη Συγκόλληση Τόξου με Αναλώσιμο Μεταλλικό Ηλεκτρόδιο Παρουσία Αδρανούς Αερίου (GMAW) για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμοσφαιρική ρύπανση. (Εχει την μικρότερη χρηστικότητα από τις υπόλοιπες δυο μεθόδους)
- Συγκόλληση Τόξου με μη Αναλώσιμο Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου Παρουσία Αδρανούς Αερίου (GTAW) για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Η μέθοδος αυτή, όπως και η SMAW, έχει την μεγαλύτερη εφαρμογή στον βιομηχανικό τομέα των συγκολλήσεων

σωληνώσεων καθώς εξασφαλίζει άριστες και γρήγορες συγκολλήσεις ενώ υπερτερεί έναντι της ημιαυτόματης μεθόδου GMAW στο ότι δεν απαιτεί μεγάλο εξοπλισμό)

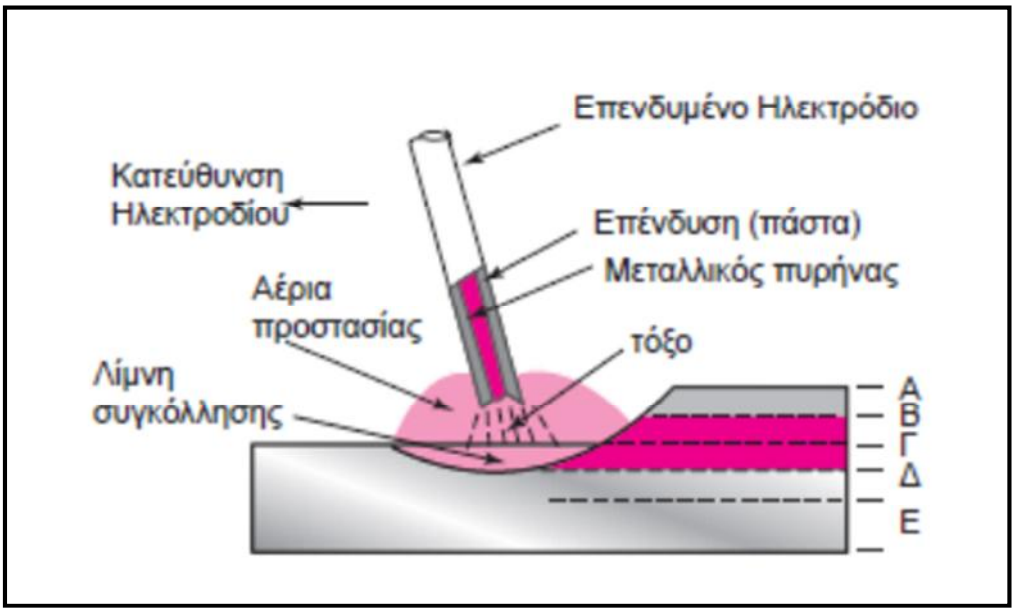
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συνιστώμενες μέθοδοι συγκόλλησης ανα υλικό και ανα τύπο συγκόλλησης:

			SMAW	SAW	Atomic hydrogen	MIG	TIG	ΦΛΟΓΑΣ	Σημειακή συγκόλληση	Διαμήκης συγκόλληση	Θερμική συγκόλληση	Οξυγονοκόλληση (οξυγόνο ασετυλίνη)	Χαλκοκόλληση (εστιας)	Χαλκοκόλληση (φλογας)
Βασισμένες στο υλικό	C10, C20		R	R	S	S	S	R	R	R	S	R	R	S
	C30, C50		R	R	S	S	S	R	R	S	S	R	R	S
	Ni-Cr, Χαλυβοκράματα		R	R	S	S	S	R	R		S	S	S	S
	Ανώτερα κράματα, Ανοξείδωτος χάλυβας,	**AISI-309**	R	R	R	R	R	R	R	R		S	S	S
		AISI-301												
		AISI-316												
	Ανοξείδωτος χάλυβας, AISI 405, 430		R	S	S	S	S	S	S	S		S	S	S
	Κράματα υψηλών θερμοκρασιών		R	S	S	S	S	S	S	R		S		
	Φαιός χυτοσίδηρος		S				"					R		R
	Κράματα αλουμινίου		S		S	R	R	S	R	S		S	R	R
	Κράματα Νικελίου		R	S	S	R	R	S	R	S		S	S	R
	Κράματα χαλκού					R	R	S	S			S	S	R
	Κράματα Τιτανίου						R	S	S					S
Βασισμένες στη σύνδεση	ΣΥΝΔΕΣΗ	**ΠΛΑΤΟΣ ΠΛΑΚΑΣ**												
	Συγκόλληση μετωπική	**0.125 - 3mm**	S	S	R		R					R		S
		πάνω από 3mm	R	R	S	R	S	R			R	S		S
	Συγκόλληση επικάλυψης	**0.125 - 3**	R	S	S		R		R	R		R	R	R
		πάνω από 3mm	R	R	S	R	S		R	R		S	R	R
	Συγκόλληση ραφής	**0.125 - 3**	R	S	S		R					R	R	R
		πάνω από 3mm	R	R	R	R	S					S	R	R
	Συγκόλληση άκρων	**0.125 - 3**			R		R			R		R		S
		πάνω από 3mm	R	S	S	S	S			R		S		S

Πίνακας 2. Συνιστώμενες Συγκολλητικές Διεργασίες βάσει υλικού και τύπου σύνδεσης (R:Συνιστώμενη-S:Ικανοποιητική-Κενό:Δεν συνιστάται) [8]

2.2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ (SMAW ή MMAW).[9]

Ένας από τους πιο κοινούς τύπους συγκολλήσεων τόξων είναι η Shielded Metal Arc Welding (SMAW), η οποία είναι επίσης γνωστή ως Manual Metal Arc Welding (MMAW) ή συγκόλληση ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει ένα τόξο μεταξύ του υπό συγκόλληση υλικού και της αναλώσιμης ράβδου ηλεκτροδίων, η οποία αποτελείται από χάλυβα και καθώς επικαλύπτεται με τη ροή (δημιουργία πάστας), παράγεται αέριο Κοβάλτιο το οποίο προστατεύει την περιοχή συγκόλλησης από οξείδωση και μόλυνση. Το ίδιο το ηλεκτρόδιο στην συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης ενεργεί ως υλικό πληρώσεως, καθιστώντας κάποιο άλλο υλικό πληρώσεως περιττό. Η διαδικασία είναι πολύ ευπροσάρμοστη καθώς η εφαρμογή της δεν απαιτεί υψηλή κατάρτιση των συγκολλητών και ο εξοπλισμός που απαιτεί είναι ιδιαίτερα ανέξοδος. Εντούτοις, οι χρόνοι συγκόλλησης είναι μάλλον αργοί, δεδομένου ότι τα αναλώσιμα ηλεκτρόδια πρέπει να αντικατασταθούν συχνά και επειδή υφίσταται σκουριά, το υπόλειμμα από τη ροή, χρειάζεται μετά το πέρας της συγκόλλησης την απομάκρυνση από το σημείο. Η διαδικασία περιορίζεται γενικά στην ένωση των σιδηρούχων υλικών, αν και τα ηλεκτρόδια ειδικότητας έχουν καταστήσει πιθανή τη συγκόλληση χυτοσίδηρου, νικελίου, αλουμινίου, χαλκού, και άλλων μετάλλων.



Α: Επιφανειακή κρούστα σκουριάς
Β: Ενίσχυση συγκόλλησης
Γ: Διείσδηση
Β+Γ: Εναπόθεση μετάλλου (Μέταλλο Συαγκόλλησης)
Δ: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
Ε: Βασικό μέταλλο

Εικόνα 12.Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης τόξου με αναλώσιμο ηλεκτρόδιο (SMAW-MMAW) [9]

2.2.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΑΕΡΙΟΥ (GMAW). [9]

Η συγκόλληση τόξων μετάλλων (GMAW) παρουσία αδρανούς αερίου, είναι μια ημιαυτόματη ή αυτόματη διαδικασία συγκόλλησης που χρησιμοποιεί μια συνεχή πηγή συρμάτων ως ηλεκτρόδιο και ένα αδρανές ή ημι-αδρανές προστατευτικό αέριο (κυρίως Argon) για να προστατεύσει τη συγκόλληση από τη ατμοσφαιρική κυρίως μόλυνση. Οι σχετικά υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης GMAW οφείλονται κυρίως στην αυτόματη τροφοδότηση σύρματος ηλεκτροδίου μέσω ενός μοχλού ελέγχου, αλλά επειδή απαιτεί περισσότερο εξοπλισμό από την απλούστερη διαδικασία SMAW, είναι λιγότερο ευπροσάρμοστη. Η συγκόλληση GMAW εφαρμόστηκε αρχικά για την συγκόλληση αλουμινίου και άλλων μη σιδηρούχων υλικών ενώ τη δεκαετία του 40’ εφαρμόστηκε και σε χάλυβες καθώς υπερτερούσε έναντι των άλλων τεχνικών στον τομέα της ταχύτητας συγκόλλησης. Σήμερα, η μέθοδος GMAW χρησιμοποιείται συνήθως στις αυτοκινητοβιομηχανίες όπου προτιμάται για τη μεταβλητότητα και την ταχύτητά της. Παρόλα αυτά, επειδή χρησιμοποιεί ένα προστατευτικό αέριο, χρησιμοποιείται σπάνια σε υπαίθριους χώρους ή στους σε περιοχές που υφίσταται αστάθεια του αέρα.

ΑΕΡΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ:

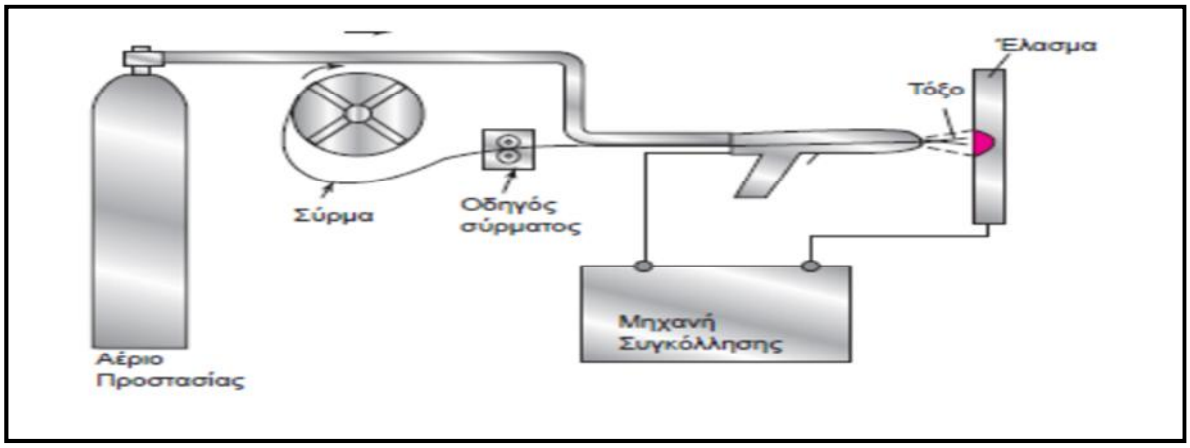
1. **ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ:**
   - Αργό για μικρά πάχη (Μέχρι 25 mm).
   - Μίγμα 75% He + 25% Ar για πάχη από 25 mm μέχρι 76 mm.
   - 90% He +10% Ar για πολύ μικρά πάχη.

2. **ΜΑΛΑΚΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ:**
   - Μίγμα Ar+5% O_2
   - Για μεταφορά με βύθιση Ar+25% CO_2 για μεγαλύτερα πάχη ή σκέτο CO_2 για μεγαλύτερη διείσδυση.

3. **ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ:**
   - Μίγμα Αργού με 1-2% O_2
   - Για μεταφορά με βύθιση μίγμα 90% He +7,5% Ar+ 2,5% CO_2.

ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ:

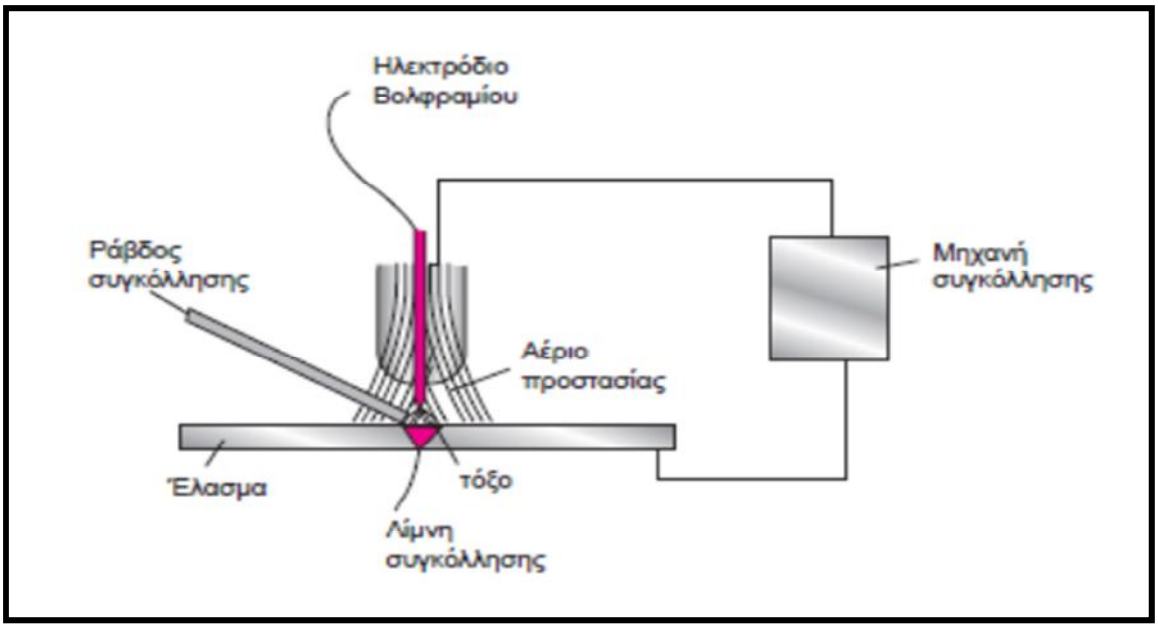
Τα συμπαγή ηλεκτρόδια, για συγκόλληση τέτοιου είδους με προστασία αδρανούς αερίου έχουν συνήθως την ίδια περίπου χημική σύσταση με το προς κόλληση μέταλλο. Όταν όμως το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ενεργό τότε είναι απαραίτητη η προσθήκη αντιοξειδωτικών στο κράμα του ηλεκτροδίου. Οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες διάμετροι ηλεκτροδίου κυμαίνονται μεταξύ 1,02 και 1,59 mm αλλά υπάρχουν ηλεκτρόδια μικρότερων (μέχρι 0,5 mm) και μεγαλύτερων (μέχρι 3,18 mm) διαμέτρων.



Εικόνα 13. Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης με την μέθοδο GMAW [9]

2.2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΜΗ ΑΝΑΛΩΣΙΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΑΔΡΑΝΟΥΣ ΑΕΡΙΟΥ (GTAW).

Πρόκειται για μια αυτογενή διαδικασία συγκόλλησης, η οποία δεν απαιτεί καλώδιο γεμίσματος, παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η πηγή θερμότητας είναι ένα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ ενός αναλώσιμου ηλεκτροδίου από βολφράμιο και της επιφάνειας εργασίας. Το ρεύμα που χρησιμοποιούμε σε αυτού του τύπου τις συγκολλήσεις είναι συνεχές. Η θερμοκρασία του τόξου λιώνει το ηλεκτρόδιο και το μέταλλο της επιφάνειας εργασίας, ενώ η συγκόλληση προστατεύεται από ένα αέριο μίγμα από αργό και ήλιο.



Εικόνα 14.Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης με την μέθοδο GTAW.[9]

ΑΕΡΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

- Αργό (Ατομικό Βάρος 40): Είναι το συνηθέστερο λόγω χαμηλής τιμής και απαιτεί μικρή σχετική παροχή επειδή είναι 1,33 φορές βαρύτερο του αέρα.
- Ήλιο (Ατομικό Βάρος 4): Χρησιμοποιείται κυρίως στις ΗΠΑ. Απαιτεί μεγάλη ισχύ τόξου και προκαλεί μεγαλύτερη διείσδυση γι αυτό χρησιμοποιείται σε παχιά ελάσματα.

ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

- Καθαρού Βολφραμίου.
- Βολφραμίου με 1-2% Θόριο.
- Βολφραμίου με 0,15-0,40% Ζιρκόνιο.
- Καθαρού Βολφραμίου με εξωτερικό λεπτό κέλυφος από κράμα Βολφραμίου με 1-2% Θόριο.

Τα ηλεκτρόδια διατίθενται στην αγορά με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διάμετροι: 0,25-6,35 mm.
- Μήκη: 76-610 mm.

3 Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ [10],[11],[12]

Διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη ηλεκτροχημική ή χημική αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων ή κραμάτων, η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού. Η διάβρωση οφείλεται στις ηλεκτροχημικές ή χημικές αντιδράσεις του μετάλλου ή του κράματος με το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει. Το περιβάλλον μπορεί να είναι φυσικό π.χ. θάλασσα, ύπαιθρος ή τεχνητό π.χ. εργαστηριακοί η βιομηχανικοί χώροι.

Σαν χημική διάβρωση θεωρείται η χημική αντίδραση του μετάλλου (ή κράματος) με στοιχεία του περιβάλλοντος (χωρίς να απαιτείται μεταφορά ηλεκτρονίων. Η ηλεκτροχημική διάβρωση είναι συνυφασμένη με τη μεταφορά ηλεκτρονίων και είναι η συνηθέστερη περίπτωση. Η διαδικασία της ηλεκτροχημικής διάβρωσης εξηγείται με την θεωρία των μικτών δυναμικών που εξηγείται στην συνέχεια.

Πριν την ανάπτυξη της θεωρίας των μικτών δυναμικών είναι σκόπιμο να εξετασθούν οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στην διάβρωση. Αυτό είναι σημαντικό διότι εάν ο σχεδιασμός μίας κατασκευής γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε οι παράγοντες που ευνοούν την διάβρωση να έχουν αποφευχθεί τότε η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής είναι μικρή.

3.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ [13],[14],[15]

Ακόμα και οι ανοξείδωτοι χάλυβες παθαίνουν διάβρωση. Μόνον που στην περίπτωση των ανοξείδωτων χαλύβων, η διάβρωση μπορεί να μην δημιουργεί την εμφανή σκουριά που παρατηρείται στην επιφάνεια των κοινών χαλύβων. Οπότε τα αποτελέσματα της διάβρωσης των ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να είναι ξαφνικά και με καταστρεπτικές συνέπειες. Η διάβρωση των ανοξείδωτων χαλύβων συμβαίνει κατά πολλούς τρόπους:

i. Μικροδιάβρωση

Η μικροδιάβρωση ή διάβρωση με βελονισμό ή τρηματική διάβρωση (αγγλ., pitting) συμβαίνει όταν ο ανοξείδωτος χάλυβας εκτίθεται σε περιβάλλον από το οποίο λείπει το οξυγόνο ή σε περιβάλλον όπου άλλα ιόντα ανταγωνίζονται τοοξυγόνο ως οξειδωτικό μέσο. Έτσι, π.χ. όταν ένας ανοξείδωτος χάλυβας εκτίθεται σε χλωριούχα διαλύματα, το προστατευτικό στρώμα του Cr2O3 καταστρέφεται από τα ανιόντα Cl– με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικροσκοπικές εσοχές στην επιφάνεια του χάλυβα. Οι εσοχές μπορεί να εξελιχθούν σε ρωγμές που, υπό κάποια σχετικά χαμηλή καταπόνηση, αναπτύσσονται με μεγάλη ταχύτητα με καταστρεπτικά αποτελέσματα.
Μικροδιάβρωση παρατηρείται συχνά και σε κοιλότητες ή συγκολλήσεις εξαρτημάτων από ανοξείδωτο χάλυβα. Σ' αυτή την περίπτωση γίνεται λόγος για διάβρωση κοιλοτήτων, σπηλαιώδη διάβρωση ή διάβρωση διαχωριστικών επιφανειών (αγγλ., crevice corrosion). Η διάβρωση κοιλοτήτων μπορεί να είναι έντονη ακόμα και σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία.

ii. Περικρυσταλλική διάβρωση

Η περικρυσταλλική διάβρωση (αγγλ., intergranular corrosion) συμβαίνει όταν ο ανοξείδωτος χάλυβας θερμανθεί και σχηματιστούν καρβίδια του χρωμίου ((Fe,Cr)7C3, κ.ά.ό.) γύρω από τους κρυστάλλους του

κράματος. Τα καρβίδια αυτά αντικαθιστούν το οξείδιο του χρωμίου και έτσι ο χάλυβας χάνει την προστασία του. Η περικρυσταλλική διάβρωση εξαρτάται από την περιεκτικότητα του κράματος σε άνθρακα. Ανοξείδωτοι χάλυβες με 0,06% C παθαίνουν περικρυσταλλική διάβρωση μέσα σε 2 λεπτά στους 700°C-αντιθέτως, ανοξείδωτοι χάλυβες με 0,02% C δεν παθαίνουν περικρυσταλλική διάβρωση. Περιρυσταλλική διάβρωση παρατηρείται και μετά την συγκόλληση ανοξείδωτων χαλύβων εξαιτίας τοπικής υπερθέρμανσης του κράματος.
Η περικρυσταλλική διάβρωση μπορεί να αναστραφεί με θέρμανση του κράματος στους 1000°C, διαλυτοποίηση των καρβιδίων του χρωμίου και απότομη ψύξη («βαφή»). Ανοξείδωτοι χάλυβες που περιέχουν τιτάνιο, νιόβιο ή ταντάλιοπαρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην περικρυσταλλική διάβρωση.

iii. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking Effect)

Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρουσιάζεται εκτενώς σε έτερο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας. Συνοπτικά, η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση ή δυναμοδιάβρωση ή εργοδιάβρωση (αγγλ., stress corrosion cracking) είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που παρατηρείται όταν ο ανοξείδωτος χάλυβας βρίσκεται υπό μηχανική καταπόνηση σε διαβρωτικό περιβάλλον, όπως, π.χ. εντός χλωριούχων διαλυμάτων. Χάλυβες ψυχρής έλασης είναι πιο ευαίσθητοι στην διάβρωση με μηχανική καταπόνηση, εξαιτίας υπολειπομένων τάσεων. Με ανόπτηση, οι υπολειπόμενες τάσεις εξαφανίζονται και ο χάλυβας ανακτά την διαβρωτική του αντοχή.

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση συνδέεται με την δημιουργία (ή απλώς την παρουσία) δομικών ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα του κράματος. Οι ατέλειες αυτές απλώνονται μέχρι την επιφάνεια του κράματος με αποτέλεσμα την τοπική φθορά του προστατευτικού οξειδίου Cr_2O_3, την δημιουργία ρωγμών και την τελική αστοχία του κράματος.

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες AISI-SAE 304 και AISI-SAE 316 αστοχούν εύκολα λόγω διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση σε διαλύματα που περιέχουν ελάχιστα mg/L Cl^-, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 50°C. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο (> 6%) ή νικέλιο, οι φερριτικοί και οι διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή στην διάβρωση με μηχανική καταπόνηση.

iv. Ηλεκτροχημική διάβρωση

Η ηλεκτροχημική ή γαλβανική διάβρωση (αγγλ., galvanic corrosion) συμβαίνει όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή το ένα με το άλλο. Τότε δημιουργείται ένα τοπικό γαλβανικό στοιχείο με αποτέλεσμα την διάβρωση του πιο ηλεκτροθετικού μετάλλου. Εάν, για παράδειγμα, επάνω στην επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα βρεθούν λίγα ψήγματα κοινού χάλυβα, αυτά θα αρχίσουν να οξειδώνονται λόγω ηλεκτροχημικής διάβρωσης, και στην συνέχεια η διάβρωση μπορεί να επεκταθεί και στην επιφάνεια του ανοξείδωτου χάλυβα. Στην περίπτωση αυτή γίνεται λόγος και για διάβρωση εξ επαφής (αγγλ., contact corrosion). Η διάβρωση εξ επαφής εμποδίζεται με κατάλληλο καθαρισμό του κράματος με νιτρικό ή υδροφθορικό οξύ.

v. Άλλες μορφές διάβρωσης

Ο ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να υποστεί και άλλες μορφές διάβρωσης, όπως η ερύθρωση (αγγλ., rouging) όταν βρίσκεται σε επαφή με υπερκαθαρό νερό, μηχανοχημική διάβρωση (εργοδιάβρωση λόγω σουλφιδίων) όταν βρίσκεται σε επαφή με υδρόθειο (H_2S) σε θερμοκρασία 60–100°C, κ.λπ.

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ [11],[12]

Η αντιδιαβρωτική προστασία μιας μεταλλικής κατασκευής αρχίζει από τον σχεδιασμό της. Ο σχεδιασμός πρέπει να φροντίζει ώστε οι παράγοντες που ευνοούν την διάβρωση να έχουν ελαχιστοποιηθεί. Πολλές φορές όμως αυτό δεν αρκεί. Επομένως πρέπει να ληφθούν μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας. Τα μέτρα της αντιδιαβρωτικής προστασίας εξαρτώνται από το είδος του μετάλλου ή κράματος και το περιβάλλον του. Στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών κτιρίων τα μέταλλα είναι χάλυβας, αλουμίνιο κατά κύριο λόγο και χαλκός. Το περιβάλλον είναι το ατμοσφαιρικό (φυσικό ή τεχνητό). Τα μέτρα προστασίας τα οποία λαμβάνονται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η επικάλυψη με ανόργανες ή οργανικές επικαλύψεις.

Όσον αφορά το αλουμίνιο η αντιδιαβρωτική του προστασία εξειδικεύεται με την μέθοδο της ανοδικής οξείδωσης (ανόργανη επικάλυψη) ή με την μέθοδο της ηλεκτροστατικής βαφής (οργανική επικάλυψη).

Όσον αφορά τον χάλυβα δύο είναι οι συνηθισμένοι μέθοδοι προστασίας. Η πρώτη μέθοδος είναι η ανόργανη επικάλυψη με ψευδάργυρο. Η δεύτερη είναι η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων (βερνίκια ή χρώματα). Δεν αποκλείεται όμως και ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων. Δηλαδή να προηγηθεί επιψευδαργύρωση και να ακολουθήσει η επικάλυψη με οργανικές επικαλύψεις. Και στις δύο περιπτώσεις πριν την εφαρμογή των επιστρωμάτων (οργανικών ή ανόργανων) πρέπει απαραιτήτως να έχει προηγηθεί η προκατεργασία της επιφάνειας του χάλυβα ώστε αυτός να μην έχει οξείδια, λίπη, λάδια ή άλλες ουσίες οι οποίες παρεμποδίζουν την επικάλυψη.

1. Προκατεργασία της Επιφάνειας

Οι επιφάνειες του χάλυβα που πρόκειται να προστατευθούν πρέπει να έχουν καθαρισθεί επιμελώς από οξείδια, λίπη, έλαια, παλαιότερες βαφές και γενικά από κάθε ουσία η οποί μπορεί να ελαττώσει την συνάφεια του χάλυβα με την αντιδιαβρωτική επικάλυψη. Ο καθαρισμός της επιφάνειας μπορεί να γίνει με μηχανικό (συρματόβουρτσες, δίσκοι με γυαλόχαρτα, αμμοβολή) ή με χημικό τρόπο. Ο χημικός τρόπος περιλαμβάνει τον εμβαπτισμό του μετάλλου ή κράματος σε κατάλληλο λουτρό ή λουτρά ώστε η επιφάνεια να καθαρισθεί πλήρως.

Συνήθως για μικρές επιφάνειες ο καθαρισμός γίνεται με μηχανικό τρόπο (συρματόβουρτσες, γυαλόχαρτα) ενώ για μεγάλες επιφάνειες γίνεται αμμοβολή. Η αμμοβολή γίνεται με εκτόξευση ειδικών άμμων στην επιφάνεια του μετάλλου με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα και ειδικών επιστομίων. Ανάλογα την κοκκομετρία της άμμου επιτυγχάνεται διαφορετικό αποτέλεσμα. Η όλη διαδικασία της αμμοβολής χαρακτηρίζεται από σημαντικά προβλήματα υγιεινής και ασφάλειας αλλά και από προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένα συνεργεία.

Ο χημικός καθαρισμός της επιφάνειας γίνεται με εμβάπτιση σε ειδικά λουτρά συνήθως από οξέα (υδροχλωρικό οξύ) όπου το χαλύβδινο στοιχείο παραμένει κάποιο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το απαιτούμενο βάθος καθαρισμού. Δεν αποκλείεται η εμβάπτιση και σε δεύτερο λουτρό ανάλογα το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα.

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι η εμβάπτιση σε διάλυμα φωσφορικού οξέως όπου πραγματοποιείται η λεγόμενη φωσφάτωση, κατά την οποία η επιφάνεια του χάλυβα καλύπτεται από λεπτό στρώμα φωσφορικών ενώσεων. Το λεπτό αυτό στρώμα συνεισφέρει σημαντικά στην πολύ καλή συνάφεια χάλυβα και επιστρώματος.

Η επιφάνεια του χάλυβα μετά τον καθαρισμό είναι ευαίσθητη στην διάβρωση. Για τον λόγο αυτό μετά τον καθαρισμό σε σύντομο χρονικό διάστημα πρέπει να ακολουθήσει η επιψευδαργύρωση ή η κάλυψη με κάποιο οργανικό επίστρωμα. Πολλές φορές μετά τον καθαρισμό εφαρμόζεται ένα πρώτο χέρι χρώματος (αστάρι) που προστατεύει ικανοποιητικά τον χάλυβα για τον χρόνο αποθήκευσης μέχρι την τοποθέτηση του και στην συνέχεια μετά την τοποθέτηση εφαρμόζονται ακόμη δύο χέρια χρώματος.

2. Επιψευδαργύρωση ή Γαλβανισμός

Η επιψευδαργύρωση ή γαλβανισμός γίνεται μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας του χάλυβα με εμβάπτιση σε λουτρό λειωμένου ψευδαργύρου (θερμοκρασία υψηλότερη από τους 520 ^{o}C. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα (πάχους 5-15 μm) από κράμα σιδήρου-ψευδαργύρου πάνω από το οποίο σχηματίζεται στρώμα καθαρού ψευδαργύρου. Ανάλογα τον χρόνο εμβάπτισης μεταβάλλεται και το πάχος του στρώματος ψευδαργύρου.

Γενικά το πάχος του ψευδαργύρου δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 80 μm ενώ για διαβρωτικότερα περιβάλλοντα μπορεί να φθάσει τα 180 μm.

Εκτός της εν θερμώ επιψευδαργύρωσης ή γαλβανισμού υπάρχει η μέθοδος της επικάλυψης της επιφάνειας του χάλυβα με εξάχνωση ψευδαργύρου υπό κενό. Στην μέθοδο αυτή ο χάλυβας δεν θερμαίνεται.

Πολλές φορές ο χάλυβας καλύπτεται μετά τον καθαρισμό με χρώμα (αστάρι) που περιέχει σκόνη ψευδαργύρου. Η μέθοδος αυτή συχνά ονομάζεται «ψυχρό γαλβάνισμα». Στην πραγματικότητα όμως η μέθοδος αυτή συμπεριλαμβάνεται στην μέθοδο με οργανικές επικαλύψεις.

3. Βαφή με Οργανικές Επικαλύψεις ή Χρώματα

Εναλλακτική λύση στην επιψευδαργύρωση ή γαλβανισμό αποτελεί η βαφή με οργανικές επικαλύψεις ή χρώματα. Βασικά η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός χεριού από χρώμα που ονομάζεται αστάρι ή πράϊμερ. Στην συνέχεια εφαρμόζονται δύο χέρια χρώματος. Όπως ήδη έχει λεχθεί μπορεί το αστάρι να έχει εφαρμοσθεί στο εργοστάσιο των χαλύβδινων εξαρτημάτων και τα υπόλοιπα δύο χέρια χρώματος μπορούν να γίνουν στο εργοτάξιο. Ακόμη υπενθυμίζεται ότι η κάλυψη με αστάρι που περιέχει σκόνη ψευδαργύρου στην πράξη ονομάζεται «ψυχρό γαλβάνισμα». Και αυτό το αστάρι πρέπει να καλυφθεί με δύο χέρια χρώματος.

Τονίζεται ότι συχνά τα χρώματα απαιτείται να καλύψουν τόσο την αντιδιαβρωτική προστασία όσο και την καλή αισθητική εμφάνιση. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή των χρωμάτων πρέπει να είναι ιδιαίτερα επιμελημένη.

Ακόμη πρέπει να λεχθεί ότι τα χρώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα χρώματα ενός συστατικού
- Τα χρώματα δύο συστατικών.

Τα χρώματα ενός συστατικού ευρίσκονται σε ένα μόνο δοχείο. Κατά την εφαρμογή τους μπορεί να αραιωθούν από κατάλληλο διαλυτικό. Ο σχηματισμός του στερεού στρώματος χρώματος πραγματοποιείται με εξάτμιση των διαλυτικών. Αντίθετα τα χρώματα δύο συστατικών ευρίσκονται σε δύο δοχεία. Το ένα περιέχει το καθεαυτό χρώμα και το δεύτερο το σκληρυντή. Για να εφαρμοσθεί το χρώμα απαιτείται ανάμιξη και των δύο δοχείων. Το χρώμα χωρίς το σκληρυντή δεν στεγνώνει. Μόλις τα δύο δοχεία αναμιχθούν το χρώμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εντός ορισμένου χρόνου, ο οποίος ανέρχεται στις 6 ώρες για τους 25 ^{o}C. Υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν τον χρόνο ενώ χαμηλότερες των αυξάνουν. Ο σχηματισμός του στερεού στρώματος του χρώματος πραγματοποιείται με χημική αντίδραση.

Μεταξύ των δύο κατηγοριών χρωμάτων υπάρχει σημαντική διαφορά ως προς την αντοχή στην διάβρωση και στην αντοχή σε επιδράσεις διαβρωτικών χημικών. Η αντοχή των χρωμάτων δύο συστατικών είναι σαφώς καλύτερη και πρέπει να προτιμώνται σε περιπτώσεις έντονου διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Η Επιλογή των Μέτρων Προστασίας

Προκειμένου να επιτευχθεί ο προβλεπόμενος χρόνος ζωής της κατασκευής πρέπει να γίνει μια σωστή επιλογή των μέτρων προστασίας. Η επιλογή των μέτρων προστασίας πρέπει να ακολουθεί τους ακόλουθους κανόνες:

- Η επιψευδαργύρωση παρουσιάζει καλή συμπεριφορά σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Σε υγρές κλιματολογικές συνθήκες πρέπει να προτιμάται η διπλή επιψευδαργύρωση.
- Σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα πρέπει να προτιμάται η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων.
- Σε ιδιαίτερα έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα .η όταν συνυπάρχουν και ατμοί οργανικών ενώσεων πρέπει να προτιμώνται χρώματα δύο συστατικών.

Πρέπει ακόμη να λεχθεί ότι η μέθοδος της αντιδιαβρωτικής προστασίας με οργανικές επικαλύψεις συνδυάζεται επιτυχώς με την πυροπροστασία με διογκούμενα χρώματα

4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ [10],[14],[15]

Διάβρωση των συγκολλήσεων των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.

Γενικά

Οι συγκολλήσεις των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων πολύ συχνά προσβάλλονται από τη διάβρωση. Η φύση της προσβολής αυτής είναι συνάρτηση του θερμικού ιστορικού της συγκόλλησης, της θερμοκρασίας και του περιβάλλοντος λειτουργίας και του επιπέδου των τάσεων (εφαρμοζόμενων και παραμενουσών). Τα είδη της διάβρωσης που συναντώνται συχνότερα στις συγκολλήσεις των ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων είναι τέσσερα :

- Εκλεκτική διάβρωση που σχετίζεται με κατακρημνίσματα μετάλλου συγκόλλησης
- Διάβρωση με βελονισμούς και διάβρωση χαραγής
- Περικρυσταλλική διάβρωση
- Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση.

Τέλος, υπάρχουν και άλλες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν τη διάβρωση των συγκολλήσεων των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων, όπως η κατακρήμνιση σ φάσης στη ΘΕΖ κ.λπ.
Τα παραπάνω θέματα εξετάζονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

Περικρυσταλλική διάβρωση

Η γνωστότερη μορφή διάβρωσης των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων είναι η ευαισθητοποίηση

(διάβρωση συγκόλλησης) που προκαλείται από την κατακρήμνιση καρβιδίων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Τέτοιες δομές είναι ευπαθείς στην περικρυσταλλική διάβρωση.

Ο μηχανισμός της περικρυσταλλικής διάβρωσης

Σε θερμοκρασίες πάνω από περίπου 1035 °C τα καρβίδια του Cr είναι πλήρως διαλυμένα στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Ωστόσο, όταν οι χάλυβες αυτοί ψύχονται αργά από τη θερμοκρασία αυτή ή όταν επαναθερμαίνονται σε εύρος 425 έως 815°C, τα καρβίδια του Cr κατακρημνίζονται στα όρια των κόκκων. Τα καρβίδια αυτά περιέχουν περισσότερο Cr από τη μήτρα.

Η κατακρήμνιση των καρβιδίων αττεμττλουτίζει από Cr τη μήτρα ττου βρίσκεται σε γειτνίαση με τα όρια των κόκκων. Ο ρυθμός διάχυσης του Cr στον ωστενίτη είναι αργός στη θερμοκρασία κατακρήμνισης. Γι'αυτό οι αττεμττλουτισμένες περιοχές δεν διαθέτουν Cr με αποτέλεσμα η μήτρα να γίνεται ευπαθής (ευαισθητοποιείται) σε περικρυσταλλική διάβρωση. Η ευαισθητοποίηση γίνεται επειδή οι απεμπλουτισμένες περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερο ρυθμό διάβρωσης από τη μήτρα σε διάφορα περιβάλλοντα διάβρωσης.
Σε κάθε περίπτωση τα κράματα βρίσκονται σε παθητική κατάσταση. Η διαφορά στο ρυθμό διάβρωσης των διαφορετικών περιοχών είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής περιεκτικότητας σε Cr. Σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις Cr το στρώμα της παθητικοποίησης καταστρέφεται με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διάβρωσης.
Αν οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες αποψυχθούν ταχέως κάτω από τους 425°C, δεν κατακρημνίζονται καρβίδια και οι χάλυβες είναι ανθεκτικοί σε περικρυσταλλική διάβρωση. Η επαναθέρμανση των κραμάτων σε θερμοκρασίες από 425 έως 815°C, για την χαλάρωση των τάσεων, προκαλεί κατακρήμνιση των καρβιδίων και συνεπώς ευαισθητοποίηση σε περικρυσταλλική διάβρωση. Ο μέγιστος ρυθμός κατακρήμνισης των καρβιδίων παρατηρείται στους 675°C, που αποτελεί συνήθη θερμοκρασία για την ανακούφιση των τάσεων των ανθρακούχων χαλύβων και των χαλύβων χαμηλής κραμάτωσης. Γι’αυτό θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην επιλογή των ανοξείδωτων που χρησιμοποιούνται σε ανόμοιες συγκολλήσεις που στη συνέχεια υποβάλλονται σε χαλάρωση τάσεων.
Η συγκόλληση είναι η συνηθέστερη αιτία ευαισθητοποίησης των ανοξείδωτων χαλύβων σε περικρυσταλλική διάβρωση. Αν και ο ρυθμός απόψυξης στη συγκόλληση και στο προσκείμενο μέταλλο βάσης είναι αρκετά υψηλός ώστε να αποφεύγεται η κατακρήμνιση των καρβιδίων, ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης φέρνει μέρος της ΘΕΖ σε θερμοκρασία κατακρήμνισης καρβιδίων. Έτσι κατακρημνίζονται καρβίδια σε κάποια απόσταση από τη συγκόλληση, οπότε αυτή η περιοχή γίνεται ευαίσθητη σε περικρυσταλλική διάβρωση. Σε λεπτά ελάσματα ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης μπορεί να είναι τέτοιος ώστε κανένα τμήμα της ΘΕΖ να μη γίνεται ευπαθές σε περικρυσταλλική διάβρωση.
Αν η κατακρήμνιση των καρβιδίων έχει συμβεί, μπορεί να αντιμετωπιστεί με επαναθέρμανση του κράματος σε θερμοκρασίες πάνω από 1035°C και ταχεία απόψυξη. Αυτή η θερμική κατεργασία διαλύει τα κατακρημνισμένα καρβίδια του Cr και αποκαθιστά σε Ο^την απεμπλουτισμένη περιοχή.

Μέτρα για την αποφυγή της περικρυσταλλικής διάβρωσης

Η ευπάθεια στην περικρυσταλλική διάβρωση των ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να αποφευχθεί με τον περιορισμό του περιεχόμενου άνθρακα ή με την προσθήκη στοιχείων των οποίων τα καρβίδια είναι

σταθερότερα από το Cr. Για τους περισσότερους ωστενιτικούς χάλυβες ο περιορισμός του άνθρακα σε ποσοστό έως 0.03% ή λιγότερο (σειρές L) εμποδίζει την ευαισθητοποίηση κατά τη συγκόλληση και τις περισσότερες θερμικές κατεργασίες. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν είναι αποτελεσματική για τον περιορισμό της ευαισθητοποίησης που προκύπτει από μακρόχρονη έκθεση του κράματος σε συνθήκες λειτουργίας 425 έως 815°C.

<u>Εκλεκτική διάβρωση που σχετίζεται με κατακρημνίσματα μετάλλου συγκόλλησης</u>

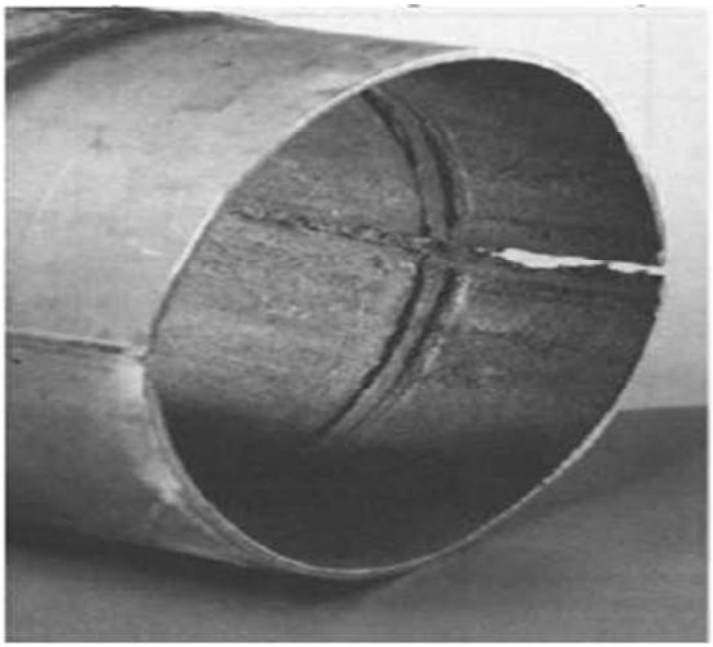
Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, τα σημαντικότερα κατακρημνίσματα του μετάλλου συγκόλλησης είναι δ-φερρίτης. σ-φάση και καρβίδια M23C6. Επίσης μπορεί να υπάρχουν μικρές ποσότητες καρβιδίου MSC. Η φάση σ χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράφει ένα φάσμα κατακρημνισμάτων, εμπλουτισμένων με Cr και Mo και περιλαμβάνει τις φάσεις χ και laves (η). Οι φάσεις αυτές ενδέχεται να κατακρημνίζονται κατευθείαν από το μέταλλο συγκόλλησης, αλλά ο πιο εύκολος τρόπος να σχηματιστούν είναι από δ-φερρίτη στο μέταλλο συγκόλλησης σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες που περιέχουν Mo. Ο δ-φερρίτης μετατρέπεται σε ψαθυρές μεσομεταλλικές (intermetallie) φάσεις, σαν τη σ και χ, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 500 έως 850 C0 για τη σ και 850 έως 950 C0 για την χ. Ο ρυθμός κατακρημνίσεως των φάσεων σ και χ αυξάνεται, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε Cr και Mo. Τα συνεχή περικρυσταλλικά δίκτυα μιας φάσης μειώνουν τη δυσθραυστότητα, την ελατότητα και την αντίσταση σε διάβρωση των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων.
Είναι εξαιρετικά δύσκολο να διακριθούν επακριβώς οι φάσεις σ και χ με τη χρήση συμβατικών οπτικών μεταλλογραφικών τεχνικών, ενώ απαιτείται η χρήση πιο περίπλοκων αναλυτικών τεχνικών προκειμένου να προσδιοριστεί η ταυτότητα της μιας ή της άλλης φάσης. Η κατακρήμνιση είτε της μιας είτε της άλλης φάσης απομειώνει την περιβάλλουσα μήτρα από σημαντικά κραματικά στοιχεία. Οι περιοχές μεταξύ των κρυστάλλων που απεμπλουτίζονται από Cr ή/και Mo αποτελούν σημεία πιθανά για διάβρωση σε οξειδωτικά διαλύματα και διαλύματα χλωριόντων. Η φθορά που προκαλείται από την εκλεκτική διάβρωση των περιοχών που έχουν απεμττλουτιστεί από κράματα, ποικίλλει από την απώλεια ολόκληρων κόκκων (απόρριψη κόκκων) έως διάβρωση με απώλεια πολύ μικρού βάρους σε εντοπισμένα σημεία, ανάλογα με την κατανομή και τη μορφολογία των κατακρημνισμάτων στα περατωτικά όρια των κόκκων.

Η εκλεκτική διάβρωση που σχετίζεται με τον δ-φερρίτη και τη φάση σ ενδέχεται να αποτελέσει πρόβλημα όταν η συγκόλληση εκτίθεται σε περιβάλλον, στο οποίο οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν οριακή αντίσταση σε διάβρωση, όπως :

- Ελαφρώς αναγωγικό (π.χ. υδροχλωρικό οξύ HCl)
- Οριακά δραστικό -παθητικό (θειικό οξύ, H4SO2)
- Πολύ οξειδωτικό (nitric acid, HN03)

Ο όξινος καθαρισμός (HCl) των εξατμιστών του μαύρου υδατικού διαλύματος κατεργασίας χαρτοπολτού, που είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 304 και 316, στη βιομηχανία του χαρτοπολτού με μη επαρκή ποσότητα αναστολέων διάβρωσης, ενδέχεται να οδηγήσει σε

διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης (Εικόνα 15). Η διάβρωση αποφεύγεται με αναστολείς διάβρωσης.
Συχνά παρουσιάζεται προσβολή από θειικό οξύ των περιοχών που έχουν απεμπλουτιστεί από Cr ή Mo δίπλα σε κατακρημνίσματα σ φάσης.



Εικόνα 15. Διαβρωμένος εξατμιστής κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα 316.[14]

Ωστόσο η προσβολή αυτή είναι δύσκολο να προβλεφθεί διότι η δράση ελεύθερων οξειδωτικών ουσιών, όπως ιόντα σιδήρου (Fe3*) ή χαλκού (Cu2*), ενδέχεται να αναστείλουν την εκλεκτική διάβρωση. Το μέταλλο συγκόλλησης τύπου 316 L περιέχει περισσότερο χρώμιο και λιγότερο μολυβδαίνιο, ώστε να ελαχιστοπο«είται ο σχηματισμός σ-φάσης.
Είναι πιθανό, πολύ οξειδωτικά περιβάλλοντα όπως αυτά σε εργοστάσια λεύκανσης να διαβρώσουν το δίκτυο του δ-φερίτη και τη σ-φάση. Εντούτοις, αυτό το είδος διάβρωσης δεν αποτελεί συχνά αιτία αστοχίας, πιθανώς επειδή το δυναμικό διάβρωσης είναι σε γενικές γραμμές λιγότερο ισχυρό απ’ αυτό που απαιτείται για να ξεκινήσει η διάβρωση. Η εκλεκτική διάβρωση του δ-φερρίτη σε μέταλλα συγκόλλησης τύπου 316L αναφέρεται πιο συχνά μετά από παρατεταμένη έκθεση σε HN03, όπως στην επανεπεξεργασία πυρηνικών καυσίμων ή στην παραγωγή ουρίας.

Διάβρωση με βελονισμούς και διάβρωση χαραγής

Εντοπισμένη προσβολή στο μέταλλο συγκόλλησης και στη θερμκά επηρεασμένη ζώνη μπορεί να εμφανιστεί με τη μορφή βελονισμών και διάβρωσης χαραγής, ειδικά σε υδατικά διαλύματα και διαλύματα χλωριόντων.

Διάβρωση με βελονισμούς

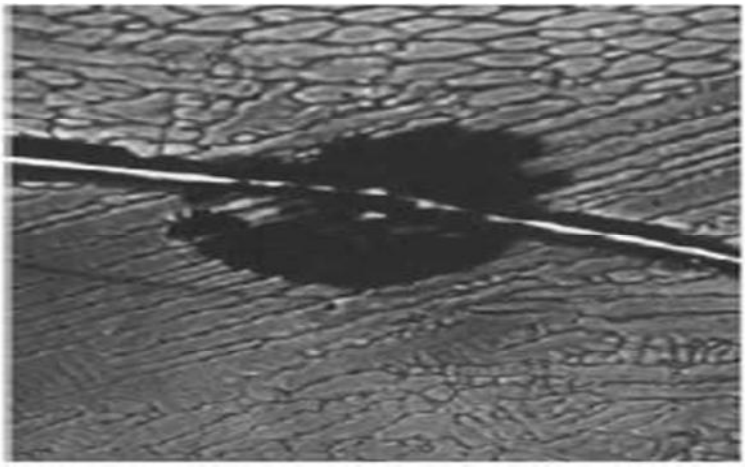
Σε μέτρια οξειδωτικές συνθήκες, όπως σε ένα εργοστάσιο λεύκανσης χαρτοπολτού, ο ωστενίτης του μετάλλου συγκόλλησης ενδέχεται να υποστεί εκλεκτική διάβρωση με βελονισμούς σε περιοχές που έχει απεμπλουτιστεί το κράμα. Η διάβρωση αυτή είναι ανεξάρτητη από κάθε κατακρήμνιση μετάλλου συγκόλλησης και αποτελεί συνέπεια του μικροδιαφορισμού στους δενδρίτες του μετάλλου συγκόλλησης. Η διάβρωση με βελονισμούς είναι πιο πιθανή:

- Σε αυτογενείς συγκολλήσεις τύπου GTAW.
- Σε κράματα που περιέχουν 4 έως 6% Mo.
- Όταν το μέταλλο συγκόλλησης έχει την ίδια σύσταση με το μέταλλο βάσης
- Όταν η συγκόλληση πραγματοποιείται με θερμότητα μεγαλύτερη από την
- απαιτούμενη δημιουργεί μια χονδροειδή μικροδομή με δενδρίτες στην επιφάνειά της

Μικροδομή τέτοιου είδους αποφεύγεται με τη χρήση κατάλληλα κραματωμένου ηλεκτροδίου συγκόλλησης.

Στη βιβλιογραφία δίνονται ηλεκτρόδια συγκόλλησης με αντίσταση στη διάβρωση με βελονισμούς, ίδια ή καλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο μέταλλο βάσης. Ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια συγκόλλησης, η πιθανότητα εκλεκτικής διάβρωσης με βελονισμούς στη μη ανεμεμειγμένη ζώνη μετάλλου συγκόλλησης συνεχίζει να υπάρχει. Η συγκόλληση σε θερμότητα μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ενδέχεται να αφήσει ζώνες τηγμένου βασικού μετάλλου κοντά στη γραμμή τήξης. Η επίδραση των ζωνών αυτών στην αντίσταση στη διάβρωση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τεχνικές συγκόλλησης που καλύπτουν τις μη ανεμεμειγμένες ζώνες κάτω από την επιφάνεια της συγκόλλησης.

Όταν χρησιμοποιηθεί λάθος ηλεκτρόδιο συγκόλλησης, σε κάποια περιβάλλοντα μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί διάβρωση με βελονισμούς.

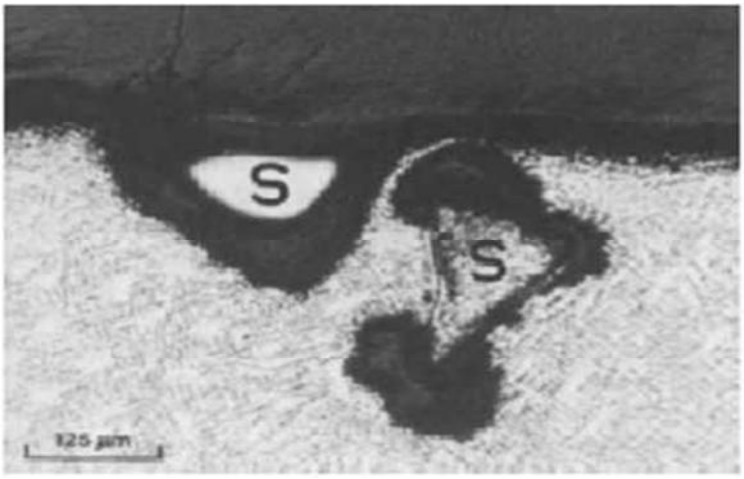


Εικόνα 16. Διάβρωση με βελονισμούς σε μέταλλο συγκόλλησης τύπου 317L σε δυναμικό 190mV (ως προς SCE) σε διάλυμα 0.6N NaCl (pH 3) στους 50°C. Ο βελονισμός εμφανίστηκε στους κυρίως δενδρίτες που βρίσκονται παράλληλα στην επιφάνεια και όχι σε κόκκους με δενδρίτες που βρίσκονται σε γωνία σε σχέση με την επιφάνεια. [14]

Διάβρωση Χαραγής

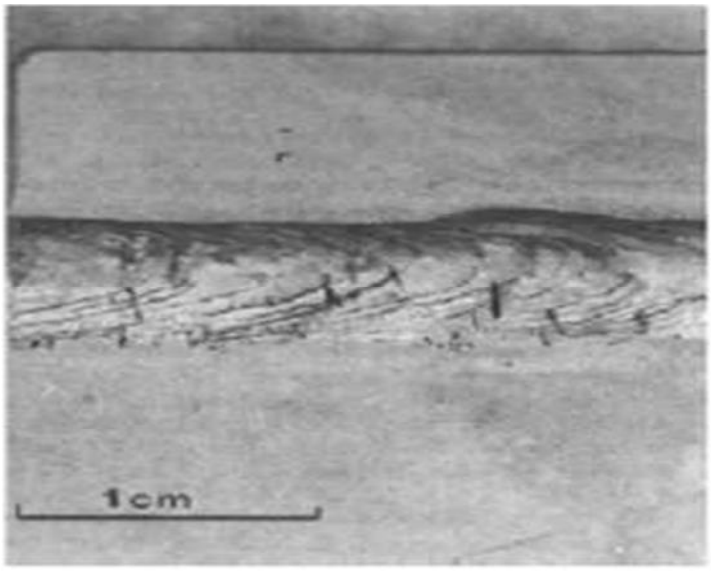
Ελαττώματα όπως υπολειπόμενη σκωρία συγκόλλησης και μικρορωγμές δημιουργούν σχισμές που διαβρώνονται εύκολα, ιδιαίτερα σε περιβάλλον χλωριόντων. Κάποιες συνθέσεις σκωρίας σε επενδεδυμένα ηλεκτρόδια συγκόλλησης με τόξο, παράγουν σκωρία που απομακρύνεται εύκολα, ενώ άλλες συνθέσεις παράγουν σκωρία που απομακρύνεται δύσκολα ακόμη και ύστερα από αμμοβολή. Σκωρία από επικαλύψεις ρουτιλίου (βάση τιτανίου) αποσπώνται εύκολα και δημιουργούν καλό σχήμα κορδονιού. Αντίθετα, σκωρία από τα βασικά επικαλυμμένα ηλεκτρόδια για συγκολλήσεις εκτός θέσεως ενδέχεται να αποσπάται δύσκολα: μικρά σωματίδια σκωρίας μπορεί να παραμείνουν στην επιφάνεια, παρέχοντας σημεία ευνοϊκά για την έναρξη διάβρωσης χαραγής. (Εικόνα 17).

Οι μικρορωγμές καθώς και οι αντίστοιχες, μεγαλύτερες ρωγματώσεις, παρέχουν επίσης σημεία ευνοϊκά για την έναρξη διάβρωσης χαραγής, η οποία μειώνει δραστικά την αντοχή μιας συγκόλλησης σε διάβρωση. Οι μικρορωγμές προκαλούνται από τάσεις θερμικής συστολής, κατά τη στερεοποίηση της συγκόλλησης και αποτελούν ένα πρόβλημα που μαστίζει την κατεργασία ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα. Αυτές οι ρωγμές του μετάλλου συγκόλλησης είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν όταν τα επίπεδα φωσφόρου και θείου είναι υψηλότερα (π.χ. >0.015% P και >0.015% S), σε συνδυασμό με συγκόλληση υψηλής θερμότητας, καθώς και σε ωστενιτικό μέταλλο συγκόλλησης στο οποίο η περιεκτικότητα σε δ-φερρίτη είναι χαμηλή (<3%).

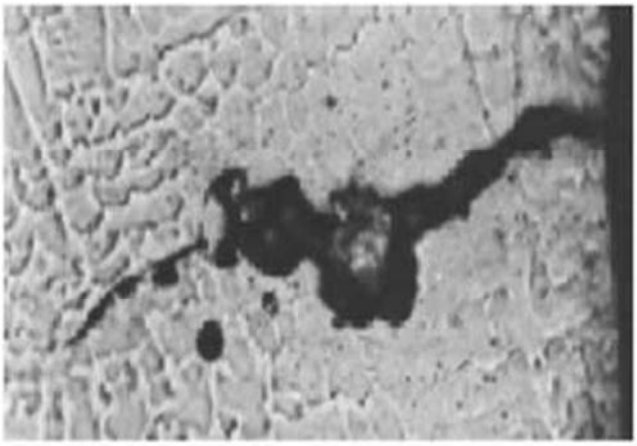


Εικόνα 17. Διάβρωση χαραγής κάτω από εναπομείνουσα σκωρία (Slag, S) σε μέταλλο συγκόλλησης IN 135 μετά από την έκθεση σε εγκατάσταση λεύκανσης. Προσβολή με glyceregia. [14]

Οι μικρορωγμές μικρής κλίμακας είναι συχνά ορατές στο γυμνό μάτι, και η ύπαρξή τους εξηγεί την απροσδόκητα χαμηλή αντοχή σε διάβρωση από βελονισμούς καλών συγκολλήσεων. Η μικρορωγμή παρέχει μια χαραγή, που διαβρώνεται εύκολα επειδή τα κράματα ανοξείδωτου είναι πιο ευαίσθητα στη διάβρωση χαραγής, απ' ότι στη διάβρωση με βελονισμούς. Ωστόσο, πολλές φορές η διάβρωση χαραγής των μικρορωγμών συχνά παρερμηνεύεται ως διάβρωση με βελονισμούς που ξεκινά μόνη της (Εικόνες 18, 19). Διάβρωση χαραγής μπορεί επίσης να εμφανιστεί στην αρχή ή στο τέλος των πάσων συγκόλλησης, μεταξύ των πάσων συγκόλλησης ή κάτω από περιοχές με πιτσιλιές (spatter) της συγκόλλησης.



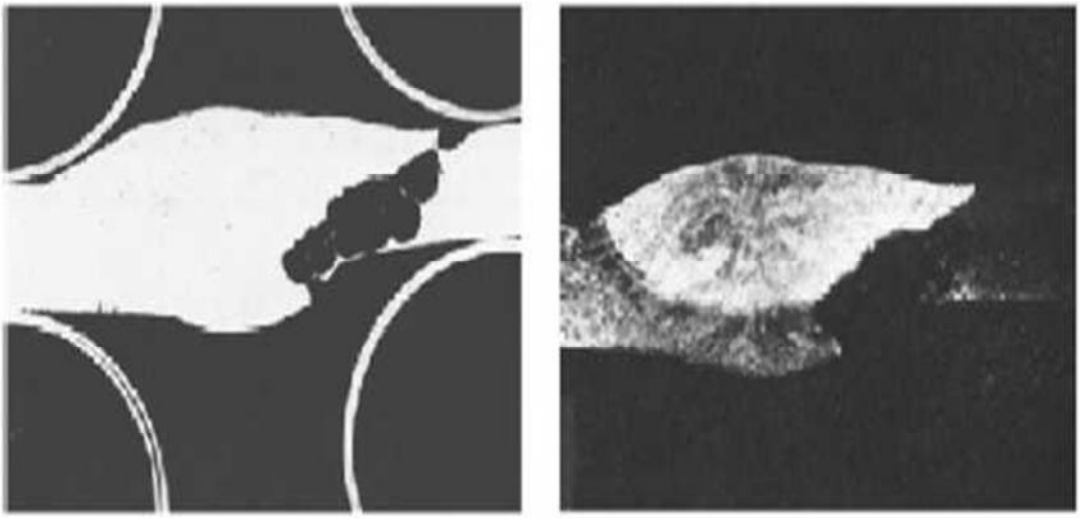
Εικόνα 18. Διάβρωση χαραγής με μέταλλο συγκόλλησης IN-135 σε μέταλλο βάσης 904L. [14]



Εικόνα 19. Διάβρωση χαραγής, η οποία έχει σχεδόν εξαλείψει οποιαδήποτε ένδειξη προηγούμενης ύπαρξης μικρορωγμών. Αυτή η μορφή διάβρωσης πολλές φορές λανθασμένα ερμηνεύεται ως διάβρωση με βελονισμούς : πολύ συχνά η διάβρωση χαραγής ξεκινά από μικρορωγμές (προσβολή με glyceregia).[14]

Οι διασπορές της συγκόλλησης είναι πιο προβληματικές όταν είναι χαλαρές ή ανεπαρκώς προσκολλημένες στην επιφάνεια.

Η διάβρωση σε μικρορωγμές σε συγκολλήσεις από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα με περιεκτικότητα 4-6% σε Mo, αποφεύγεται καλύτερα με μέταλλα συγκόλλησης με βάση το νικέλιο Inconel 625, Inconel 112 ή Avesta P12, που είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση χαραγής. Κάποια ανοξείδωτα ηλεκτρόδια είναι κατάλληλα για τη συγκόλληση χάλυβα σε περιεκτικότητα 4% Mo. θα πρέπει όμως να επιλέγονται με χαμηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο και θείο ώστε να αποφεύγονται προβλήματα μικρορωγμών.
Το ζεστό νερό βρύσης που περιέχει χλωριόντα δεν θεωρείται ιδιαίτερα διαβρωτικό: ωστόσο η Εικόνα 20 δείχνει τι μπορεί να συμβεί σε μια συγκόλληση που περιέχει σφάλμα ατελούς τήξης, παρουσία χλωριόντων. Στην περίπτωση αυτή το μέταλλο βάσης είναι ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 304 και το μέταλλο συγκόλλησης είναι τύπου 308.



Εικόνα 20. Τομή χωρίς προσβολή (αριστερά) και με προσβολή (δεξιά) συγκόλλησης ανοξείδωτου χάλυβα 304, όπου εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς κατά μήκος μιας χαραγής σε ατέλεια της συγκόλλησης. Περιβάλλον ζεστού νερού βρύσης. [14]

Αλλες παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση των συγκολλήσεων

Κατακρήμνιση σ- φάσης σε ΘΕΖ (ΘΕΡΜΟΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ)

Όταν πρωτοεμφανίστηκαν τα κράματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Mo, όπως τα 904L, AL-6XN, και 254SMO, ένα από τα αναμενόμενα προβλήματα διάβρωσης ήταν η διάβρωση από μονοφασικά κατακρημνίσματα σε συγκολλήσεις στη ΘΕΖ. Η μορφή αυτή διάβρωσης έχει μεταγενέστερα αποδειχθεί επιφανειακή ή ανύπαρκτη στις περισσότερες εφαρμογές.
Πιο πρόσφατα, στους ωστενπικούς ανοξείδωτους χάλυβες με Μ ο, προστέθηκε Ν, προκειμένου να επιβραδυνθεί η κατακρήμνιση των μεσομεταλλικών (intermentallic) ενώσεων πλούσιων σε Cr και Mo (σ ή χ φάσεις). Ο χρόνος επώασης για τις μεσομεταλλικές (intermetallic) αντιδράσεις κατακρήμνισης σε ανοξείδωτα κράματα Fe-Cr-Ni-Mo μεγαλώνει σημαντικά με την αύξηση της περιεκτικότητας του κράματος σε Ν. Αυτό έχει επιτρέψει την εμπορική παραγωγή τμημάτων ελασμάτων σημαντικού πάχους, που μπορούν να κατεργαστούν με συγκόλληση πολλαπλών πάσσων.

Εικόνα 21. Διάβρωση με βελονισμούς συσχετιζόμενη με το καθάρισμα ανοξείδωτου χάλυβα. [14]

Το άζωτο, πέρα από το ότι αναστέλλει το σχηματισμό τέτοιων φάσεων, σε συνδυασμό με το Cr και το Mo, έχει ευεργετική επίδραση στην τοπική αντίσταση σε διάβρωση σε οξειδωτικά διαλύματα όξινων χλωριόντων.

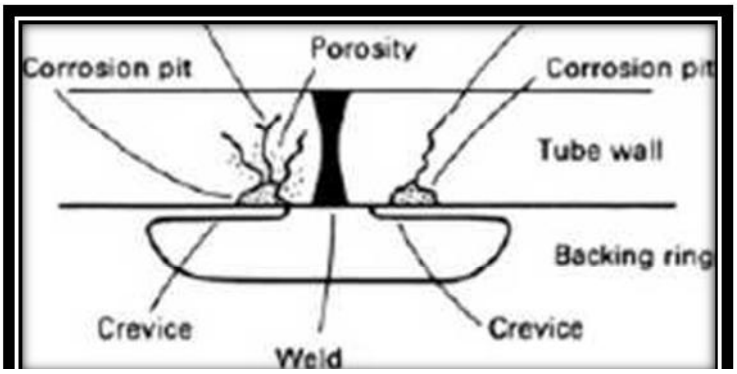
Διάβρωση που σχετίζεται με τον καθαρισμό μετά τη συγκόλληση

Ο καθαρισμός μετά τη συγκόλληση συνίσταται στην αφαίρεση των σκωρίων που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Πρόσφατες εργασίες έχουν δείξει πως ο καθαρισμός με συρμάτινες βούρτσες ανοξείδωτου χάλυβα μπορεί να ελαττώσει την αντίσταση στη διάβρωση μιας συγκόλλησης από ανοξείδωτο χάλυβα (Εικόνα 21). Αυτό αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα στις εφαρμογές στις οποίες το μέταλλο βάσης έχει οριακή αντίσταση στη διάβρωση.

Τα αποτελέσματα μιας έρευνας σε εργοστάσια λεύκανσης υποδεικνύουν ότι η ο καθαρισμός με γυάλινες χάντρες μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός από το βούρτσισμα με ανοξείδωτες μεταλλικές βούρτσες, καθώς και ότι το βούρτσισμα είναι πιο δύσκολο να εκτελεστεί αποτελεσματικά σε αυτήν την περίπτωση.

Διάβρωση που σχετίζεται με συγκόλληση με δακτυλίους υποστηρίξεως

Οι δακτύλιοι υποστηρίξεως χρησιμοποιούνται ενίοτε κατά την συγκόλληση σωλήνων. Σε εφαρμογές διάβρωσης έχει μεγάλη σημασία να χρησιμοποιηθεί ο σωστός δακτύλιος στήριξης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία σχισμής. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 22, χρησιμοποιήθηκε λάθος τύπος δακτυλίου υποστηρίξεως που μετά τη συγκόλληση άφησε ρωγμή. Η εν λόγω αποτυχία ήταν ασυνήθιστη διότι παρατηρήθηκαν διάφορες μορφές διάβρωσης.



Εικόνα 22. Διάβρωση λόγω δημιουργίας ρωγμής ανάμεσα στον σωλήνα και το δαχτυλίδι [14]

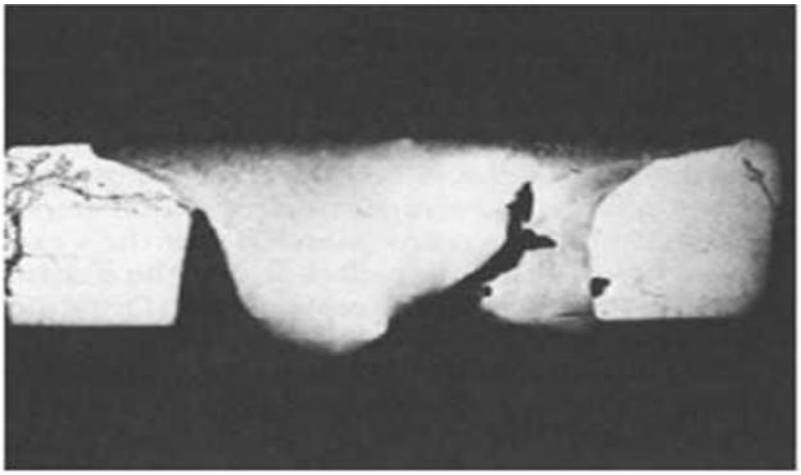
Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί συνοπτικώς σε παραπάνω εδάφιο της μεταπτυχιακής εργασίας η ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking) των ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να εμφανιστεί όταν ένα κράμα ταυτόχρονα υποβάλλεται σε εφελκυστικές τάσεις ενώ εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν την SCC είναι η θερμοκρασία, το περιβάλλον, η σύσταση του υλικού, το επίπεδο των εφαρμοζόμενων τάσεων και η μικροδομή. Η διάδοση της ρωγμής μπορεί να είναι περικρυσταλλική ή ενδοκρυσταλλική ανάλογα με την αλληλεπίδραση των παραμέτρων αυτών. Περικρυσταλλική SCC μπορεί να συμβεί ακόμα και αν το κράμα δεν είναι ευπαθές σε περικρυσταλλική διάβρωση. Η παρουσία παραμενουσών τάσεων στη ΘΕΖ μπορεί να επιταχύνει τη διάβρωση και τη ρωγμάτωση, ειδικά κατά μήκος των ορίων των κόκκων που είναι ευαισθητοποιημένοι.
Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες παρατηρείται και ενδοκρυσταλλική SCC. Αυτή η μορφή της ρωγμάτωσης εμφανίζεται σε περιβάλλον χλωριόντων (θαλασσινό νερό), αλλά συναντάται και σε καυστικά μέσα. Τα ιόντα της οικογένειας των αλογόνων (φθόριο, χλώριο, βρώμιο και Ιώδιο) είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση της ενδοκρυσταλλικής SCC. Τα ιόντα του χλωρίου προκαλούν το μεγαλύτερο αριθμό των αστοχιών.

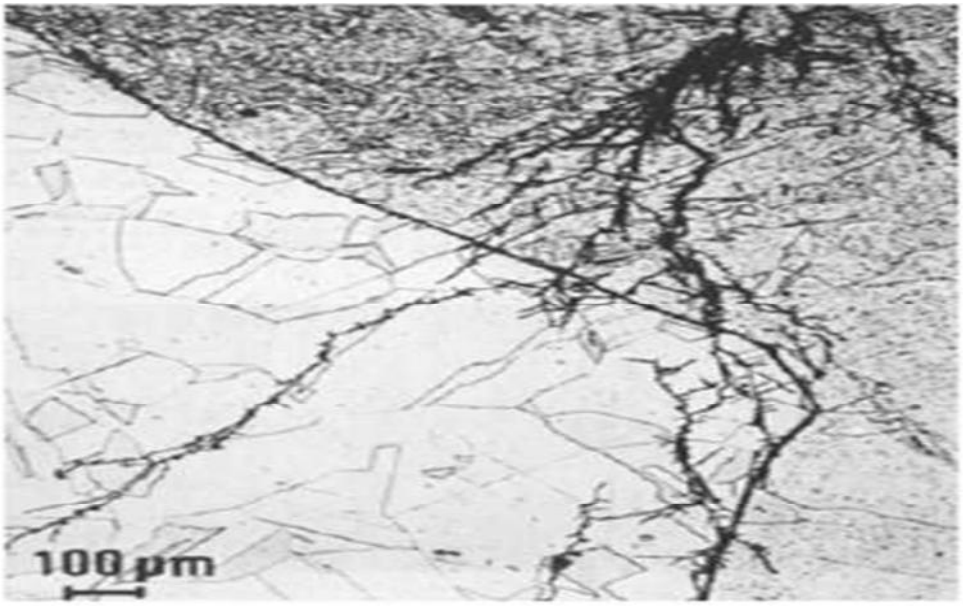
SCC εξαιτίας των χλωριόντων

Οι συγκολλήσεις των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων της σειράς 300, με εξαίρεση τους τύπους 310 και 310Mo, περιέχουν μικρές ποσότητες δ-φερρίτη (συνήθως λιγότερο από 10%) για να αποφεύγεται η θερμή ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση της συγκόλλησης.
Σε θερμά, υδάτινα χλωριούχα περιβάλλοντα, οι εν λόγω διπλές συγκολλήσεις σε γενικές γραμμές παρουσιάζουν μια καθορισμένη αντίσταση στη ρωγμάτωση, ενώ οι αντίστοιχές τους ρωγματώνονται εύκολα (Εικόνα 23).
Η γενικά αποδεκτή εξήγηση για τη συμπεριφορά αυτή είναι πως ο φερρίτης παρουσιάζει αντοχή στη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση σε περιβάλλον χλωριόντων και εμποδίζει τη διάδοση της ρωγμής μέσω της ωστενιτικής φάσης. Τα ηλεκτροχημικά φαινόμενα ενδέχεται να παίζουν κι αυτά ένα ρόλο.

Ωστόσο, υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων, θερμοκρασίας και συγκέντρωσης χλωριόντων, οι διπλές αυτές συγκολλήσεις ρωγματώνονται εύκολα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 24.



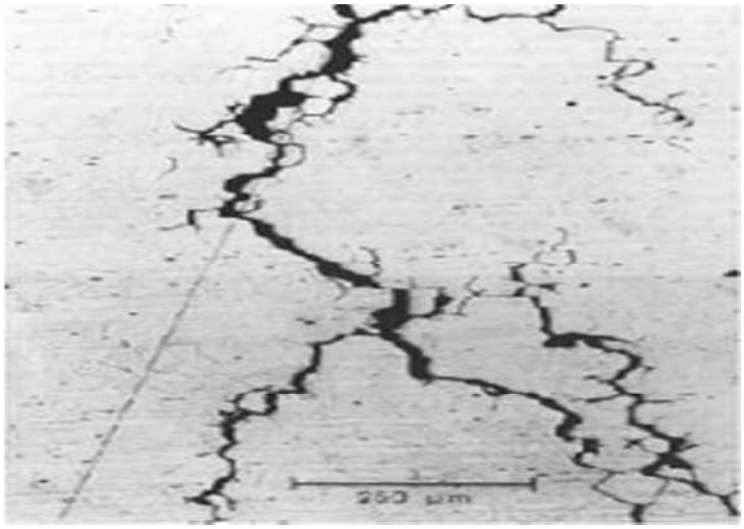
Εικόνα 23. Εκλεκτική προσβολή του μέταλλου συγκόλλησης του ανοξείδωτου χάλυβα 317L και διάβρωση με μηχανική καταπόνηση σε περιβάλλον χλωριόντων του παρακείμενου μετάλλου βάσης 317L. [14]



Εικόνα 24. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση σε περιβάλλον χλωριόντων ανοξείδωτου χάλυβα 304 μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης (ανοξείδωτος 308) σε υδατικό διάλυμα χλωριόντων σε θερμοκρασία 95 eC. Η ρωγμάτωση είναι διακλαδιζόμενη και διακρυσταλλική. [14]

Ψαθυροποίηση λόγω καυστικών ουσιών

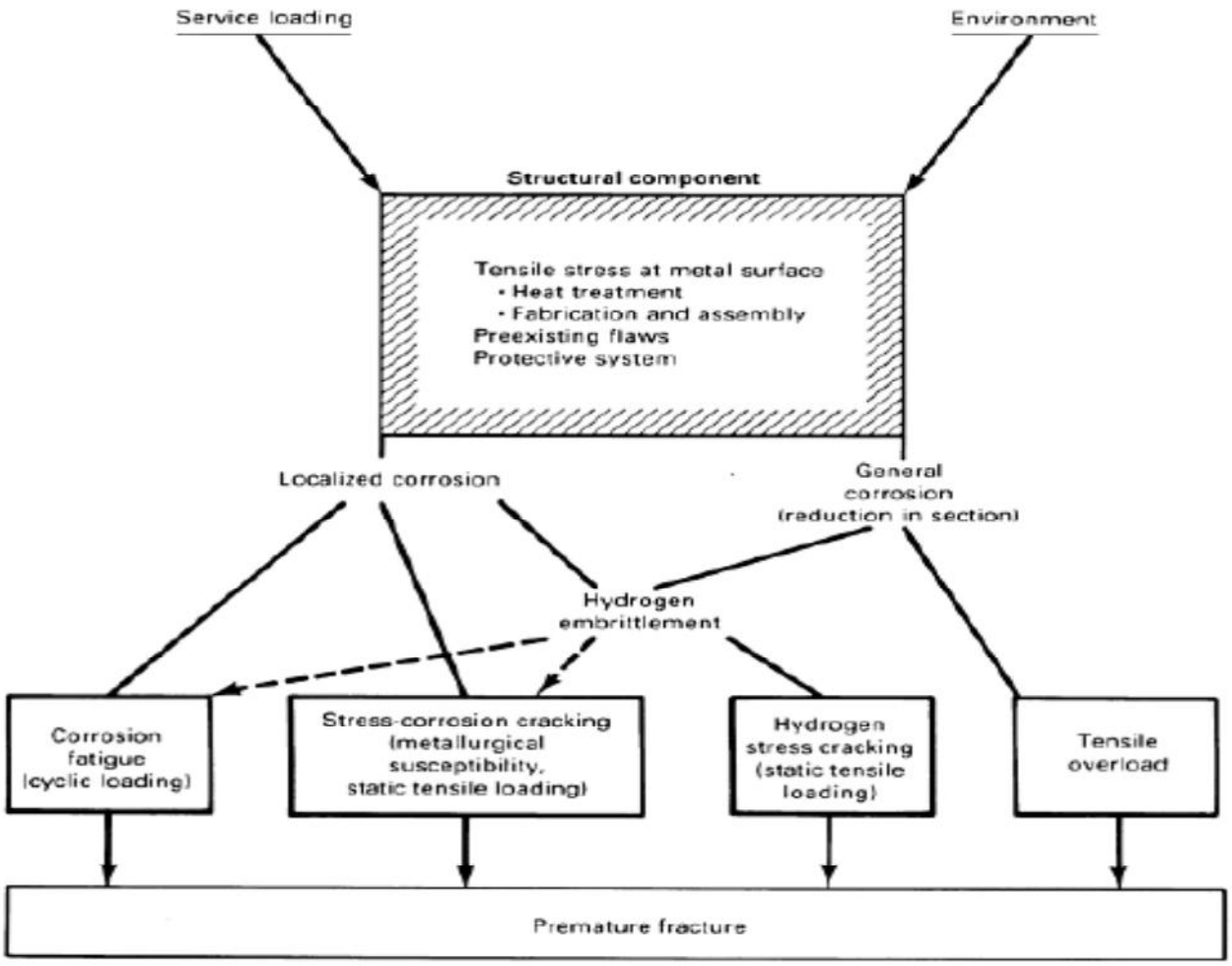
Η ευπάθεια των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων σε αυτήν τη μορφή διάβρωσης αρχίζει να αποτελεί πρόβλημα όταν η συγκέντρωση των καυστικών ουσιών υπερβαίνει περίπου το 25% και οι θερμοκρασίες κυμαίνονται πάνω από τους 100SC. Εξαιτίας του ότι οι συγκολλήσεις αποτελούν τμήμα των περισσότερων κατασκευών, ο συγκόλληση αποτελεί το κέντρο της προσοχής, λόγω πιθανών φαινομένων που αυξάνουν την τάση, καθώς και λόγω των υψηλών παραμενουσών τάσεων. Η ρωγμάτωση συμβαίνει συχνότερα στη ΘΕΖ (Εικόνα 25).
Στην Εικόνα 25 φαίνονται διακλαδιζόμενες και περικρυσταλλικές ρωγμές στη ΘΕΖ, σε δοχείο πίεσης όπου το υγρό περιείχε 50% υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) στους 105 °C.



Εικόνα 25. Καυστική διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης στη ΘΕΖ ανοξείδωτου χάλυβα 316L. Οι ρωγμές είναι διακλαδιζόμενες και ττερικρυσταλλικές. [14]

5. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΥΠΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (SCC) ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ. [20],[21],[22],[23],[24]

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 26, υπάρχει ένα πλήθος από φαινόμενα τα οποία οδηγούν σε πρόωρη αστοχία αρκετά από τα πιο γνωστά μεταλλουργικά υλικά.
Τα φαινόμενα Stress Fatigue Corrosion και Stress Corrosion Cracking είναι δύο από τα πιο γνωστά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα και όπως θα δούμε παρακάτω, μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε αρκετές περιπτώσεις, δημιουργώντας πολύ σοβαρά προβλήματα.



Εικόνα 26. Αιτίες πρόωρης αστοχίας μεταλλουργικών υλικών συσχετιζόμενες με το φαινόμενο της διάβρωσης [20].

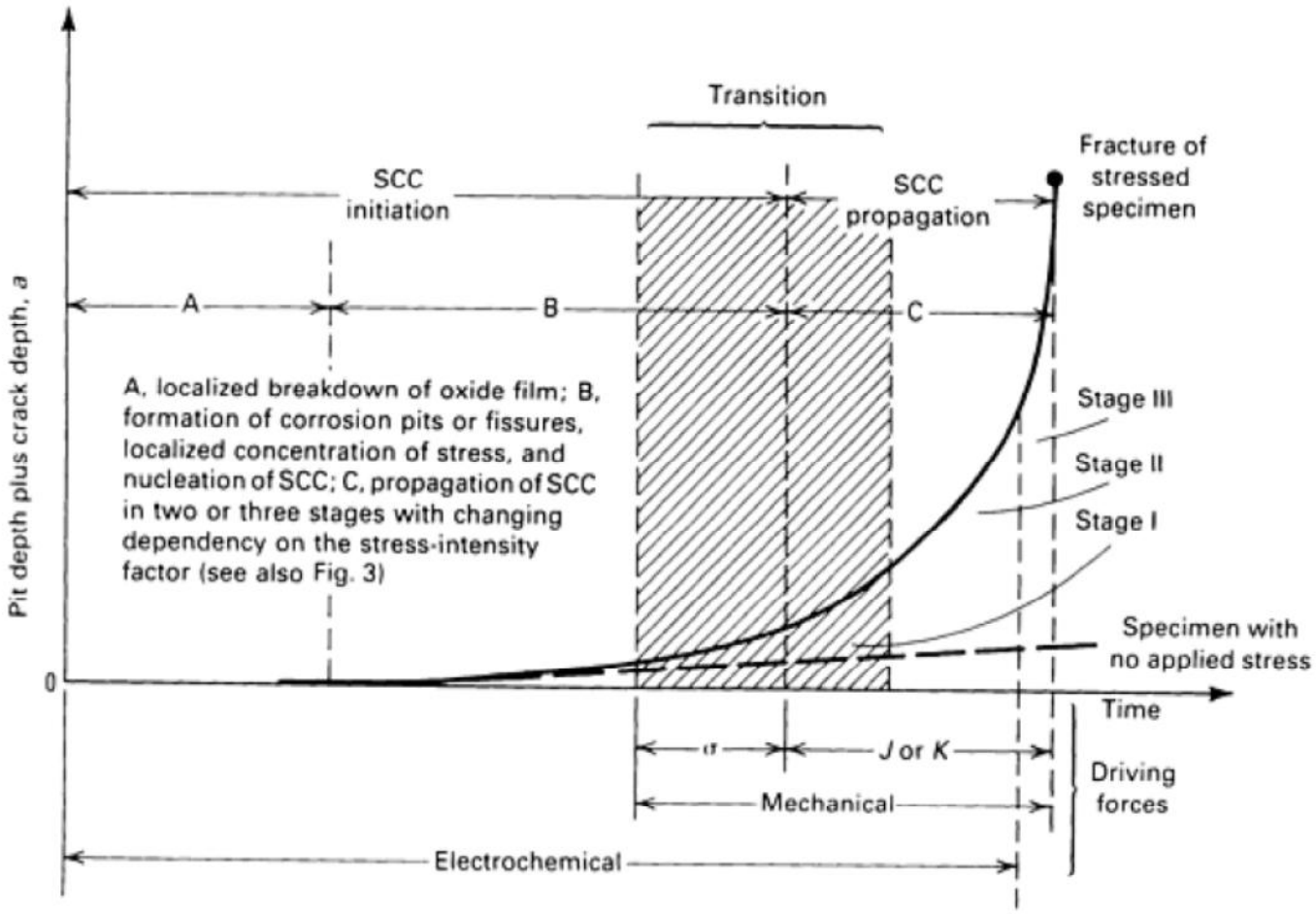
Το φαινόμενο Stress Fatigue Corrosion μπορεί να εμφανιστεί μόνο στην περίπτωση κυκλικής φόρτισης ή στην περίπτωση εναλλασσόμενης φόρτισης του υλικού.

Όπως έχει προαναφερθεί και σε άλλα εδάφια της μεταπτυχιακής εργασίας, το φαίνόμενο Stress Corrosion Cracking μπορεί να εμφανιστεί μόνο κατά τον συνδυασμό επιβολής μηχανικών (εφελκυστικών) τάσεων, διαβρωτικού περιβάλλοντος και μεταλλουργικής δομής του υλικού.

ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SCC

Σχετικά με το φαινόμενο Stress Corrosion Cracking, δεν υπάρχει κάποιο αποδεκτό μοντέλο περιγραφής του μηχανισμού έναρξης και διάδοσής του. Για την ακρίβεια θα μπορούσε να είναι μια σταδιακή μετάβαση από ένα σημείο εντοπισμένης διάβρωσης,στην έναρξη ρωγμής στο σημείο αυτό και την διάδωσή της σε ένα στάδιο ή θα μπορούσε η έναρξη της ρωγμής και της διάδοσής της να συμβαίνει σε επαναλαμβανόμενα μικρά στάδια. Σε κάθε περίπτωση αν μελετήσουμε το φαινόμενο από την μηχανική του σκοπιά, μπορούμε να υποθέσουμε την διαδικασία σε δυο βασικά στάδια.Την έναρξη και την διάδοση.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 27) φαίνονται οι σχετικές επιδράσεις των ηλεκτροχημικών και μηχανικών παραγόντων στην έναρξη και τη διάδοση της ρωγμής κατά το φαινόμενο SCC .



Εικόνα 27. Οι σχετικές επιδράσεις των ηλεκτροχημικών και μηχανικών παραγόντων στην διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση ενός ευαίσθητου υλικού [20].

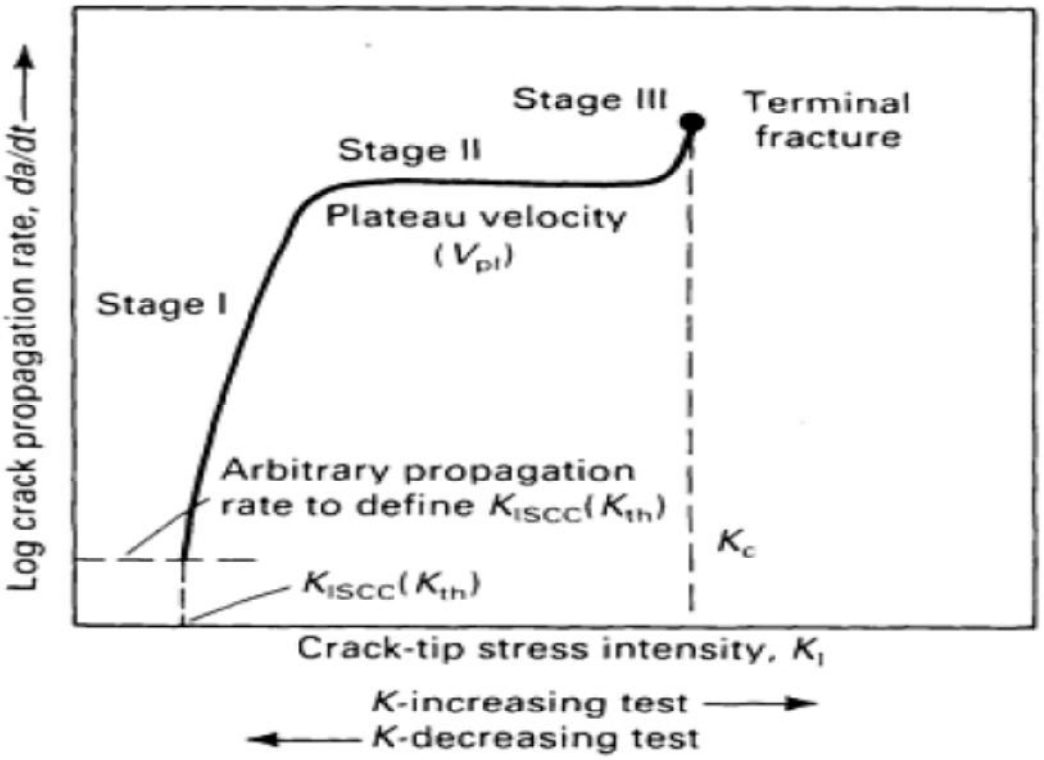
Ο μηχανισμός της διάβρωσης έχει δύο τύπου αντιδράσεις, την ανοδική αντίδραση διάβρωσης και την καθοδική. Οι συγκεκριμένοι τύποι αντιδράσεων κυριαρχούν στην διαδικασία του φαινομένου SCC σε συνδυασμό με μηχανική καταπόνηση.

Τα ιόντα μετάλλων που παράγονται από την ανοδική αντίδραση διλαβρωσης υδρολύονται εύκολα δίνοντας πρωτόνια (οξύ) και διαμορφώνοντας τα προιόντα διάβρωσης.Το pH σε μια ρωγμή μπορεί να φτάσει σε πολύ όξινες τιμές, μερικές φορές όσο και στα οξέα.

Η Ανοδική αντίδραση SCC περιλαμβάνει την διάλυση του μετάλλου κατά τη διάρκεια της έναρξης και της διάδοση των ρωγμών.

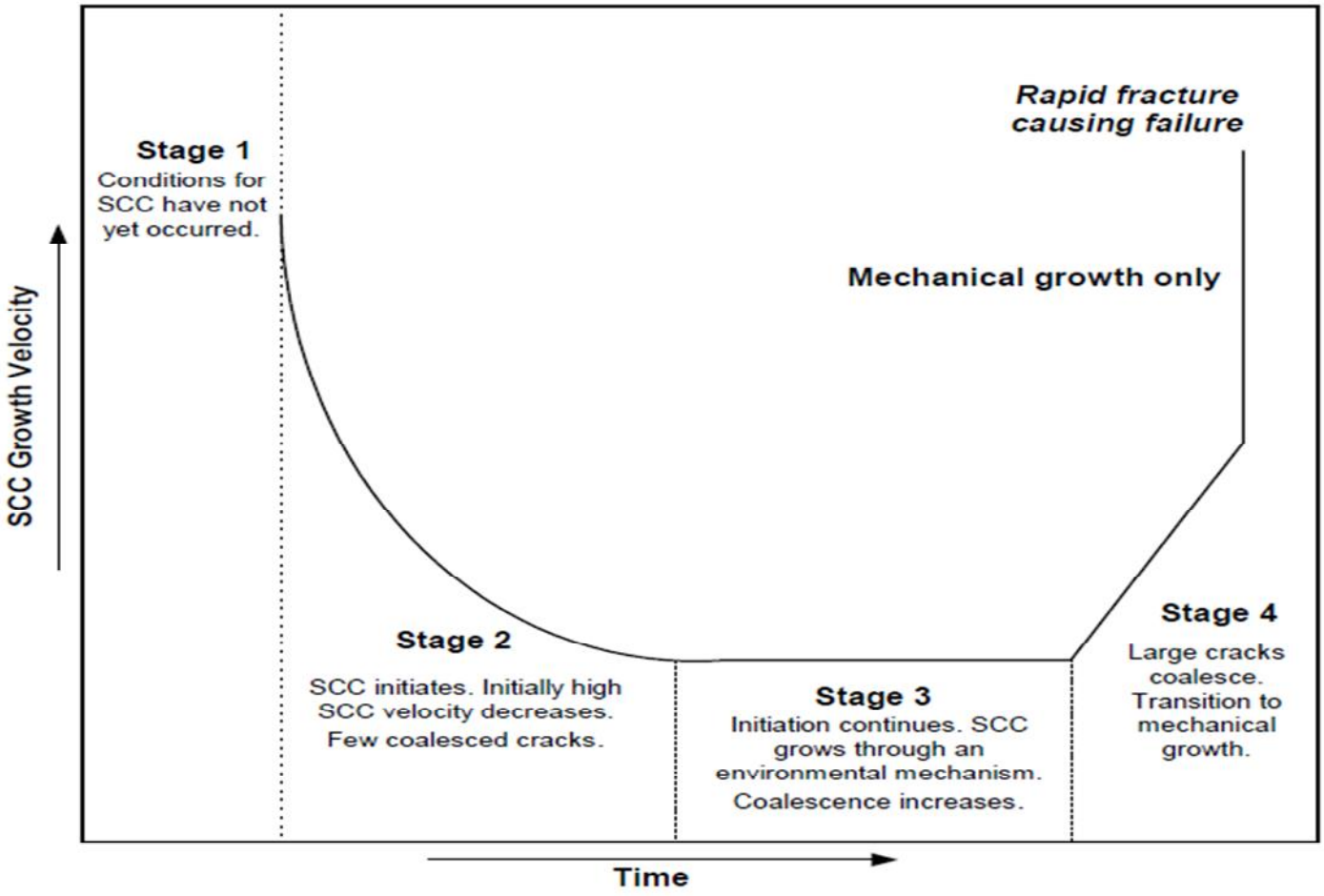
Η Καθοδική αντίδραση SCC περιλαμβάνει την εναπόθεση ιόντων υδρογόνου στην επιφανεία του μετάλλου ή στα τοιχώματα της ρωγμής του και την επακόλουθη απορρόφηση τους στο μεταλλικό πλέγμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 28) φαίνεται η σχέση του συντελεστή ένταση τάσεων με την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής κατά τη διάρκεια του φαινομένου SCC. Τα στάδια I και II δεν συμβαίνει πάντοτε να περιγράφονται διαγραμματικά από ευθείες γραμμές αλλά πολλές φορές και από μεγάλες καμπύλες.Σε μερικά συστήματα μάλιστα ένα από τα δύο συστήματα απουσιάζει τελείως.Το στάδιο III αποτελεί το στάδιο με το μικρότερο ενδιαφέρον και πολλές φορές απουσιάζει τελείως από τα σχετικά Τεστ μείωσης του συντελεστη έντασης τάσεων K.



Εικόνα 28. Διάδοση ρωγμής σε σχέση με τον συντελεστή έντασης τάσεων [20]

Η κατανόηση και ο προσδιορισμός του κυκλου ζωής του φαινομένου SCC είναι πολύ χρήσιμα στην γενικότερη μελέτη του φαινομένου.Η διαγραμματική απεικόνιση του κύκλου ζωής σε σωληνώσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα 2 και διαχωρίζεται σε 4 στάδια.



Διάγραμμα 2. Διάγραμμα κύκλου ζωής της διάδοσης του φαινομένου SCC σε σωληνώσεις (Parkins, 1987)

Τα στάδια που περιγράφουν τον κύκλο ζωής του συγκεκριμένου φαινομένου σε σωληνώσεις είναι τα εξής :

Στάδιο 1 : Στο στάδιο αυτό οι συνθήκες για την εμφάνιση του φαινομένου SCC δεν έχουν εμφανιστεί.

Στάδιο 2: Έναρξη του φαινομένου SCC. Αρκετά μειωμένη ταχύτητα διάδοσης και εμφάνιση μερικών συγχωνευμένων ρωγμών.

Στάδιο 3: Συνέχεια έναρξης φαινομένου. Το φαινόμενο διαδίδεται στα πλαίσια ενός διαβρωτικού περιβαλλοντολογικού μηχανισμού. Αύξηση ποσότητας συγχωνευμένων ρωγμων.

Στάδιο 4: Στάδιο αποκλειστικά μηχανικής διάδοσης φαινομένου.Εμφάνιση μεγαλών ρωγμών μέχρι την αστοχία εξαιτίας ταχείας θραύσης .

Η αστοχία σε σωληνώσεις εξαιτίας του εν λόγω φαινομένου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 29, μπορεί να έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις.

Εικόνα 29. Αστοχία σωλήνωσης εξαιτίας ανάπτυξης ρωγμής σε κάποιο μέρος της [21].

5.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SCC ΣΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Κατά την προσπάθεια πρόληψης της εμφάνισης του φαινομένου SCC καθώς επίσης και της αντιμετώπισής του σε σωληνώσεις, τέσσερις είναι οι βασικές εργασίες που συμβάλλουν προς την κατεύθυνση αυτή.Συνοπτικά οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής:

1. **Εξωτερική προστασία σωλήνωσης με διάφορα μέσα επικάλυψης:** Η βαφή και η μόνωση της σωλήνωσης για την προστασία της δομής της από το διαβρωτικό περιβάλλον συμβάλλουν στην πρόληψη και την αντιμετώπιση του φαινομένου.

Εικόνα 30. Βαφή σωλήνωσης για την προστασία της από διάβρωση [21].

2. **Καθοδική προστασία:** Η μέθοδος μέσω επιβαλλομένης τάσεως (impress current), με την οποία επιβάλλεται μία ηλεκτρική τάση στα μέταλλα που υπόκεινται στην ηλεκτρόλυση, με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή ενέργειας (εικόνα 31). Η τάση και η ένταση που επιβάλλονται με αυτή την μέθοδο προκύπτει από ειδικούς ανιχνευτές οι οποίοι διεγείρουν ανάλογα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε μονάδα ελέγχου η οποία εν συνεχεία δίνει εντολή ανάλογης επιβολής τάσης και έντασης.

Εικόνα 31. Ρεκτιφιέ καθοδικής προστασίας [21].

3. **Υδροστατικές δοκιμές:** Με την έννοια υδροστατικές δοκιμές εννοούμε όλες τις προ-λειτουργικές δοκιμές πίεσης με την χρήση νερού. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών η σωλήνωση ανάλογα με το μήκος της χωρίζεται σε μικρότερα μέρη (με τη βοήθεια ειδικών τυφλών φλαντζών ή βανών) και κάθε μέρος δοκιμάζεται σε συνθήκες πίεσης που, βάσει των προδιαγραφών λειτουργίας της, εξασφαλίζουν την ασφάλειά της.

Εικόνα 32. Διαδικασία Υδραυλικής δοκιμής σωλήνωσης με ταπωμένο το ένα άκρο [21].

4. **<u>Επιδιορθώσεις:</u>** Η προστασία των κρίσιμων περιοχών της σωλήνωσης ή των περιοχών που κατά τις υδραυλικές δοκιμές παρουσίασαν κάποια μικρορωμή γίνεται είτε με ειδική επένδυση όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 33, είτε με ολική αντικατάσταση μέρους της σωλήνωσης. Επειδή στις περιπτώσεις τσιμεντοσωλήνων η διάμετρος των οποίων είναι πάρα πολύ μεγάλη, η αντικάτάσταση μέρους τους είναι και πολύ δύσκολή και πολύ κοστοβόρα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά επιθέματα που τις προστατεύουν.

<u>Εικόνα 33. Επίθεμα ενίσχυσης της σωλήνωσης για την πρόληψη περαιτέρω ανάπτυξης κάποιας ρωγμής [21].</u>

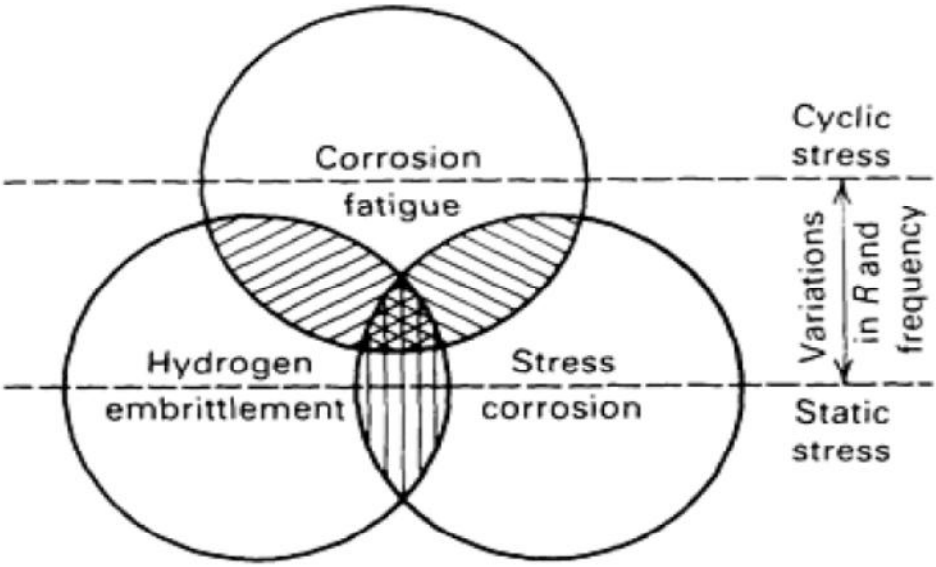
6. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ (SFC). [13]

Γενικά

Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για να εμφανισθεί αστοχία από κόπωση: α) μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση, β) μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία και γ) ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης. Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών σε κόπωσης επηρεάζεται και από μία σειρά άλλων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, η μικροδομή του υλικού, η ύπαρξη παραμενουσών εσωτερικών τάσεων στο υλικό, κ.α. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η κόπωση των μεταλλικών υλικών δεν έχει εξηγηθεί πλήρως θεωρητικά και η ανάλυσή της βασίζεται σε μεγάλο βαθμό, ακόμη και σήμερα, σε πειραματικές και εμπειρικές παρατηρήσεις.

Το φαινόμενο της κόπωσης παρούσια διαβρωτικού μέσου (Corrosion-Fatigue) είναι αποτέλεσμα μιας συνδυασμένης δράσης εναλλασσόμενων ή κυκλικών τάσεων παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα έχει σχέση άμεση με το φαινόμενο Stress Corrosion Cracking το οποίο μελετήσαμε σε παραπάνω εδάφια της εργασίας.



Εικόνα 34. Σχέση μεταξύ Stress Corrosion Cracking και Stress Fatigue Corrosion [13]

6.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ

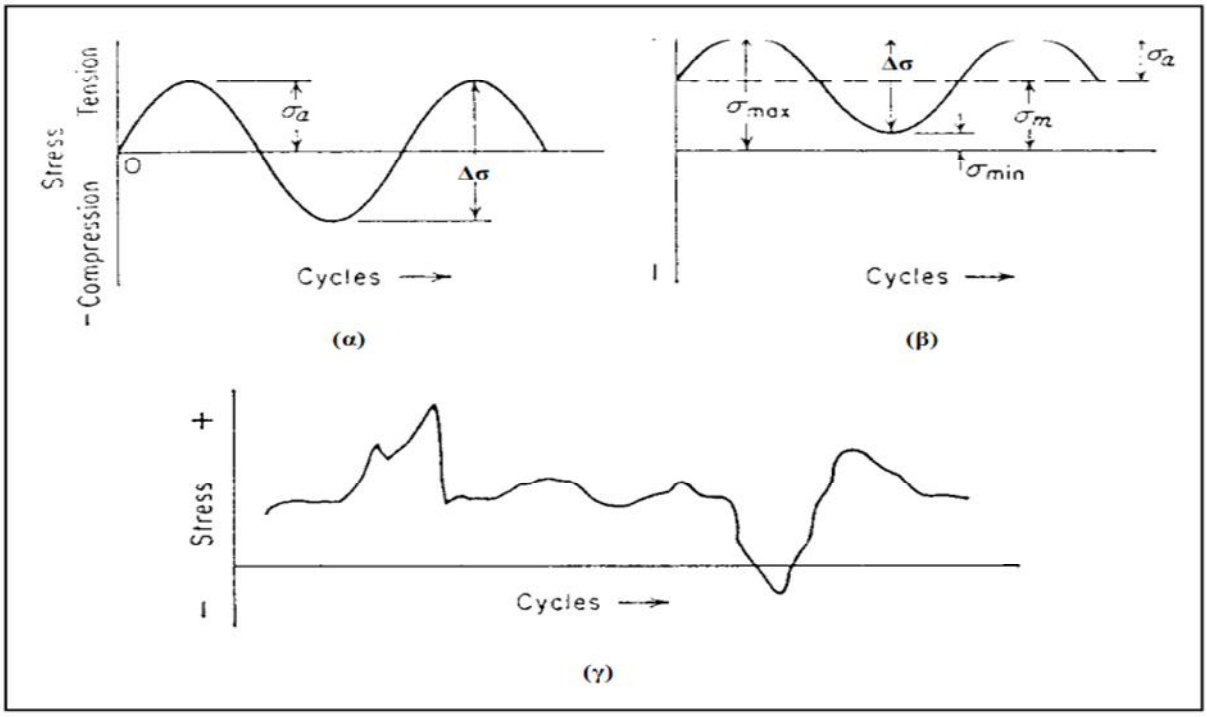
Το διάγραμμα δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τύπους δυναμικών καταπονήσεων, δηλαδή μεταβολής της τάσης σαν συνάρτηση των κύκλων φόρτισης (δηλ. του χρόνου). Το Διάγραμμα 3^{α} απεικονίζει μία πλήρως αναστρεφόμενη δυναμική καταπόνηση ημιτονοειδούς μορφής. Η ημιτονοειδής δυναμική καταπόνηση είναι μία εξιδανικευμένη κατάσταση, η οποία πολύ σπάνια συναντάται σε πραγματικές εφαρμογές. Σε αυτόν τον τύπο δυναμικής καταπόνησης η απόλυτη τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης είναι ίσες μεταξύ τους, δηλαδή

$$|\sigma\ max| = |\sigma\ min|$$

Όπου σ max > 0 (εφελκυστική) και σ min < 0 (θλιπτική).

Το διάγραμμα 3β απεικονίζει μία περιοδική δυναμική καταπόνηση στην οποία |σ max| ≠ |σ min|.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα του διαγράμματος 3β τόσο η σ max > 0 όσο και η σ min > 0 (δηλ. εφελκυστικές). Ωστόσο, θα μπορούσε κάλλιστα η σ max να είναι εφελκυστική και η σmin θλιπτική, ή ακόμη να είναι και οι δύο θλιπτικές. Τέλος, το διάγραμμα 3γ δείχνει μία ακανόνιστη ή τυχαία δυναμική καταπόνηση, η οποία δεν εμφανίζει καμία απολύτως περιοδικότητα. Στην πραγματικότητα τέτοιας μορφής δυναμικές καταπονήσεις εμφανίζονται στις περισσότερες εφαρμογές. Για παράδειγμα, το **Σχ. 3γ** θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη δυναμική καταπόνηση που δέχεται το φτερό ενός αεροσκάφους, όταν χτυπηθεί από ένα ξαφνικό και ισχυρό ρεύμα ανέμου.



Διάγραμμα 3. Τύποι δυναμικών καταπονήσεων [13]

Μία δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο ‘‘συνιστώσες’’:
μία *μέση* (ή ‘‘σταθερή’’) τάση σ_m και μία *μεταβαλλόμενη* τάση σ_α
Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης πρέπει να λάβουμε υπόψη και το *εύρος* της τάσης, Δσ. Όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 3β**, το εύρος τάσης ορίζεται σαν η *αλγεβρική διαφορά* της μέγιστης από την ελάχιστη τάση:

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

Αντίθετα, η μεταβαλλόμενη τάση, σ_α , ορίζεται σαν το μισό του εύρους Δσ, δηλαδή:

$$\sigma_\alpha = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Η μέση τάση, σm είναι ο *αλγεβρικός μέσος όρος* της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης του κύκλου φόρτισης:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Επίσης, πολύ συχνά στην ανάλυση προβλημάτων δυναμικών καταπονήσεων και κόπωσης χρησιμοποιούνται δύο ακόμη μεγέθη. Το ένα είναι η *αναλογία τάσεων* (stress ratio), η οποία ορίζεται ως εξής:

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

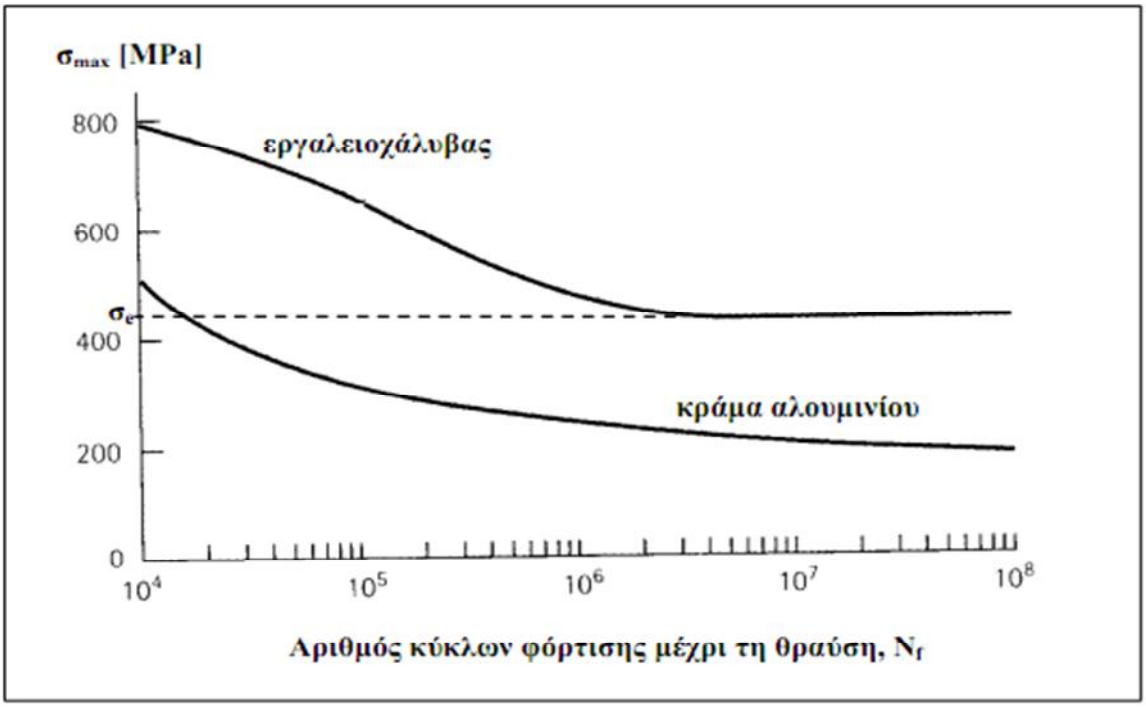
Το άλλο μέγεθος είναι η αναλογία εύρους τάσεων (amplitude ratio), που ορίζεται ως εξής:

$$A = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

6.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SCF ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΡΑΥΣΗΣ

Η μηχανική θραύσης αποτελεί την βάση για πολλές μοντέρνες μελέτες φαινομένων διάδοσης ρωγμών.

Η βασική μορφή με την οποία υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, σχετικά με την συμπεριφορά μεταλλικών υλικών σε κόπωση, είναι οι *καμπύλες S – N* ή, όπως είναι πιο γνωστές, οι *καμπύλες Wohler*. Οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται σε διαγράμματα που στον κατακόρυφο άξονα έχουν ένα μέγεθος ‘‘S’’ σχετιζόμενο με την τάση (συνηθέστερα κάποιο από τα σα, σ max ή σ min) ενώ στον οριζόντιο άξονα δείχνουν τον *αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση*, δηλαδή την *διάρκεια ζωής σε κόπωση* N, του υλικού. Ο άξονας του αριθμού κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση σχεδόν πάντοτε είναι εκφρασμένος σε λογαριθμική (log) κλίμακα. Κάθε καμπύλη S – N ενός υλικού ισχύει για την συγκεκριμένη τιμή μέσης τάσης (σm) και αναλογίας τάσεων (R) στην οποία έχουν διεξαχθεί οι αντίστοιχες δοκιμές κόπωσης. Εάν για το ίδιο υλικό πραγματοποιηθούν δοκιμές κόπωσης με διαφορετική τιμή σm ή/και R, η καμπύλη S – N που θα προκύψει δεν θα είναι ίδια με την προηγουμένη. Συνήθως, οι περισσότερες καμπύλες S – N των μεταλλικών υλικών προέρχονται από δοκιμές περιστρεφόμενου προβόλου, όπου σ = 0. Ωστόσο, επειδή στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές ισχύει ότι σm≠0 , ένα τυπικό διάγραμμα αυτού του είδους φαίνεται στο **Διάγραμμα 4**, στο οποίο υπάρχουν δύο καμπύλες S-N: μία που είναι χαρακτηριστική για σιδηρούχα κράματα (χάλυβες) και μία για μη σιδηρούχα κράματα (π.χ. κράματα αλουμινίου).



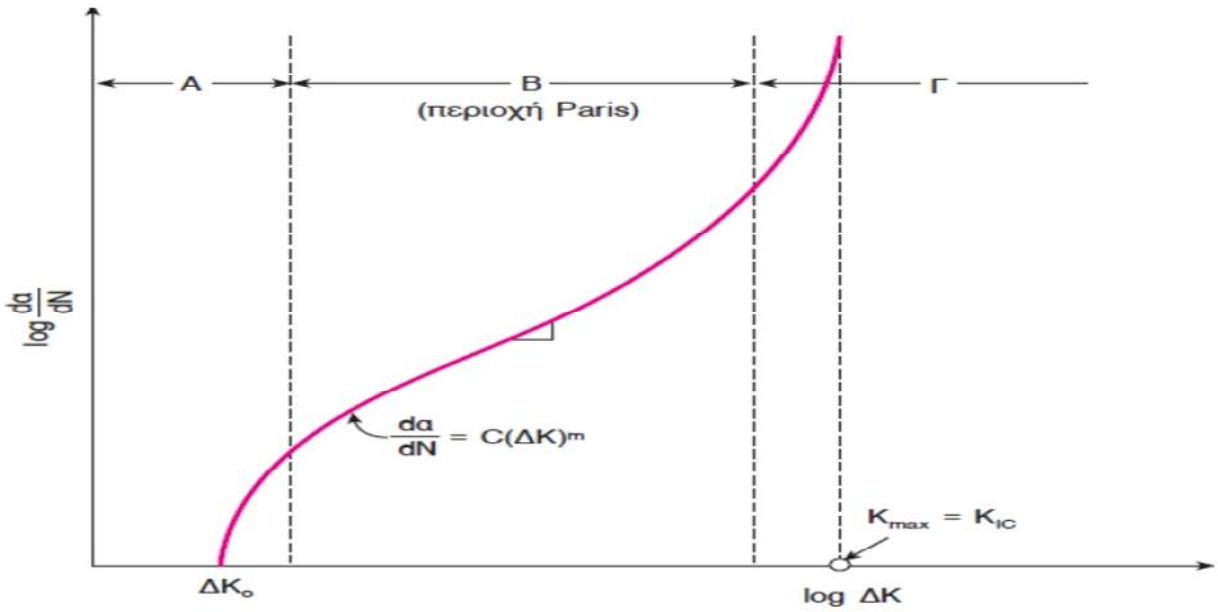
Διάγραμμα 4. Τυπικές καμπύλες Wohler μερικών μεταλλικών υλικών [13].

Αξίζει να προσέξει κανείς ότι οι καμπύλες S-N αναφέρονται σε θραύση λόγω κόπωσης μετά από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης, δηλαδή για Nf> 10_4 κύκλους. Στις περιπτώσεις αυτές οι

τάσεις σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι ελαστικές, με αποτέλεσμα μακροσκοπικά να μην προκαλείται πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η κόπωση αυτού του είδους ονομάζεται *πολυκυκλική κόπωση* (high cycle fatigue – HCF). Όταν οι εφαρμοζόμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, με συνέπεια αυτό σε κάθε κύκλο φόρτισης να υφίσταται ένα ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, τότε η διάρκεια ζωής σε κόπωση μειώνεται σημαντικά (Nf < 10_4 κύκλοι). Επειδή στις περιπτώσεις αυτές είναι δύσκολο να εκφραστεί η δυναμική καταπόνηση σε όρους τάσης, οι δοκιμές κόπωσης διεξάγονται έτσι, ώστε σε κάθε κύκλο φόρτισης να προσδίδεται στο υλικό ένα προκαθορισμένο ποσοστό ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, παρά μία προκαθορισμένη μεταβολή τάσης. Αυτό το είδος κόπωσης ονομάζεται *ολιγοκυκλική κόπωση* (low cycle fatigue – LCF).
Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι, η διάρκεια ζωής σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι τη θραύση) αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Μία δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τη μορφή των καμπυλών. Σε μεταλλικά υλικά μεγάλης πρακτικής σημασίας, όπως οι χάλυβες και το τιτάνιο, υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή τάσης (σe) κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται οριζόντια (**Διάγραμμα 4**). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από σe, τότε ουσιαστικά το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Με άλλα λόγια δεν κινδυνεύει να υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Για αυτό και η τάση σe ονομάζεται *όριο διαρκούς αντοχής* σε κόπωση (endurance limit).

Σχετικά με τον ***σχηματισμό και την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής*** κατά τα φαινόμενα SCC και SFC, μέχρι την ολική θραύση του υλικού, μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση βρίσκεται στον Νόμο του Paris.

Το διάγραμμα 5 δείχνει μία τυπική καμπύλη dα/dN – ΔK για ένα όλκιμο μεταλλικό υλικό. Και οι δύο άξονες του διαγράμματος εκφράζονται σε λογαριθμική (log) κλίμακα. Η καμπύλη διακρίνεται σε τρεις καλά καθορισμένες περιοχές. Στην περιοχή I τα ρήγματα παραμένουν σταθερά, δηλαδή δεν υπάρχει παρατηρήσιμη αύξηση του μεγέθους τους με αύξηση του ΔK. Η περιοχή I εκτείνεται μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή ΔK, η οποία ονομάζεται τάση ‘‘κατωφλίου’’ (threshold).
Η περιοχή II εμφανίζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από πρακτικής απόψεως, καθώς εδώ εμφανίζεται μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ του log(dα/dN) και του log(ΔK)



Διάγραμμα 5. Ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων (Διάγραμμα Paris) [13].

Στην παρακάτω εξίσωση, m είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης (περιοχή ΙΙ), η οποία για τους χάλυβες είναι περίπου ίση με 3, ενώ για τα κράματα αλουμινίου κυμαίνεται μεταξύ 3 και 4. Η Εξίσωση αυτή, που περιγράφει την περιοχή ΙΙ του διαγράμματος, είναι γνωστή και ως *νόμος του Paris*.

Τέλος, στην περιοχή ΙΙΙ τα ρήγματα γίνονται ασταθή και ο ρυθμός προώθησής τους αυξάνεται ραγδαία. Εδώ πλέον η τιμή του Kmax αρχίζει να προσεγγίζει τον κρίσιμο παράγοντα έντασης τάσεων του υλικού Kc.
Η τελική θραύση του υλικού θα συμβεί όταν **Kmax = Kc**

Το K εξαρτάται ιδιαίτερα από τη γεωμετρία του αντικειμένου που περιέχει τα ρήγματα και όχι μόνο από το υλικό του.

$$\frac{d\alpha}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Β. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

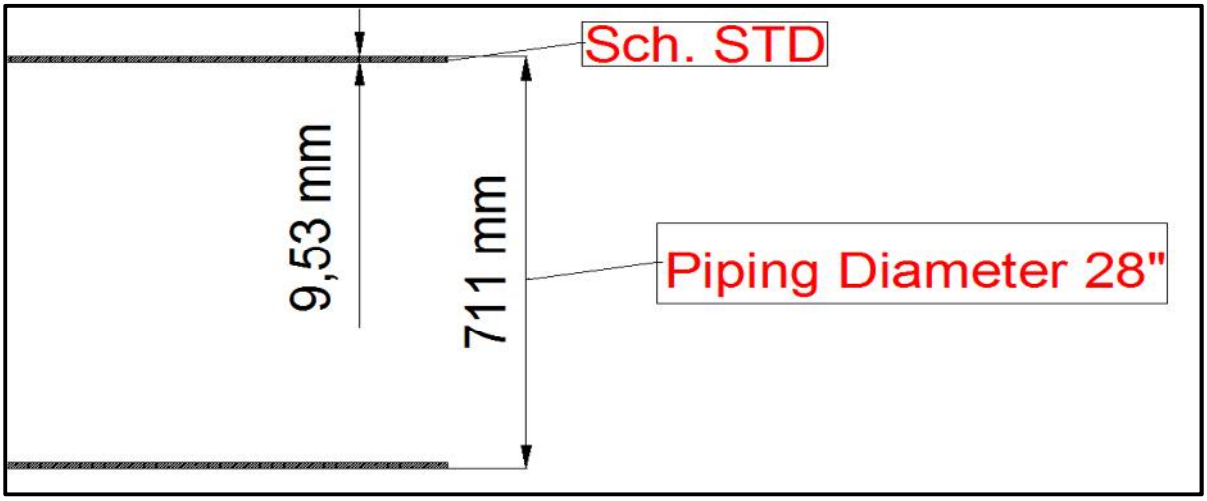
1.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Diamètre nominal Nominal size	Diamètre extérieur Outside diameter		Épaisseur Wall thickness		Masse Weight		Specif. API	Identification Épaisseur W.T.
pouces inches	pouces inches	mm	pouces inches	mm	lb/ft	kg/m		STD XS XXS
26	26.000	660	0.250	6,35	68.75	102,36	5L	
	26.000	660	0.281	7,14	77.18	114,95	5L	
	26.000	660	0.312	7,92	85.60	127,36	5L	
	26.000	660	0.344	8,74	94.26	140,37	5L	
	26.000	660	0.375	9,53	102.63	152,87	5L	STD
	26.000	660	0.406	10,31	110.98	165,18	5L	
	26.000	660	0.438	11,13	119.57	178,09	5L	
	26.000	660	0.469	11,91	127.88	190,34	5L	
	26.000	660	0.500	12,70	136.17	202,72	5L	XS
	26.000	660	0.562	14,27	152.68	227,23	5L	
	26.000	660	0.625	15,88	169.38	252,24	5L	
	26.000	660	0.688	17,48	185.99	276,96	5L	
	26.000	660	0.750	19,05	202.25	301,10	5L	
	26.000	660	0.812	20,62	218.43	325,12	5L	
	26.000	660	0.875	22,23	234.79	349,62	5L	
	26.000	660	0.938	23,83	251.07	373,84	5L	
	26.000	660	1.000	25,40	267.00	397,49	5L	
28	28.000	711	0.250	6,35	74.09	110,34	5L	
	28.000	711	0.281	7,14	83.19	123,93	5L	
	28.000	711	0.312	7,92	92.26	137,32	5L	
	28.000	711	0.344	8,74	101.61	151,36	5L	
	28.000	711	0.375	9,53	110.64	164,85	5L	STD
	28.000	711	0.406	10,31	119.65	178,15	5L	
	28.000	711	0.438	11,13	128.93	192,09	5L	
	28.000	711	0.469	11,91	137.90	205,32	5L	
	28.000	711	0.500	12,70	146.85	218,69	5L	XS

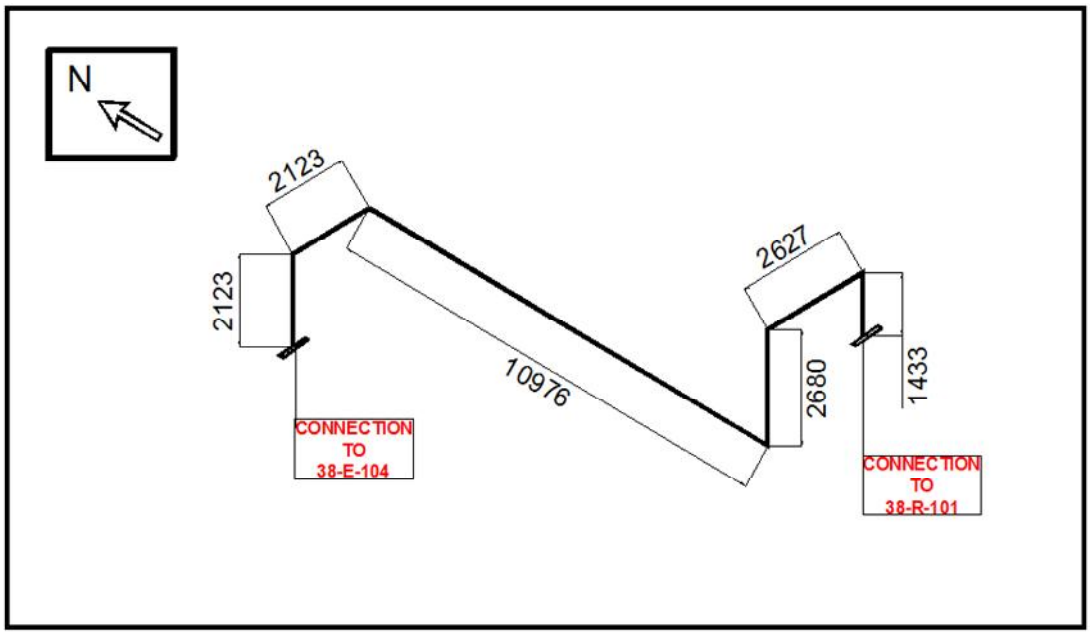
Εικόνα 35. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σωλήνωσης βάσει διεθνούς πίνακα τιμών.

ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ



Εικόνα 36. Σχεδιαστική απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών σωλήνωσης.

ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

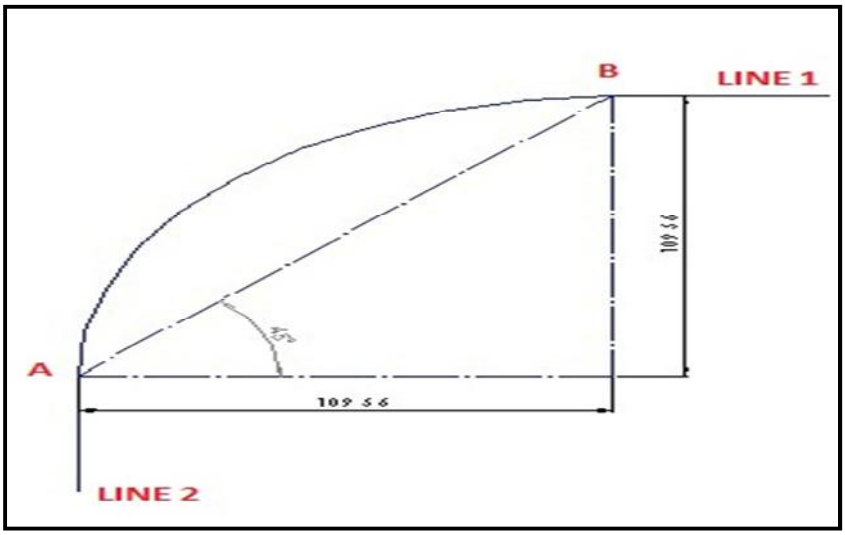


Εικόνα 37.Ισομετρική σχεδίαση της υπό μελέτη σωλήνωσης

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕ SPLINES ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ

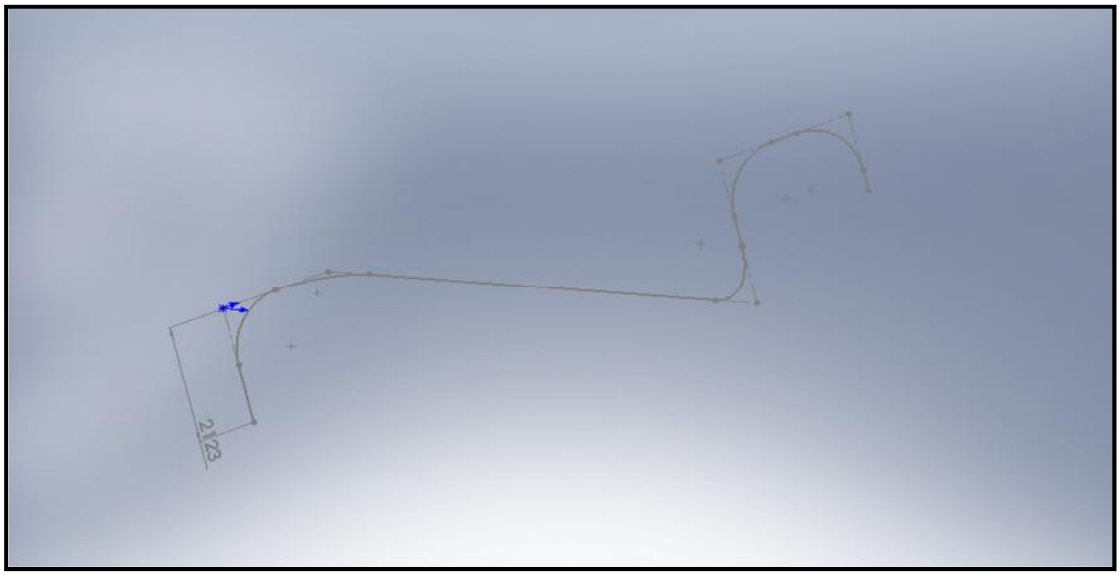
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Η αλλαγή κατεύθυνσης στην όδευση της σωλήνωσης γίνεται με την βοήθεια καμπυλών (Elbows) 90° , η σχεδίαση των οποίων φαίνεται παρακάτω. Η καμπύλη είναι εφαπτομένη των γραμμών 1, 2 στα σημεία B και A αντίστοιχα και έχει ακτίνα $AB \times \sqrt{2}/2$.



Εικόνα 38. Σχεδίαση καμπύλης σωληνώσεων με απλές μεθόδους

Με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιώντας όλα τα δυνατά επίπεδα σχεδίασης, το ισομετρικό σχέδιο της εικόνας 37 παίρνει την εξής μορφή στον χώρο:



Εικόνα 39. Γραμμική απεικόνιση σωλήνωσης στον χώρο.

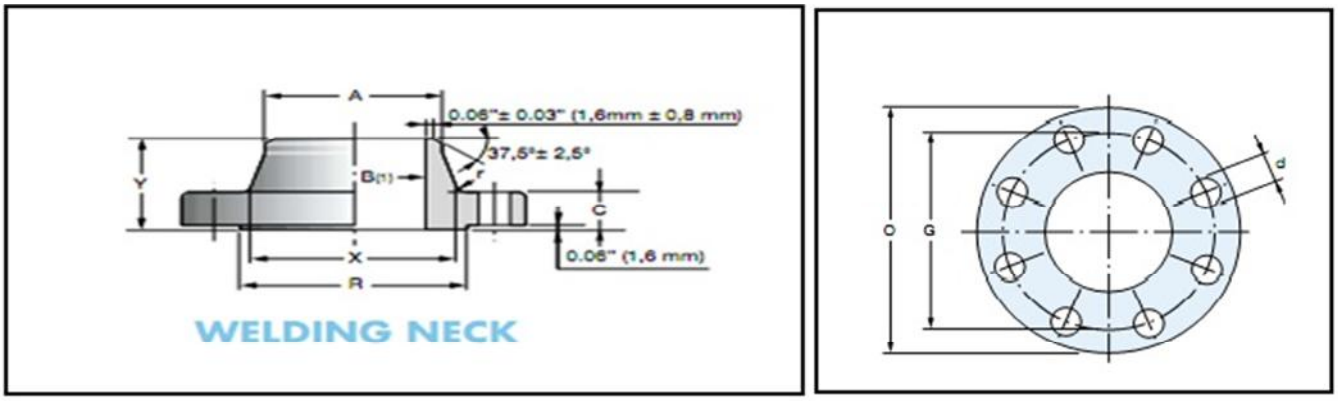
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΛΑΝΤΖΩΝ

Ο σχεδιασμός των φλαντζών της σωλήνωσης έγινε βάσει του παρακάτω πίνακα τιμών του ASME B 16.47-1996-SERIE A:

DIAMETER	O	d	G	Y	A	R	X	C
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
28"	927,1	34,9	863,6	125,5	711,2	800,1	726,9	71,4

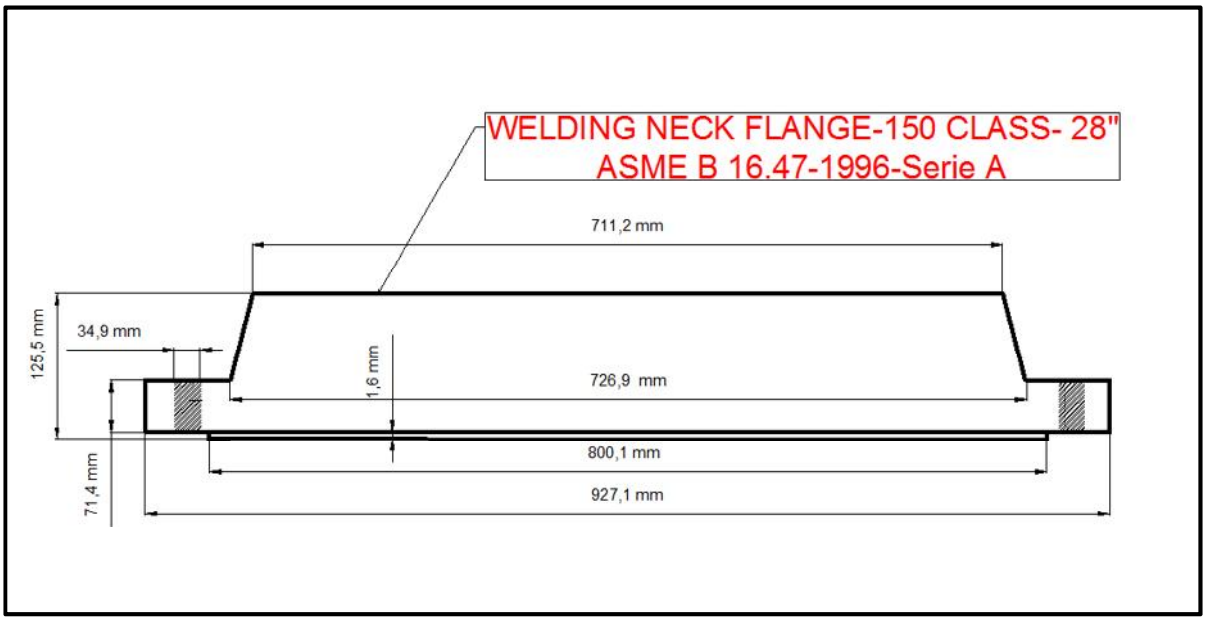
Πίνακας 3. Πίνακας τιμών των παραμέτρων της φλάντζας για τη συγκεκριμένη σωλήνωση.

Όπου:



Εικόνα 40. Γεωμετρική απεικόνιση φλαντζας.

ΠΡΟΟΨΗ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΛΑΙΜΟΥ:

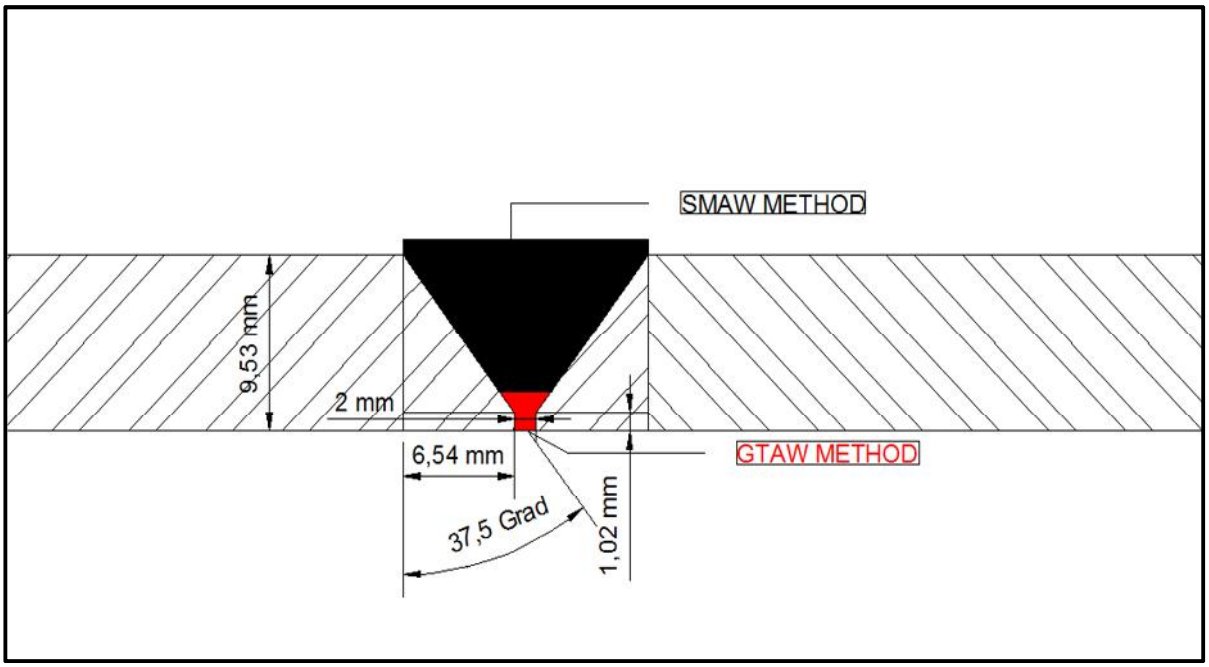


Εικόνα 41. Πρόοψη φλάντζας λαιμού της συγκεκριμένης σωλήνωσης.

1.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ.

Οι συγκολλήσεις στην σωλήνωση που μελετάμε είναι γωνιακές συγκολλήσεις τύπου V [8] όπου για την συγκόλληση της ρίζας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μη αναλώσιμου ηλεκτροδίου Βολφραμίου παρουσία Argon (GTAW) και για την ολοκλήρωση της (γέμισμα συγκόλλησης) η μέθοδος απλού ηλεκτροδίου (SMAW).

Η γεωμετρία των συγκεκριμένων συγκολλήσεων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

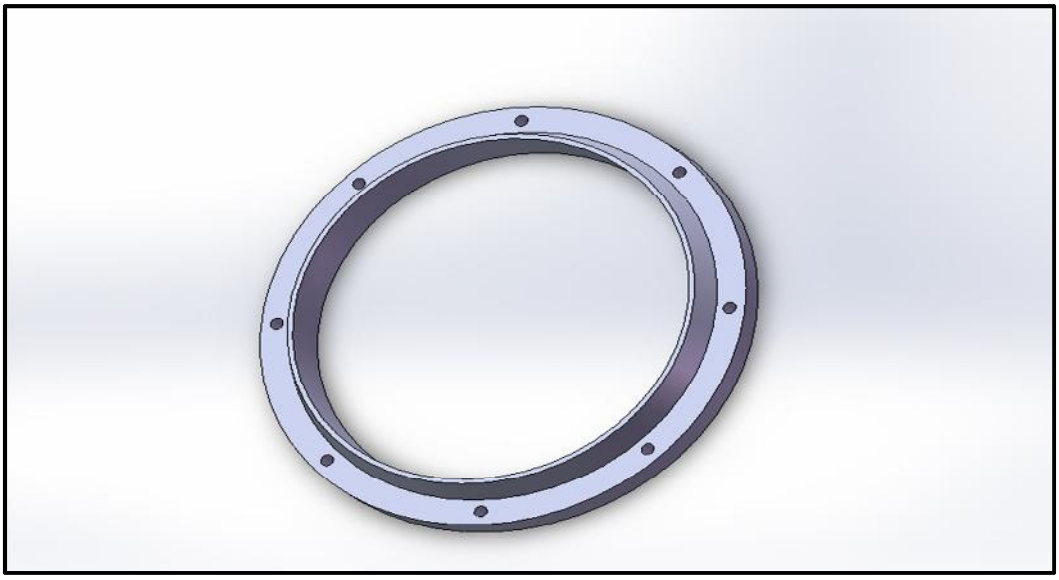


Εικόνα 42. Γεωμετρία συγκολλήσεων σωλήνωσης.

1.3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ:

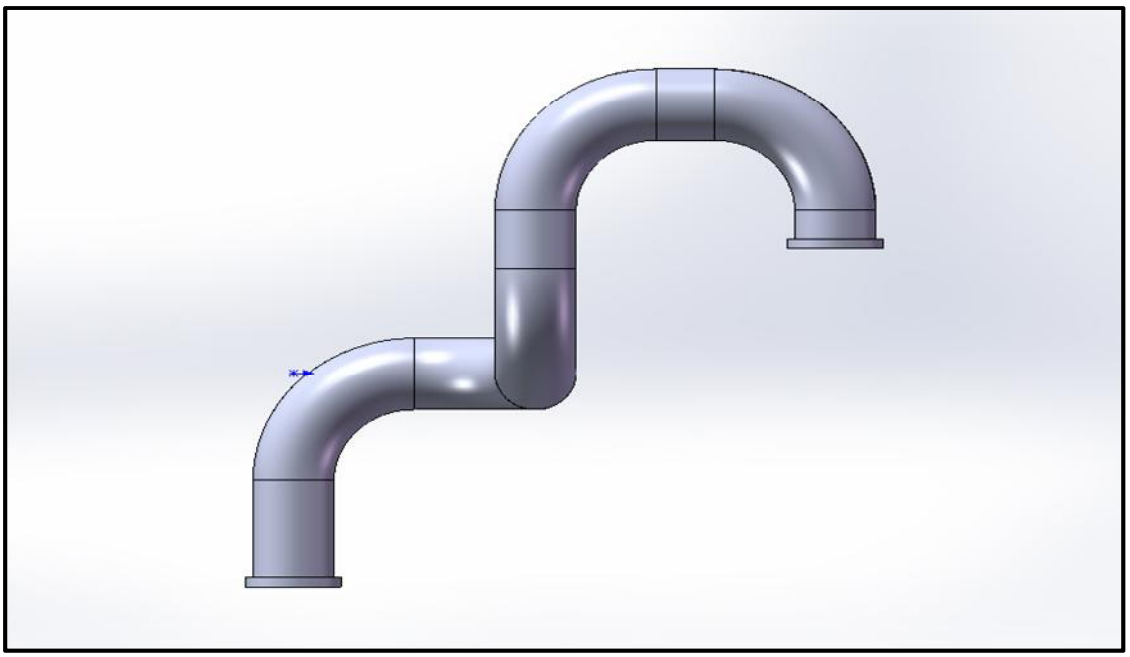
Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω στοιχεία φτάνουμε στην τελική σχεδίαση της σωλήνωσης.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΦΛΑΝΤΖΩΝ



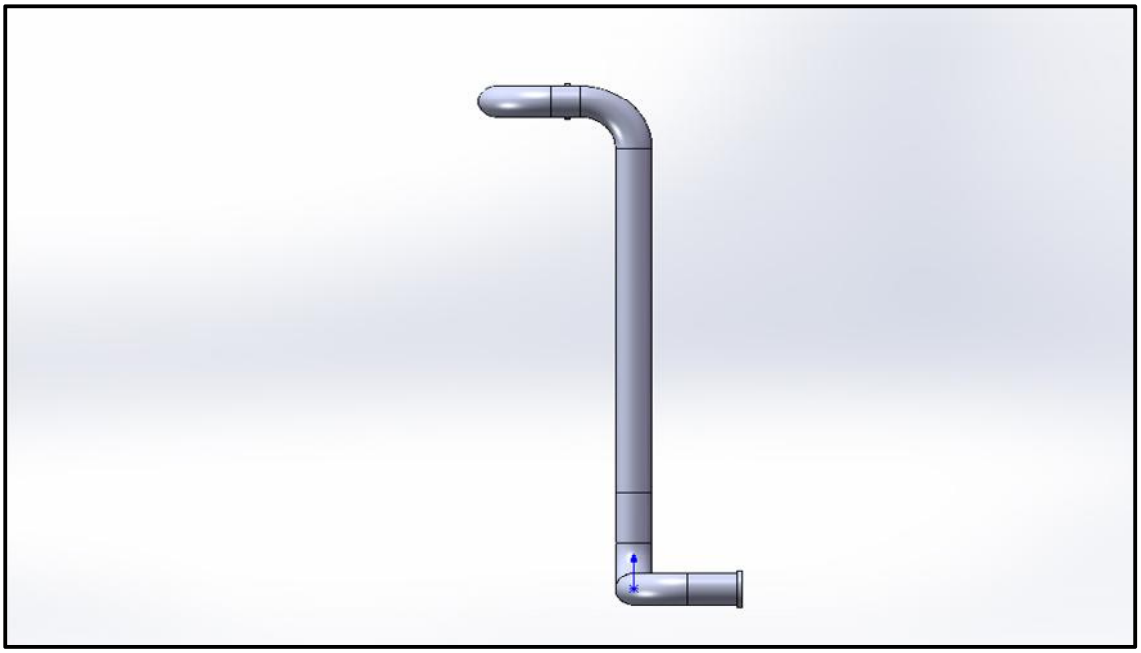
Εικόνα 43. Τρισδιάστατη απεικόνιση φλάντζας λαιμού.

Πρόοψη:



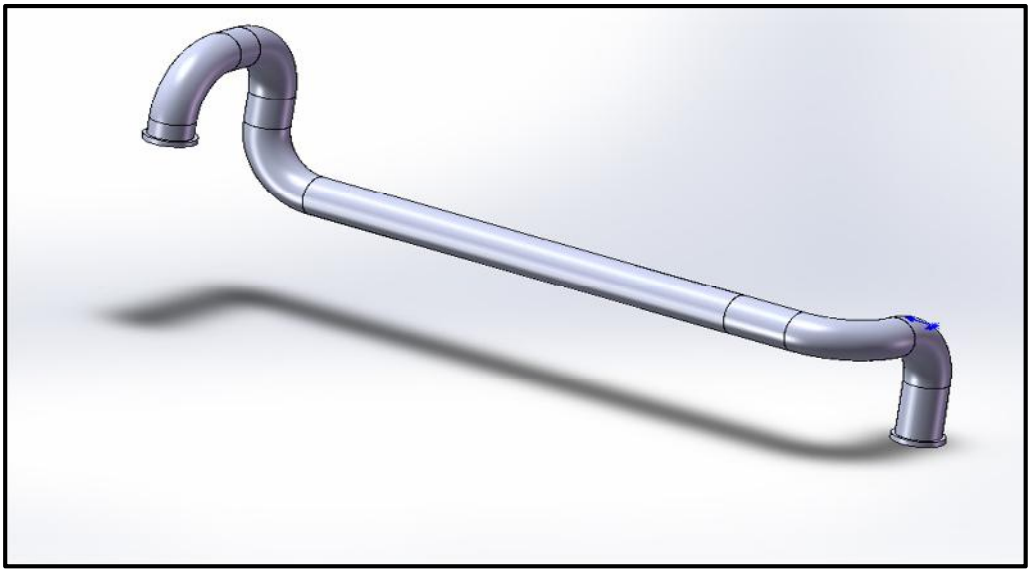
Εικόνα 44.Πρόοψη σωλήνωσης

Κάτοψη:



Εικόνα 45.Κάτοψη σωλήνωσης

Ισομετρική απεικόνιση:



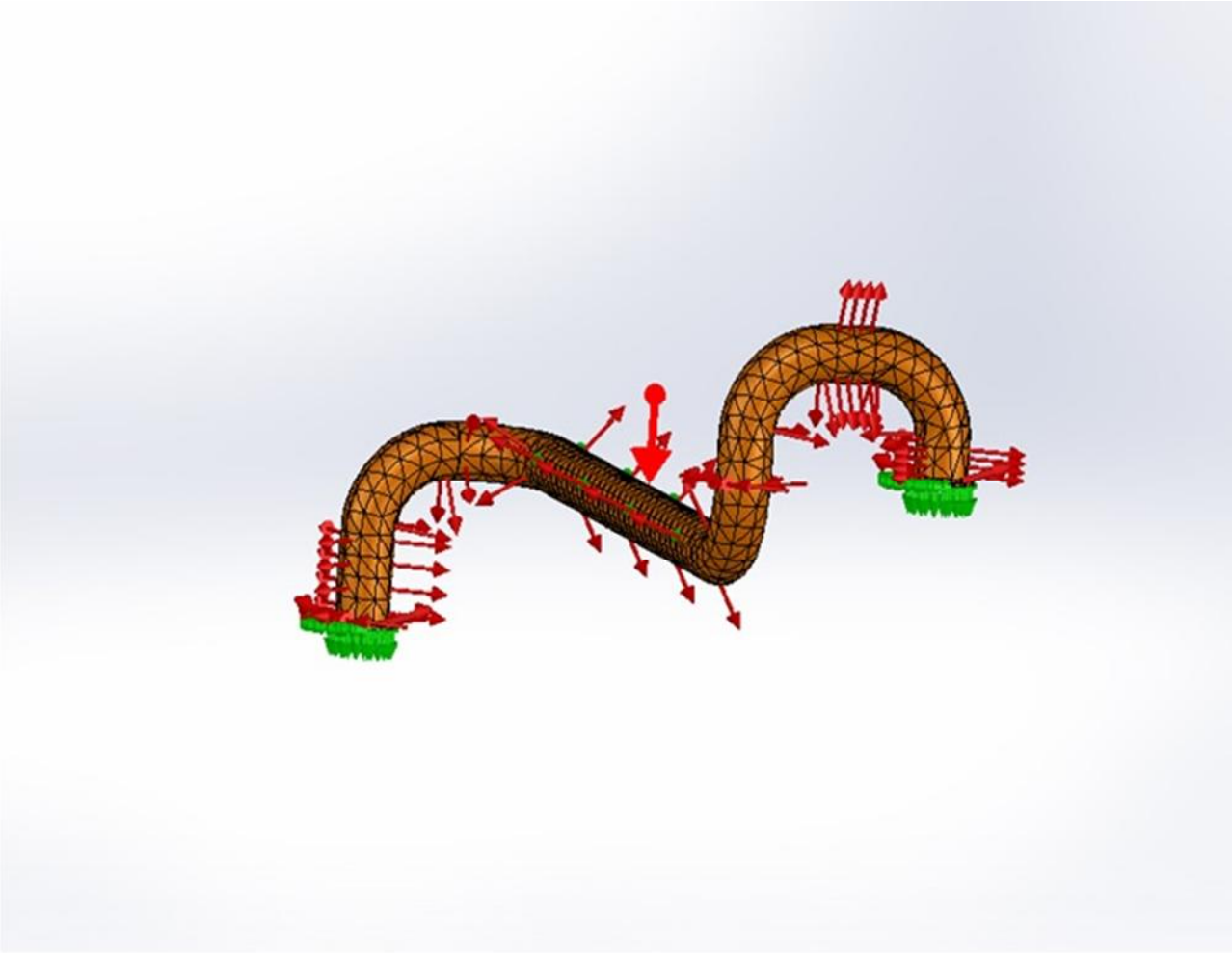
Εικόνα 46. Ολοκληρωμένη απεικόνιση σωλήνωσης στον χώρο.

Γ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Στην σωλήνωση της εικόνας 46, θεωρούμε πακτωμένα τα δύο φλαντζωτά άκρα και εφαρμόζουμε τις συνθήκες λειτουργίας: Εσωτερική πίεση 0,3 kg/cm² (= 0,3/10,1972= 0.02941 Mpa). Κατά μήκος της σωλήνωσης (οριζόντιο τμήμα) εφαρμόζεται κύληση.

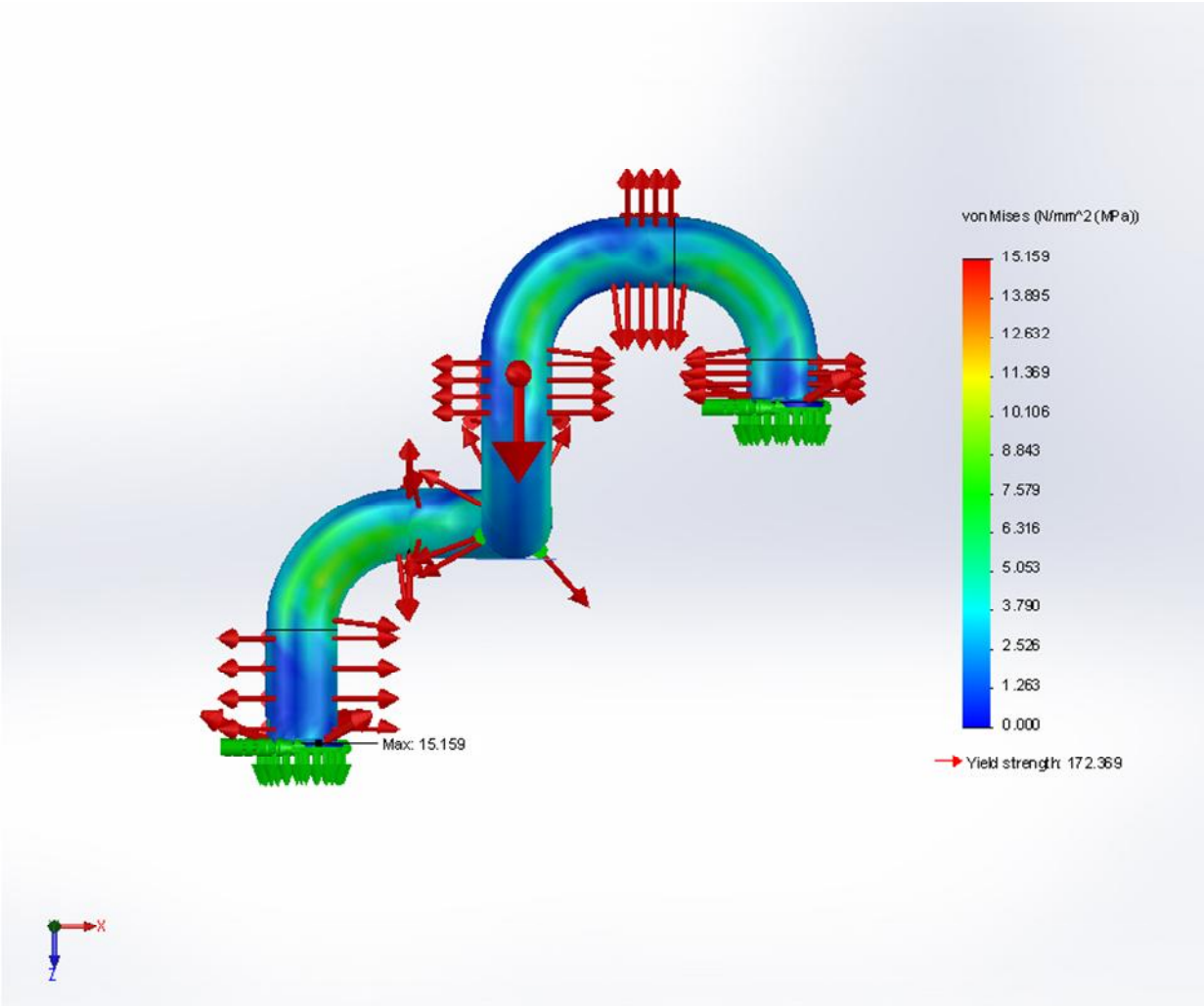
Η σχεδιαστική απεικόνιση των παραπάνω παραμέτρων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 47), ενώ στην εικόνα 48 φαίνεται αναλυτικά η κατανομή των τάσεων Von Misses στην σωλήνωση:



Εικόνα 47. Εφαρμογή οριακών συνθηκών και συνθηκών λειτουργίας στη σωλήνωση.

1.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ

Όπως φαίνεται στην εικόνα 48 η περιοχή με την μέγιστη κατανομή τάσεων είναι χαμηλά στην φλαντζωτή σύναρμογή της σωλήνωσης με τον αντιδραστήρα και ισοδυναμεί με **15,159 Mpa**, τη



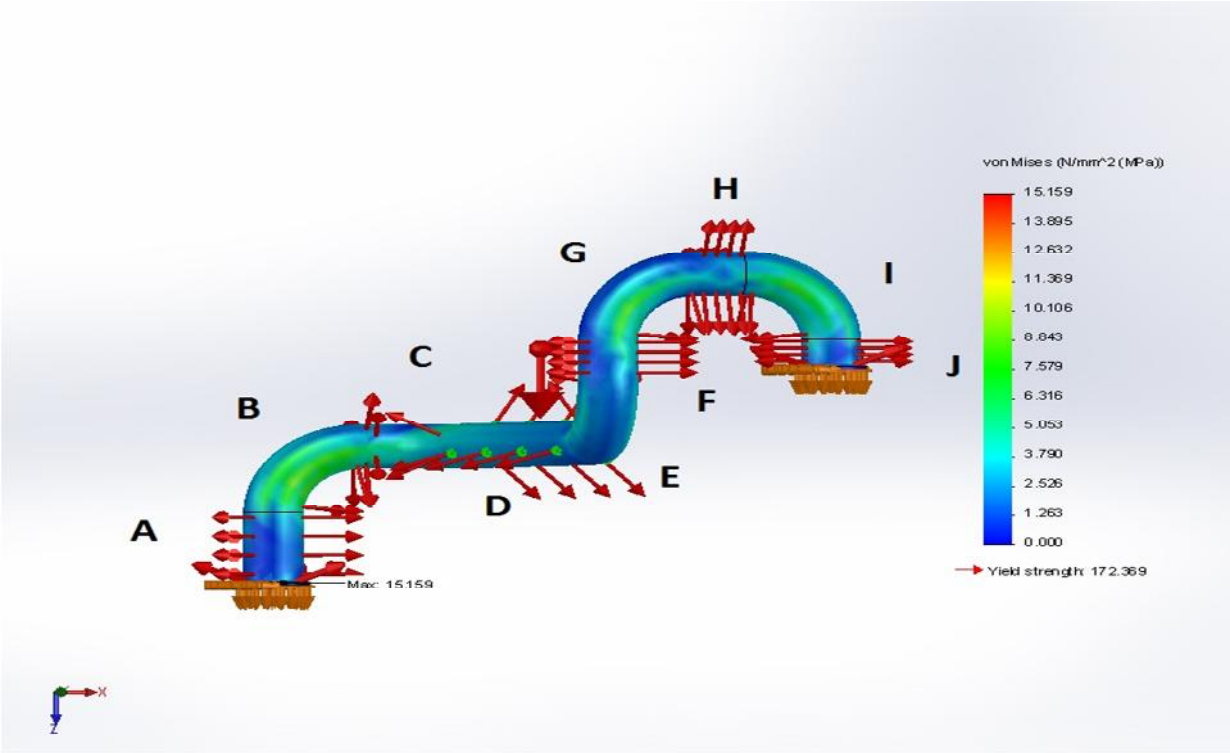
Εικόνα 48. Ανάλυση τάσεων στη σωλήνωση (Πρόοψη)

στιγμή που το όριο διαρροής του συγκεκριμένου υλικού (AISI 316 Stainless Steel SS) είναι στα 172,369 Mpa. Βρισκόμαστε δηλαδή ακόμα στην ελαστική περιοχή, όπου η τάση με την παραμόρφωση έχουν γραμμική σχέση μεταξύ τους και δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος αστοχίας, από την επιβολή των δεδομένων συνθηκών λειτουργίας.

Πέραν αυτής της περιοχής όμως, όπως παρατηρούμε στην εικόνα 48 παρουσιάζεται κατανομή τάσεων στις καμπύλες της σωλήνωσης (Πίνακας 4) κάτι που στις περιοχές της συγκόλλησης δημιουργεί διαρκές εφελκυστικό περιβάλλον. Όπως προαναφέρθηκε σε άλλο εδάφιο της μεταπτυχιακής εργασίας,

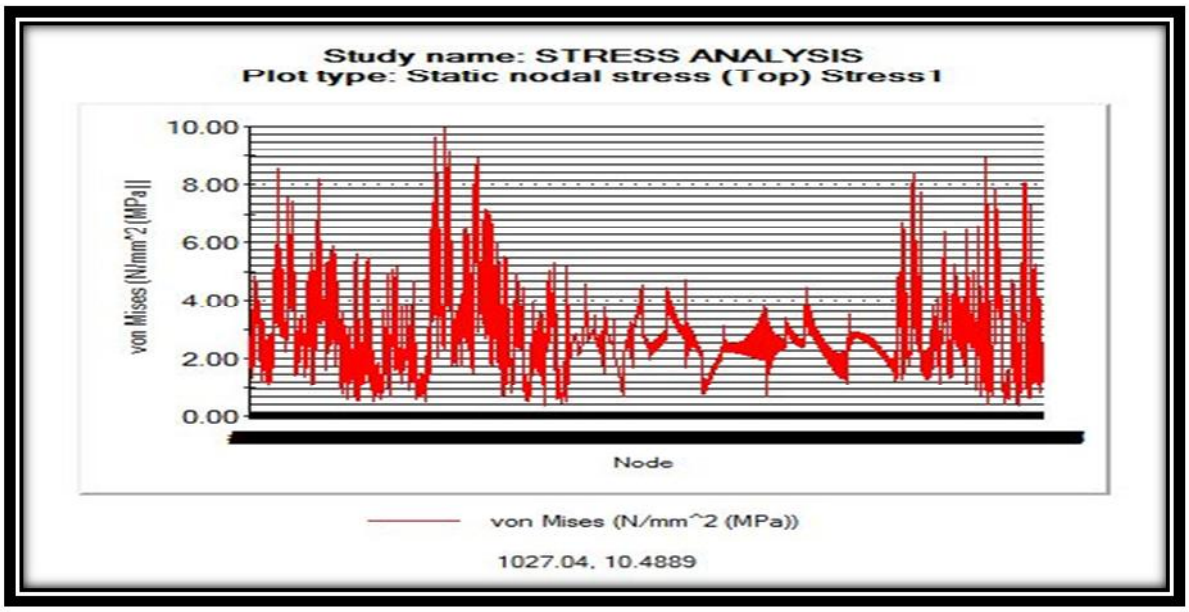
οι εφελκυστικές τάσεις, παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος μπορούν να δημιουργήσουν (ειδικά στους ανοξείδωτους χάλυβες) τις συνθήκες για ταχεία ανάπτυξη του SCC.

Αναφορικά με την εικόνα 49, για την περιοχή που βρίσκεται η μέγιστη κατανομή τάσεων πλύν των πακτώσεων, ακολουθεί η ανάλυση στο επόμενο υποκεφάλαιο.



Εικόνα 49. Διαχωρισμός σωλήνωσης σε επιμέρους περιοχές με σκοπό την ανάλυση τάσεων σε κάθε μια από αυτές και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το διάγραμμα των τάσεων για όλη την σωλήνωση, αν από αυτή εξαιρέσουμε τις πακτώσεις (φλάντζες) φαίνεται παρακάτω.Είναι φανερό πως η μέγιστη τάση Von Misses σε αυτή την περιοχή, είναι στα 9,52 Mpa.

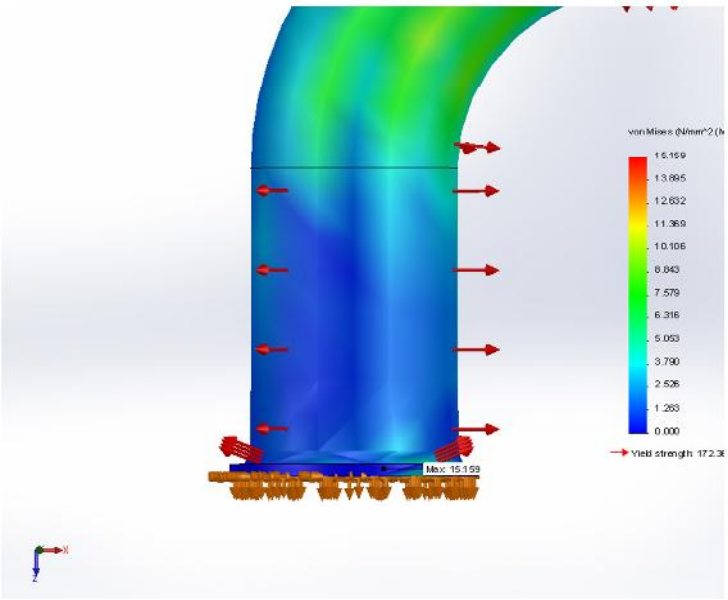


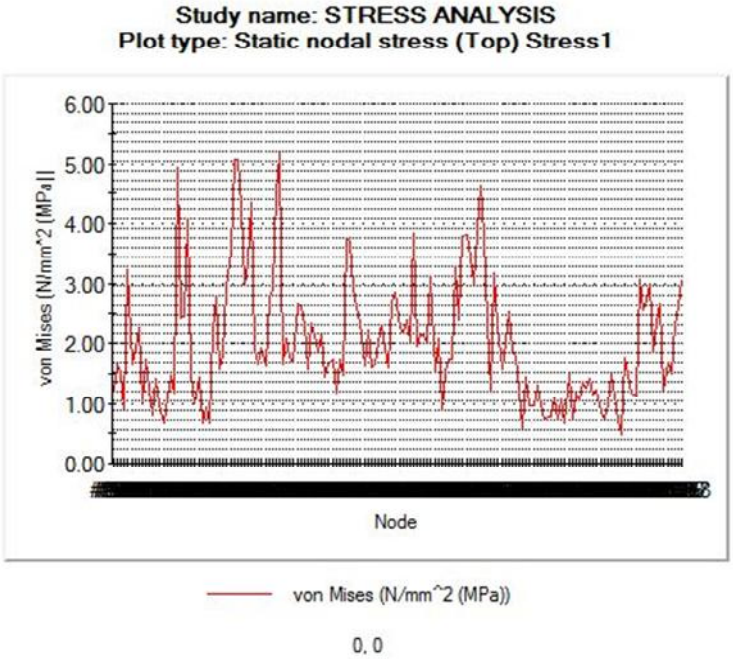
Διάγραμμα 6. Διάγραμμα τάσεων σωλήνωσης εκτός φλαντζωτών συνδέσεων

1.1.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ.

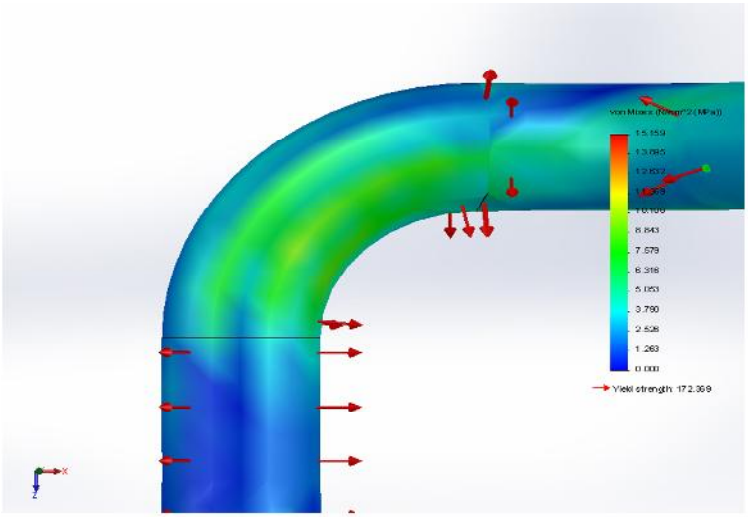
Στο συγκεκριμένο εδάφιο παρατίθεται η λεπτομερής ανάλυση τάσεων κάθε περιοχής της εικόνας 40, με σκοπό να διακρίνουμε ποια από αυτές έχει την μεγαλύτερη συσσώρευση τάσεων, ποια την μικρότερη και ποια τον μεγαλύτερο μέσο όρο τάσεων , εξάγοντας τα σχετικά διαγράμματα.

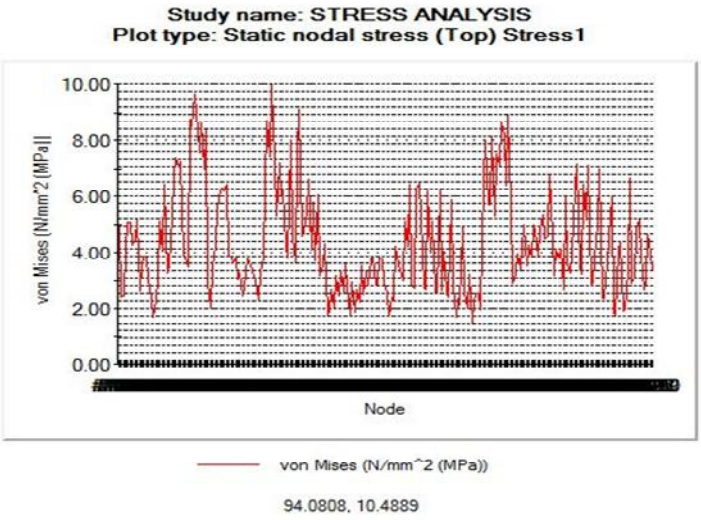
ΠΕΡΙΟΧΗ Α



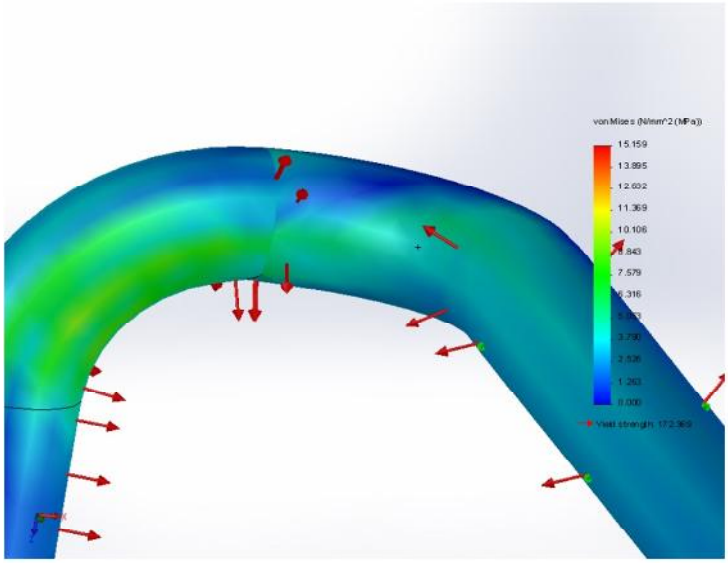


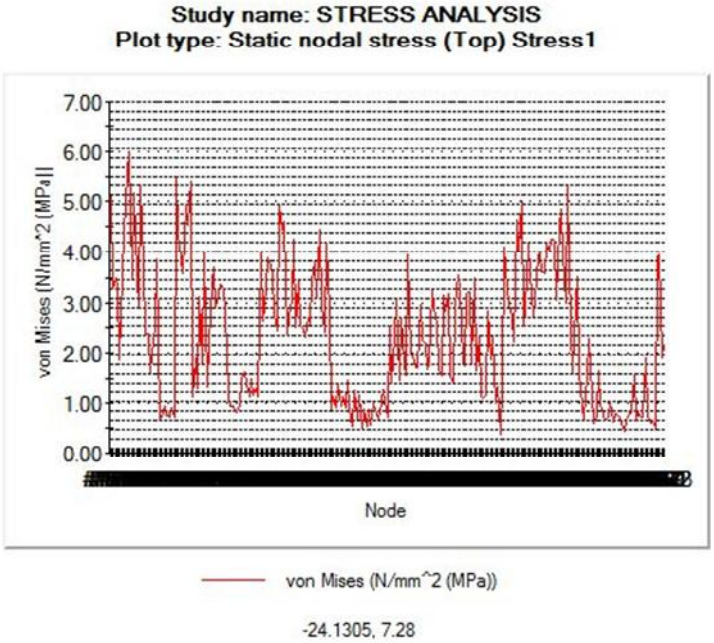
ΠΕΡΙΟΧΗ Β



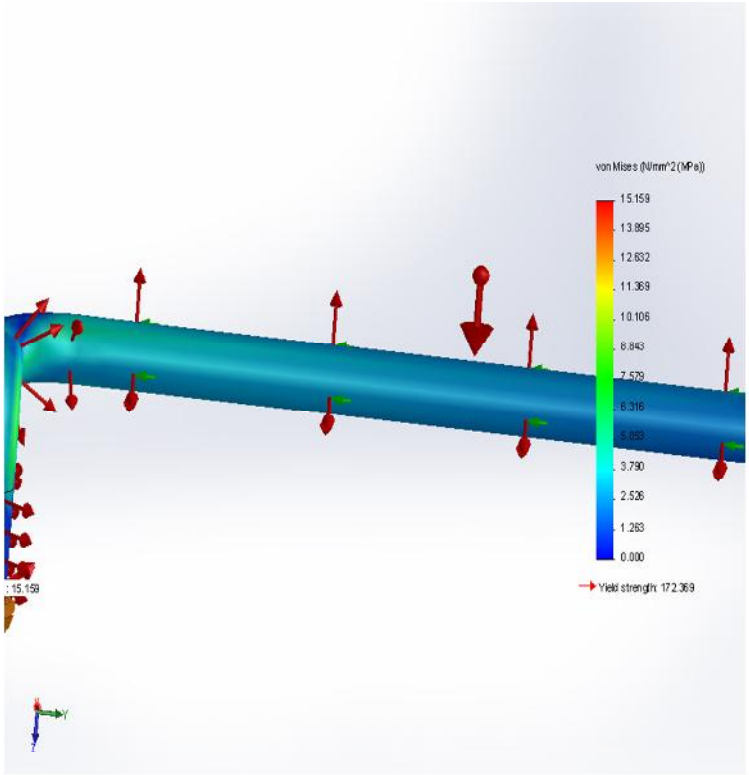


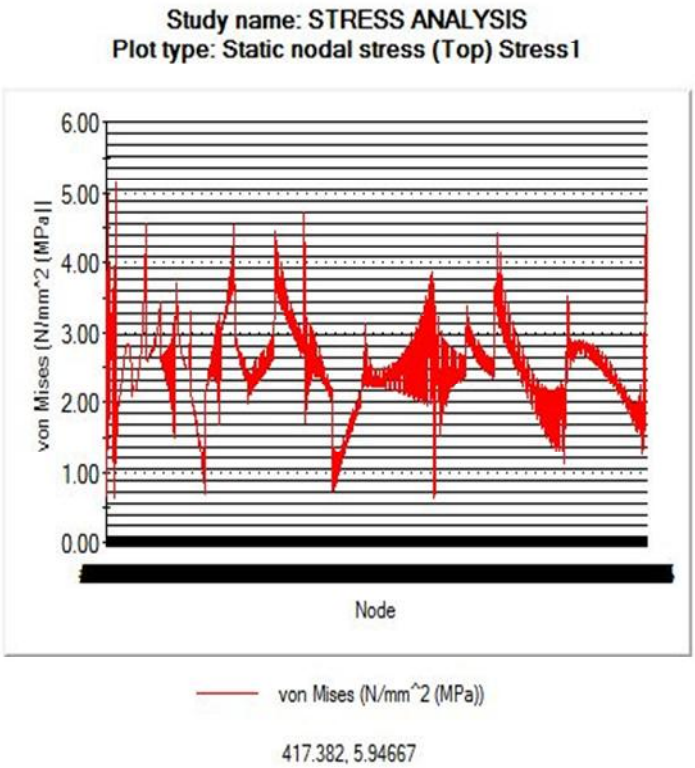
ΠΕΡΙΟΧΗ C



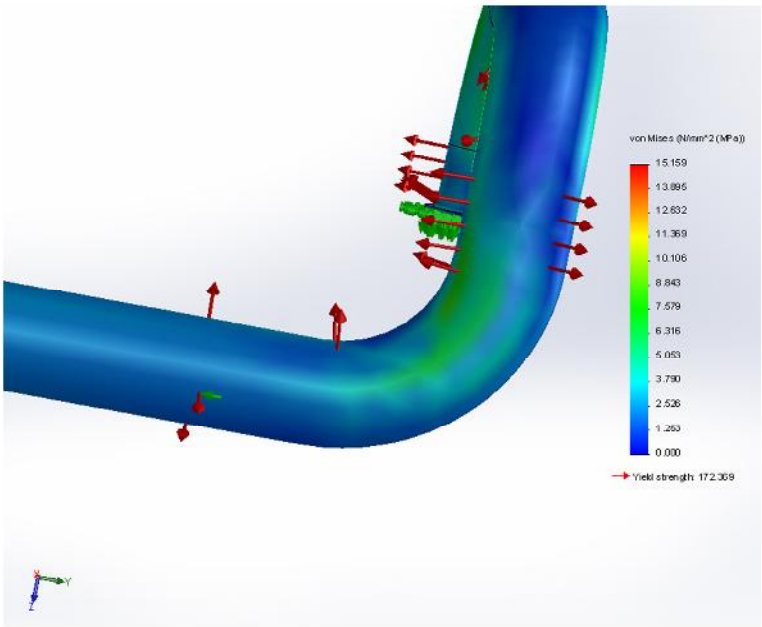


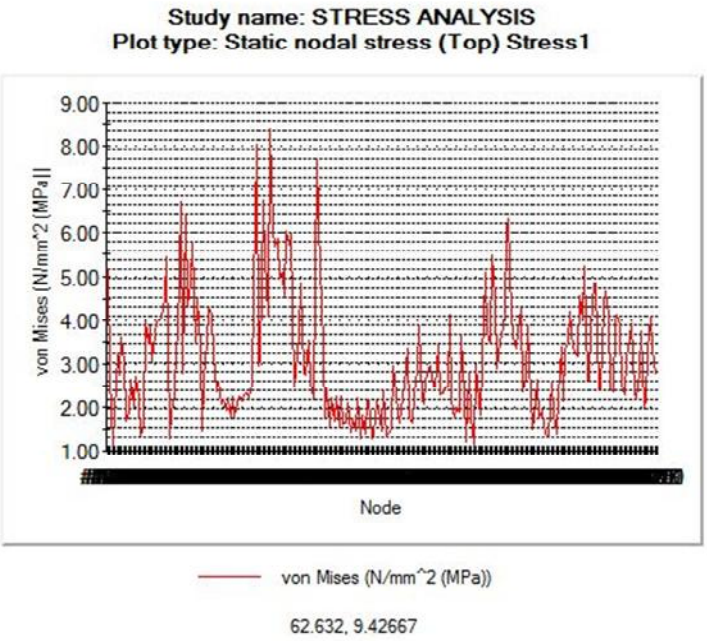
ΠΕΡΙΟΧΗ D



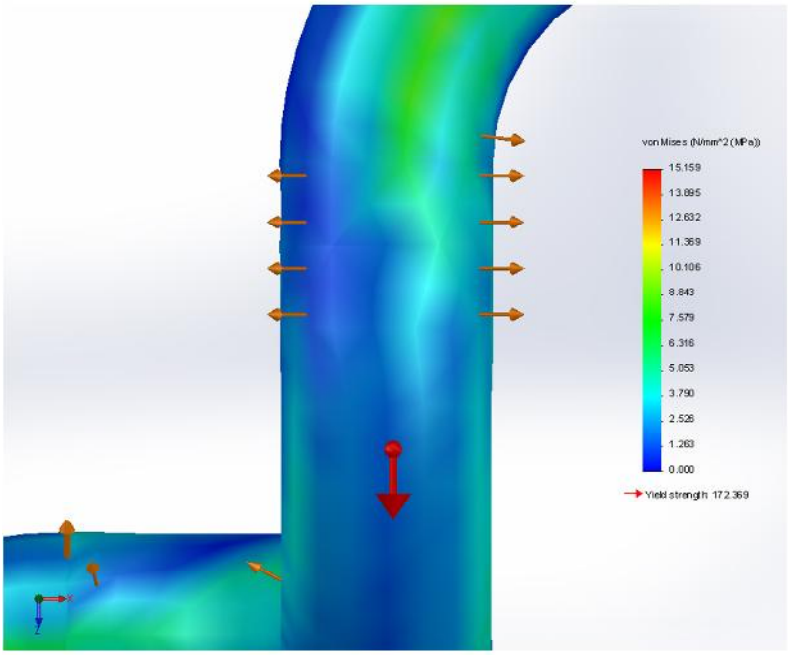


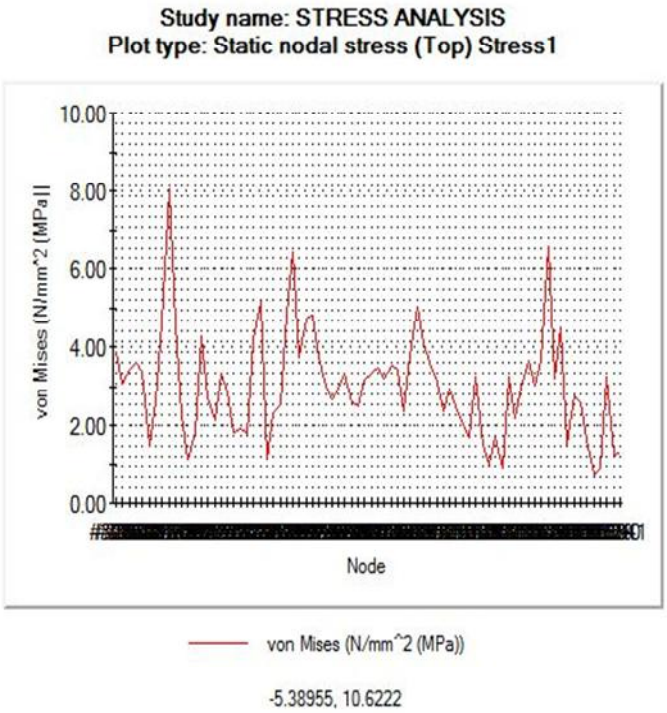
ΠΕΡΙΟΧΗ Ε



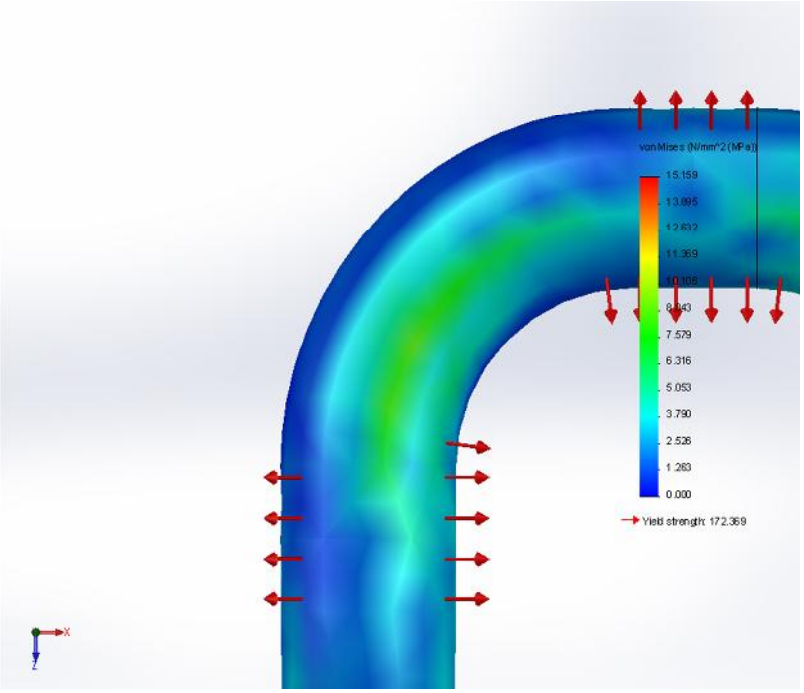


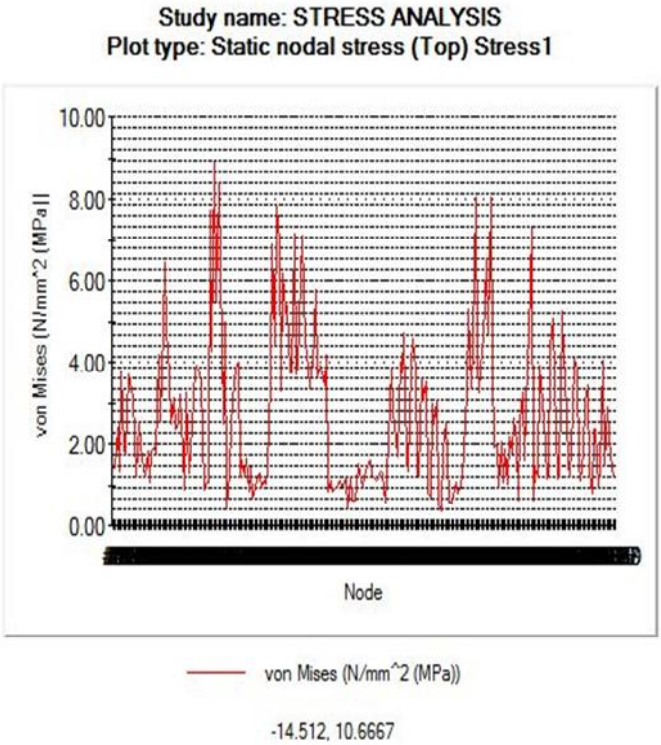
ΠΕΡΙΟΧΗ F



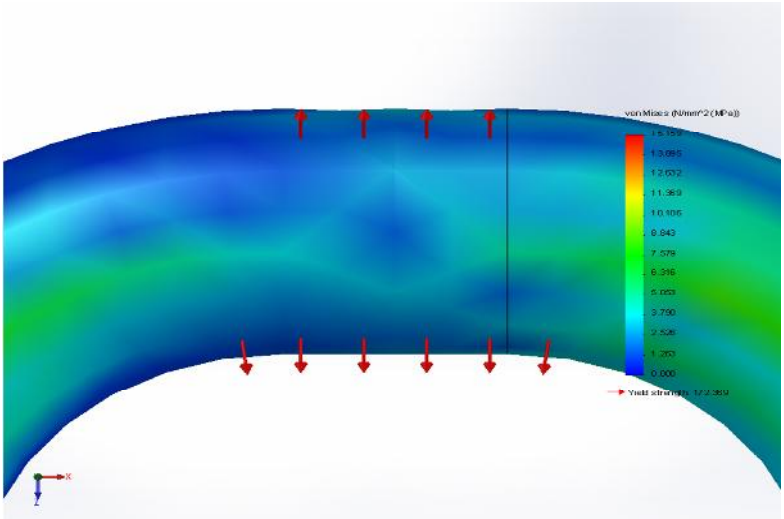


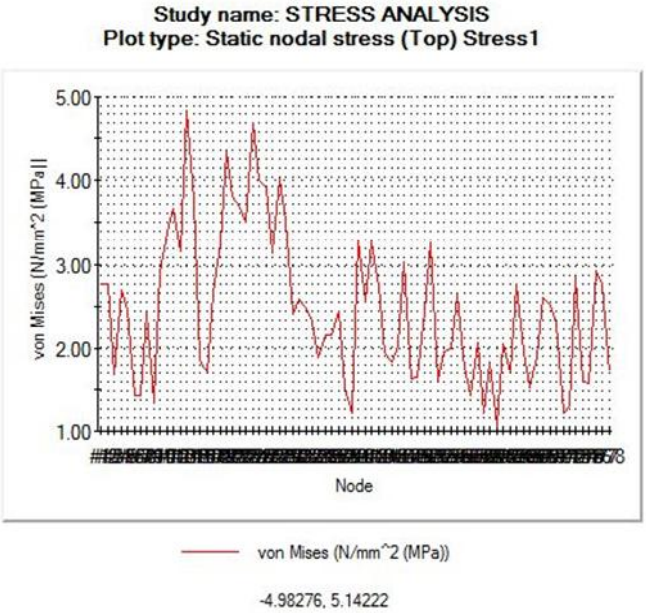
ΠΕΡΙΟΧΗ G



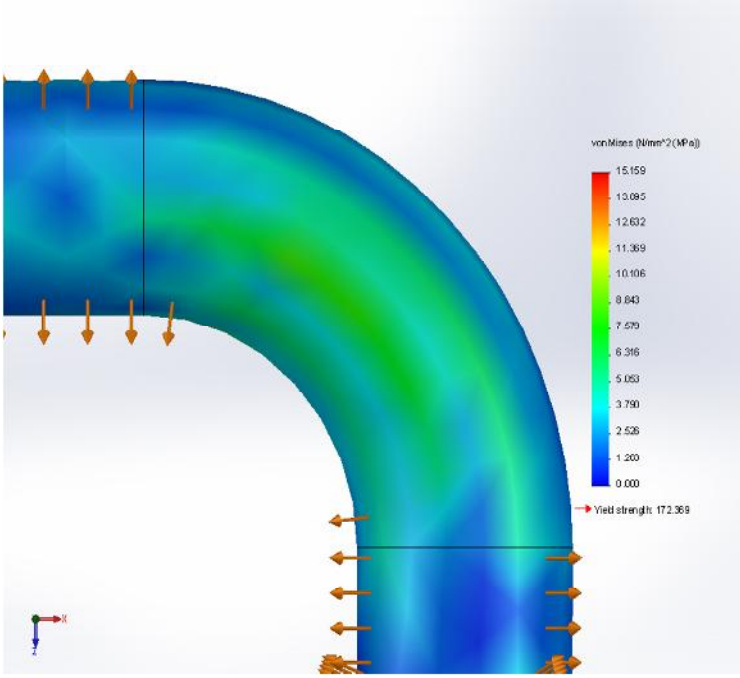


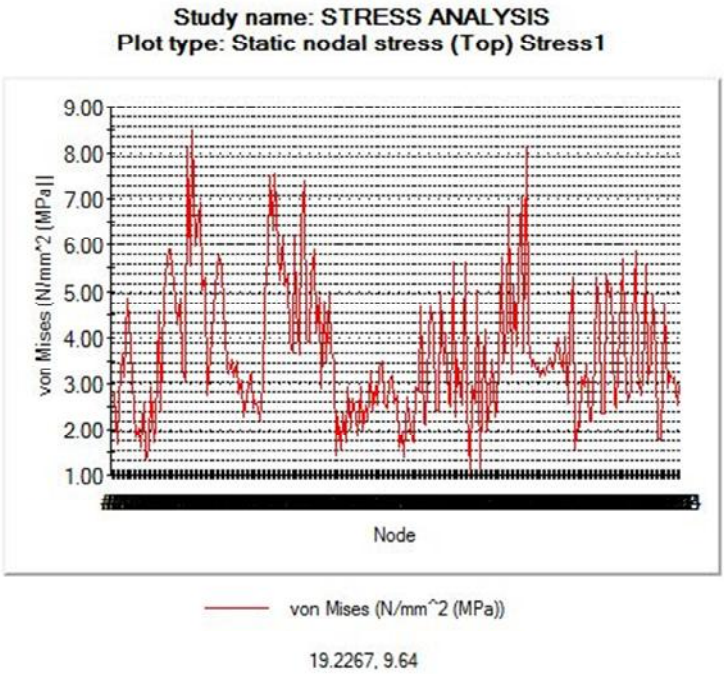
ΠΕΡΙΟΧΗ H



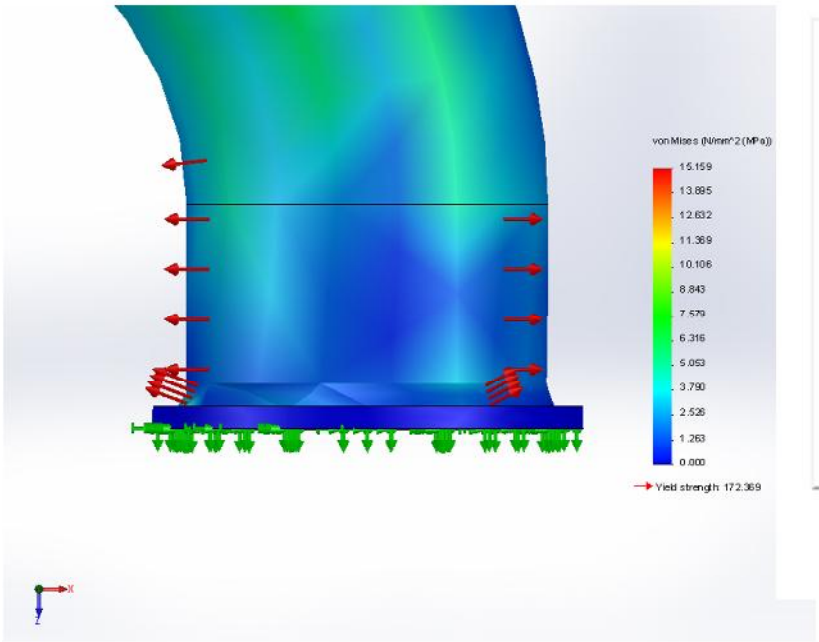


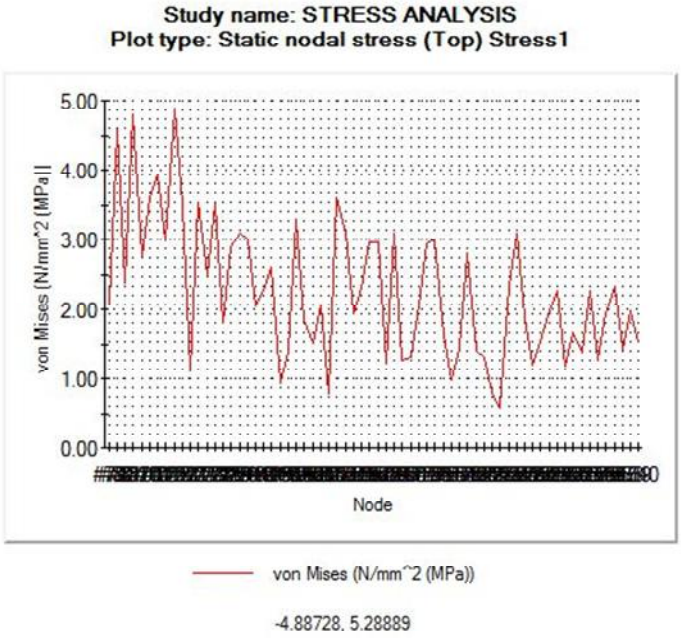
ΠΕΡΙΟΧΗ Ι





ΠΕΡΙΟΧΗ J





1.1.2. ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

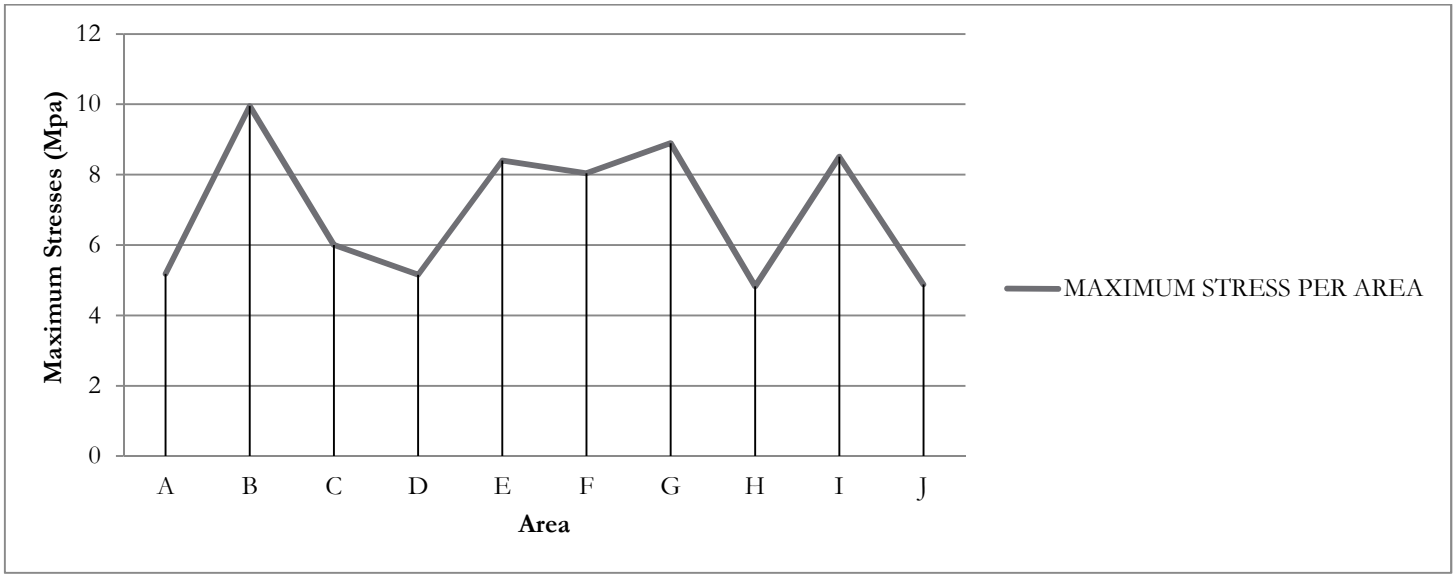
Από την ανάλυση κάθε περιοχής συνολικά προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας μέγιστων,ελάχιστων και συγκέντρωσης τάσεων ανα περιοχή της σωλήνωσης.

STRESS ANALYSIS RESULTS	AREA ANALYSIS (Mpa)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	TOTAL
Sum	329,18	1019,7	553,6	2765,2	719,04	235,81	630,64	192,37	851,34	149,5	7015,7
Avg	2,032	4,3576	2,3359	2,4912	3,0728	3,0232	2,695	2,4663	3,6382	2,2651	2,7851
Max	5,1775	9,952	6,0047	5,1543	8,3994	8,0398	8,8983	4,8306	8,5148	4,8837	9,952
Min	0,46864	1,522	0,36101	0,6392	1,1307	0,69331	0,34001	1,0611	1,0702	0,575	0,34001
RMS	2,2788	4,7483	2,701	2,566	3,3695	3,3071	3,2466	2,617	3,9247	2,4696	3,0995

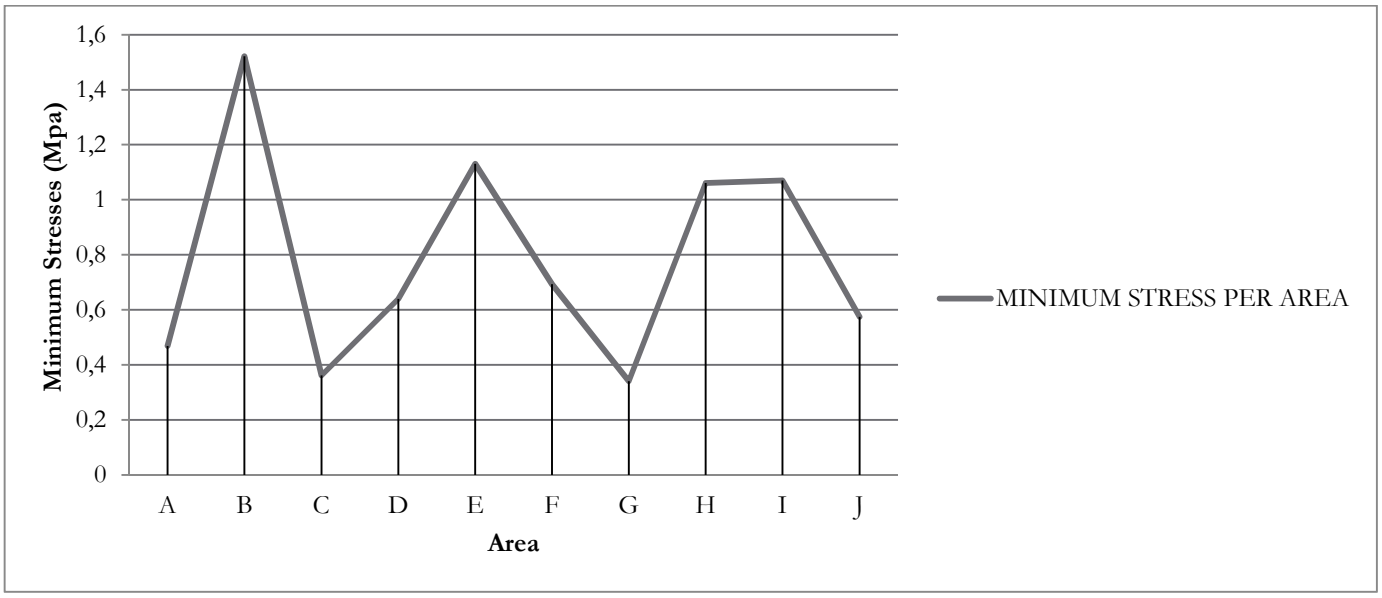
Πίνακας 4. Πίνακας συγκέντρωσης τάσεων ανά περιοχή της σωλήνωσης

Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

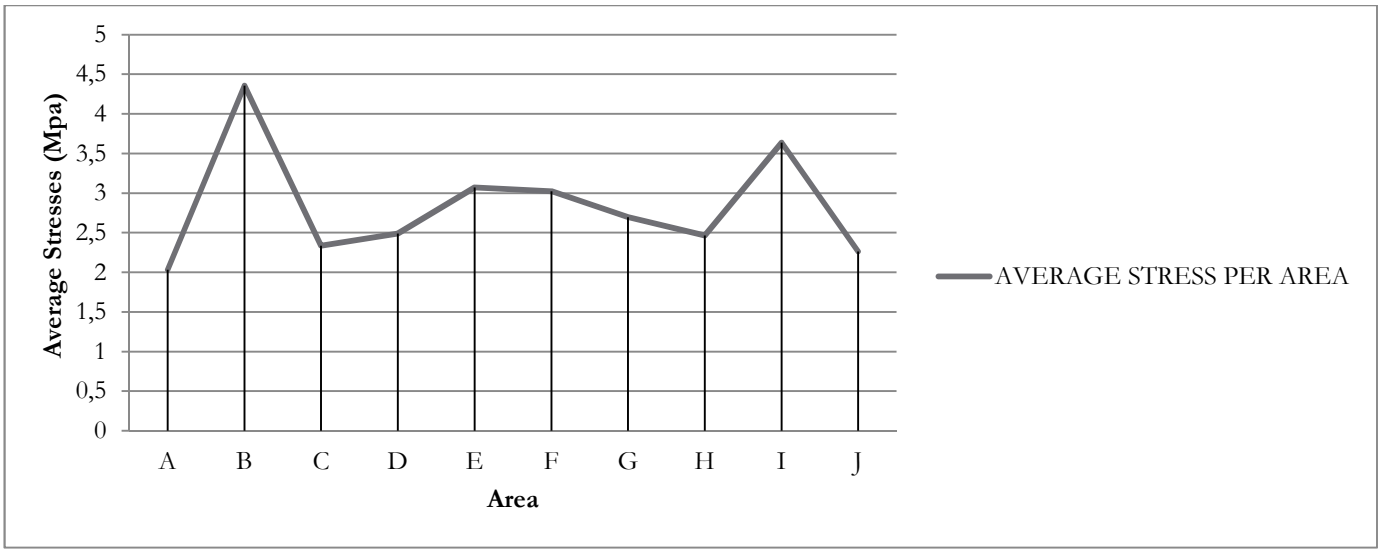
- Διάγραμμα μέγιστων τάσεων σωλήνωσης, όπου φαίνονται οι μέγιστες τάσεις κάθε περιοχής
- Διάγραμμα ελάχιστων τάσεων σωλήνωσης, όπου φαίνονται η ελάχιστες τάσεις κάθε περιοχής.
- Διάγραμμα μέσου όρου τάσεων ανα περιοχή σωλήνωσης, όπου φαίνεται η μέση συγκέντρωση τάσεων σε κάθε περιοχή της σωλήνωσης μετά την επιβολή των συνθηκών λειτουργίας.



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα Μεγίστων Τάσεων σωλήνωσης ανά περιοχή.



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα Ελαχίστων Τάσεων σωλήνωσης ανά περιοχή.



Διάγραμμα 9. Διάγραμμα μέσης συγκέντρωσης τάσεων ανά περιοχή.

Όπως συμπεραίνουμε από τα διαγράμματα 7,8,9 η μέγιστη κατανομή τάσεων, όπως αυτή προκύπτει από την στατική μελέτη της σωλήνωσης, βρίσκεται στην περιοχή Β, στην οποία υπάρχει και η μεγαλύτερη ελάχιστη τιμή τάσης από όλες τις υπόλοιπες περιοχές.

2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

2.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Η γραμμική διαστολή ΔL της υπο μελέτη σωλήνωσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση

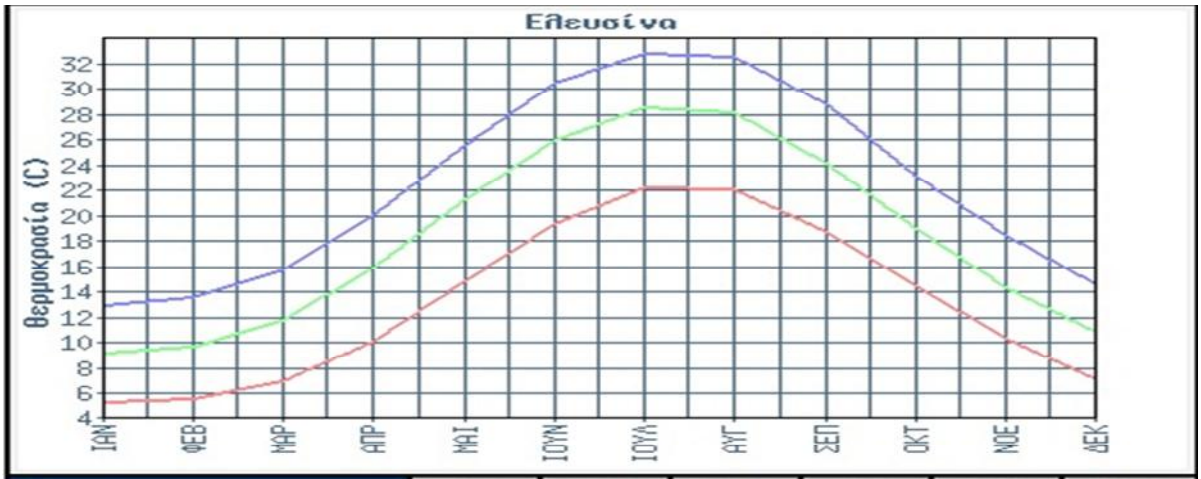
$$L=Lo+Lo*\alpha*\Delta T \Rightarrow \Delta L=Lo*\alpha*\Delta T$$

Εξίσωση 1. Τύπος υπολογισμού Γραμμικής Διαστολής.

Όπου:

- α: Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής για σωληνώσεις Stainless Steel.
- Lo: Το αρχικό μήκος της σωλήνωσης
- ΔT:Η Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ περιβαλοντολογικής θερμοκρασίας και Θερμοκρασίας λειτουργίας του ρευστού.

Στον πίνακα 5, φαίνονται οι διακυμάνσεις της Θερμοκρασίας στην Περιοχή της Ελευσίνας ανα μήνα, όπως αυτές προκύπτουν από τα στατιστικά στοιχεία της ΕΜΥ τα τελευταια 50 χρόνια.



1ο Εξάμηνο	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	5.4	5.6	7.1	10.1	14.9	19.5
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	9.2	9.7	11.8	15.9	21.4	26.1
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	13.0	13.6	15.8	20.1	25.7	30.6
2ο Εξάμηνο	**ΙΟΥΛ**	**ΑΥΓ**	**ΣΕΠ**	**ΟΚΤ**	**ΝΟΕ**	**ΔΕΚ**
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	22.3	22.2	18.8	14.6	10.4	7.2
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	28.6	28.2	24.3	19.0	14.4	10.9

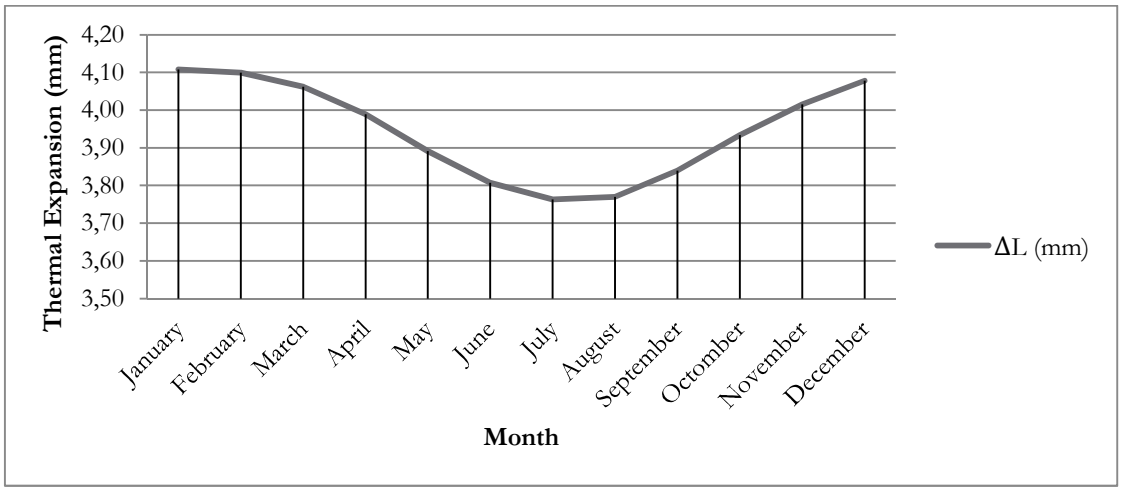
Πίνακας 5. Διακυμάνσεις θερμοκρασίας στην περιοχή της Ελευσίνας τα τελευταία 50 χρόνια.

Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 6, στον οποίο φαίνονται οι διακυμάνσεις της θερμικής διαστολής ανάλογα με τις διακυμάνσεις τις Περιβαλοντολογικής Θερμοκρασίας ανα μήνα. Ο παρακάτω πίνακας έχει προκύψει θεωρώντας πως ο εξοπλισμός στον οποίο είναι συνδεδεμένη αμφίπακτα με φλάντζες η σωλήνωση, αναστέλει πλήρως την λειτουργία του **τουλάχιστον** μια φορά τον μήνα και έπειτα επαναλειτουργεί. Όπως θα δούμε παρακάτω, η θεώρηση αυτή θα μας βοηθήσει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς την φόρτιση και τον χρόνο ζωής της κρίσιμης περιοχής, κυρίως διότι λαμβάνονται υπόψη όλες οι περιόδοι πιθανής αποφόρτισής της.

Temp. Expansion Coef (m/m°C)		St.Steel	0,0000178	
Month	Average Temp. (°C)	ΔT (°C)	ΔL (m)	ΔL (mm)
January	9,2	230,8	0,05	45,09
February	9,7	230,3	0,04	44,99
March	11,8	228,2	0,04	44,58
April	15,9	224,1	0,04	43,78
May	21,4	218,6	0,04	42,71
June	26,1	213,9	0,04	41,79
July	28,6	211,4	0,04	41,30
August	28,2	211,8	0,04	41,38
September	24,3	215,7	0,04	42,14
Octomber	19	221	0,04	43,18
November	14,4	225,6	0,04	44,08
December	10,9	229,1	0,04	44,76

Πίνακας 6. Θερμική διαστολή σωλήνωσης στην περιοχή της Ελευσίνας ανα μήνα.

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω θεώρηση, η ***χρονική μεταβολή*** της γραμμικής διαστολής κατά τη διάρκεια ενός έτους, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 10:



Διάγραμμα 10. Χρονική μεταβολή της θερμικής διαστολής.

2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΜΕΣΩ Η/Υ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗ

Σύμφωνα με το προηγούμενο διάγραμμα 10,γίνεται αντιληπτό πως η χρονική διακύμανση των τιμών της θερμικής διαστολής, δημιουργεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση κατά τη διάρκεια ενός έτους. Εφαρμόζοντας ανα περιοχή και για κάθε μήνα, τις τιμές του Πίνακα 6 για την θερμική διαστολή (ΔL) στη σωλήνωση, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 7 θερμικών τάσεων.

Month	ΔL (mm)	Max. THERMAL STRESSES PER AREA (Mpa)									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
January	45,09	8,4303	40,7240	48,6040	29,3100	69,319	50,572	77,764	54,336	27,47	21,587
February	44,99	8,4709	40,7410	48,5810	29,2660	69,039	50,336	77,52	54,28	27,424	21,557
March	44,58	8,7075	40,6040	47,6920	28,9890	69,04	50,178	76,935	53,193	26,771	21,167
April	43,78	7,9603	39,4230	47,3710	28,2570	67,369	49,362	75,665	52,615	26,653	20,9730
May	42,71	8,2267	38,4970	45,1910	27,7910	66,701	48,461	74,017	50,7	25,517	20,5270
June	41,79	8,1783	38,0650	44,7510	27,2450	64,504	46,825	72,04	50,069	25,178	19,8980
July	41,30	7,4825	37,0500	44,5500	26,7380	63,534	46,491	71,393	49,752	25,188	19,8130
August	41,38	7,4994	37,1210	44,6840	26,8160	63,587	46,544	71,47	49,939	25,315	19,8600
September	42,14	7,6763	37,9620	45,6020	27,1920	64,796	47,477	72,82	50,671	25,659	20,2000
October	43,18	8,4513	39,3950	46,2790	28,0980	66,83	48,558	74,467	51,539	25,946	20,4970
November	44,08	8,5108	39,7150	46,6630	28,6090	68,72	49,991	76,414	52,383	26,352	21,1700
December	44,76	8,8134	40,5300	47,3970	28,9280	70,015	50,987	77,664	52,866	26,59	21,8060

Πίνακας 7. Χρονική μεταβολή τάσεων εξαιτίας γραμμικής διαστολής σε κάθε περιοχή της σωλήνωσης.

3. ΤΕΛΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

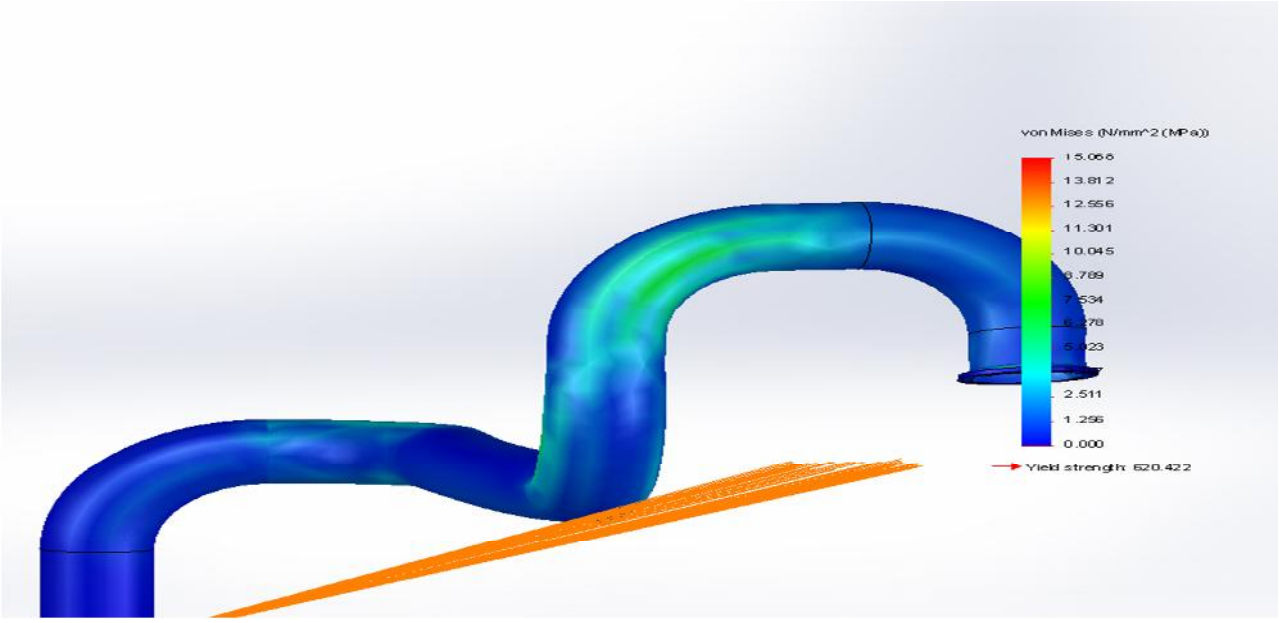
Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των τάσεων που προέκυψαν από τη στατική ανάλυση του προβλήματος (Πίνακας 4) καθώς επίσης και τις τιμές του Πινακα 7, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας τιμών συγκεντρωτικών τάσεων της σωλήνωσης. Είναι φανερό πως από την τελική μελέτη φόρτισης της σωλήνωσης, η κρίσιμη περιοχή τάσεων είναι η Περιοχη G.

Month	MAXIMUM STRESSES PER AREA (Mpa)									
Month	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
January	13,6078	50,6760	54,6087	34,4643	77,7184	58,6118	86,6623	59,1666	35,9848	26,4707
February	13,6484	50,6930	54,5857	34,4203	77,4384	58,3758	86,4183	59,1106	35,9388	26,4407
March	13,8850	50,5560	53,6967	34,1433	77,4394	58,2178	85,8333	58,0236	35,2858	26,0507
April	13,1378	49,3750	53,3757	33,4113	75,7684	57,4018	84,5633	57,4456	35,1678	25,8567
May	13,4042	48,4490	51,1957	32,9453	75,1004	56,5008	82,9153	55,5306	34,0318	25,4107
June	13,3558	48,0170	50,7557	32,3993	72,9034	54,8648	80,9383	54,8996	33,6928	24,7817
July	12,6600	47,0020	50,5547	31,8923	71,9334	54,5308	80,2913	54,5826	33,7028	24,6967
August	12,6769	47,0730	50,6887	31,9703	71,9864	54,5838	80,3683	54,7696	33,8298	24,7437
September	12,8538	47,9140	51,6067	32,3463	73,1954	55,5168	81,7183	55,5016	34,1738	25,0837
October	13,6288	49,3470	52,2837	33,2523	75,2294	56,5978	83,3653	56,3696	34,4608	25,3807
November	13,6883	49,6670	52,6677	33,7633	77,1194	58,0308	85,3123	57,2136	34,8668	26,0537
December	13,9909	50,4820	53,4017	34,0823	78,4144	59,0268	86,5623	57,6966	35,1048	26,6897

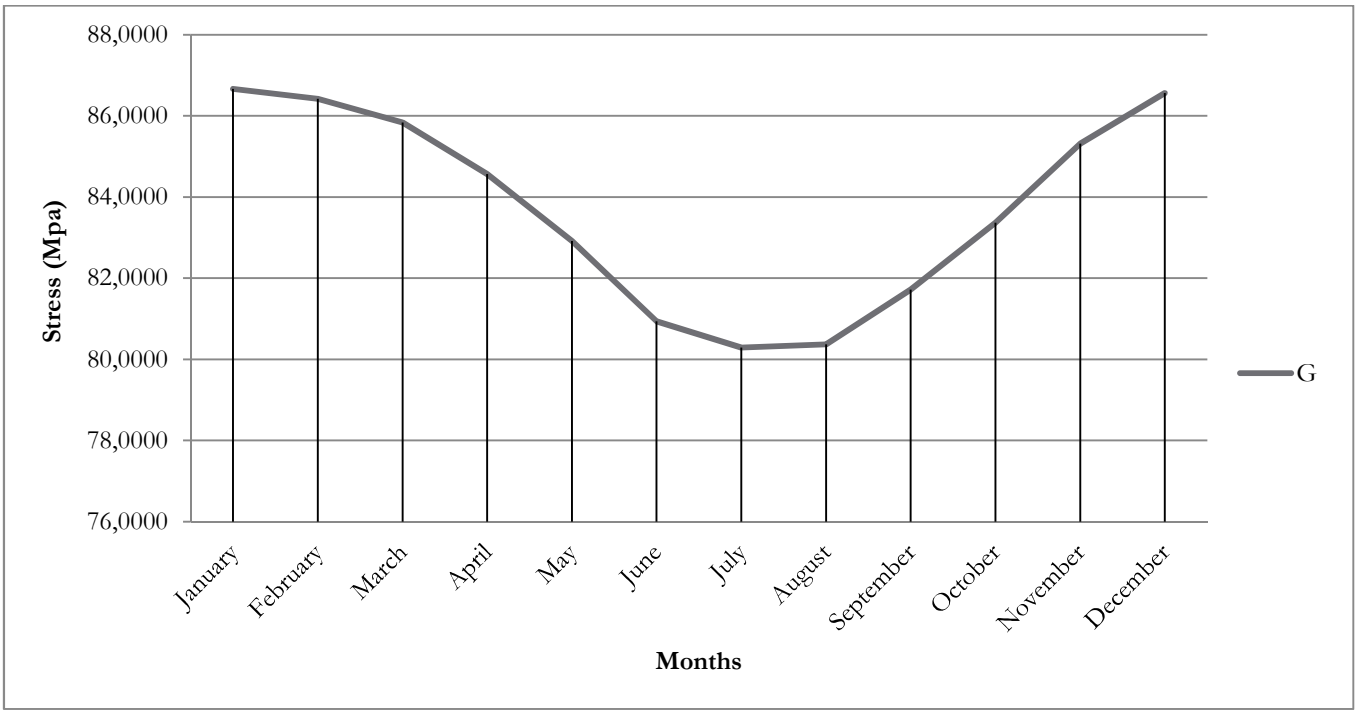
Πίνακας 8. Χρονική μεταβολή συνολικών τάσεων ανα περιοχή της σωλήνωσης.

3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Η χρονική μεταβολή των τάσεων στην Κρίσιμη περιοχή διάγραμμα 11, ενώ στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαφορά φόρτισης της περιοχής G σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές.



Εικόνα 50. Η περιοχή G είναι φανερό πως είναι η πλέον κρίσιμη.

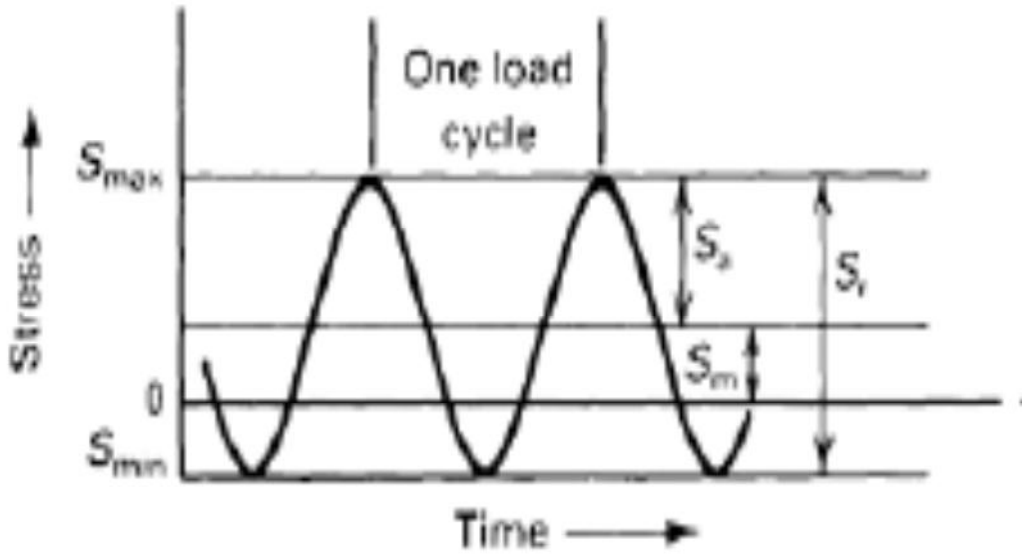


Διάγραμμα 11. Χρονική μεταβολή μέγιστων τάσεων στην κρίσιμη περιοχή (G Area).

4. ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ

Η χρονική μεταβολή της θερμικής διαστολής της σωλήνωσης και ως εκ τούτου η χρονική μεταβολή των τάσεων σε αυτή,δεδομένου πως ο εξοπλισμός κλείνει και επαναλειτουργεί για τουλάχιστον μια φορά τον μήνα δημιουργεί όπως είναι φανερό ένα πρόβλημα κόπωσης. Κάθε κύκλος φόρτωσης είναι και ένα κλείσιμο της λειτουργίας του εξοπλισμού και επαναλειτουργία του.

Βασικά μεγέθη στην μελέτη της κόπωσης είναι η μέγιστη,η μέση και η ελάχιστη τάση ανά κύκλο καθώς επίσης το ευρος τάσεων και οι αναλογίες τάσεων και έυρους τάσεων.



Διάγραμμα 12. Διάγραμμα χρονικής μεταβολής Τάσεων

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναφορικά με το παραπάνω διάγραμμα 12,ως μέγιστη τάση σmax για την περιοχή G είναι οι τιμές που αναφέρονται στον Πίνακα 8 ενώ ως ελάχιστη τάση σmin οι τιμές του Πίνακα 4 (Η σωλήνωση δεν έχει καμία φόρτιση πέραν της στατικής). Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του Πίνακα 9, όπου παρατίθενται αναλυτικά όλες οι τιμές των παραμέτρων κόπωσης είναι οι εξής:

Υπολογισμός Εύρους Τάσεων:

$$\Delta\sigma = \sigma max - \sigma min$$

Υπολογισμός Μεταβαλλόμενης Τάσης:

$$\sigma a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma max - \sigma min}{2}$$

Υπολογισμός Μέσης Τάσης:

$$\sigma m = \frac{\sigma max + \sigma min}{2}$$

Αναλογία Τάσεων:

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

Αναλογία Εύρους Τάσεων:

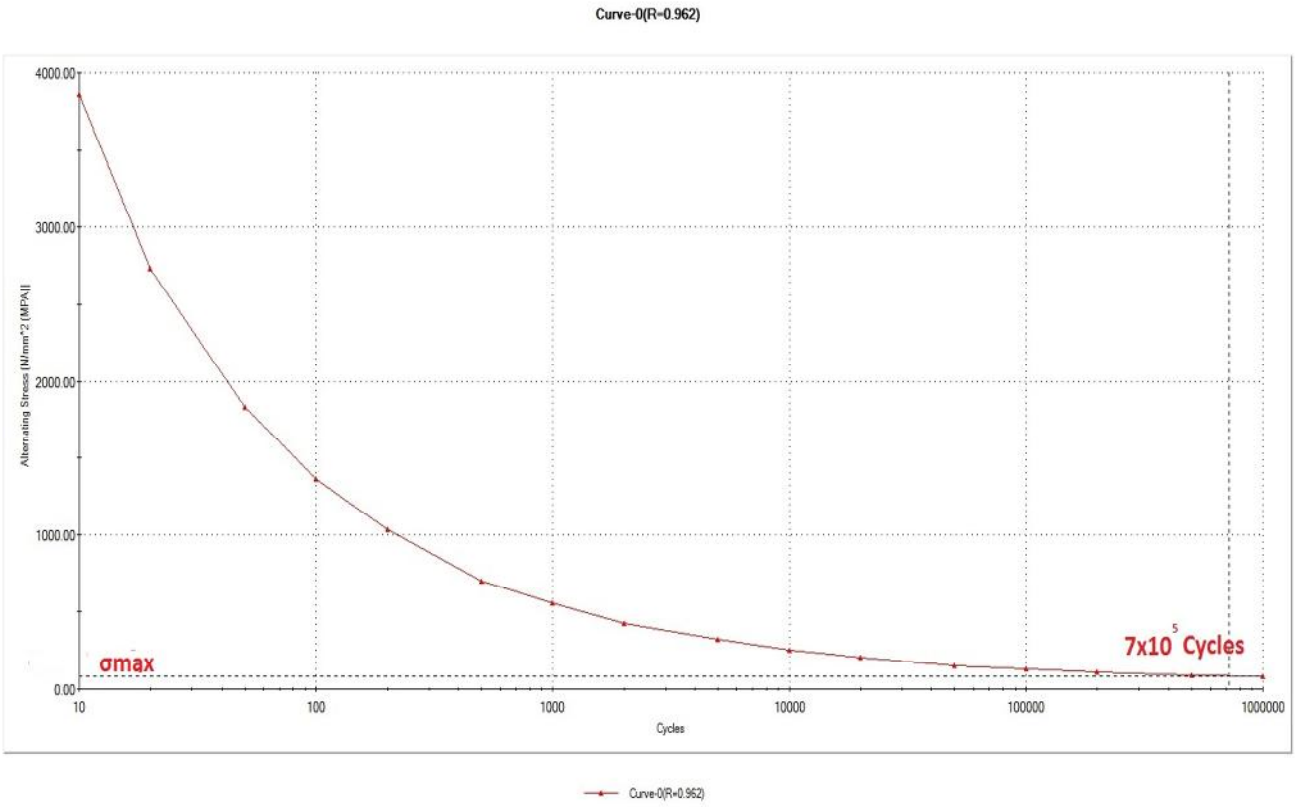
$$A = \frac{\sigma a}{\sigma m} = \frac{1 - R}{1 + R}$$

Month	FATIGUE PARAMETERS						
Month	σmax (Mpa)	σmin (Mpa)	Δσ (Mpa)	σm (Mpa)	σα (Mpa)	R	A
January	86,6623	8,8983	77,7640	47,7803	38,882	0,102678	0,813766
February	86,4183	8,8983	77,5200	47,6583	38,76	0,102968	0,81329
March	85,8333	8,8983	76,9350	47,3658	38,4675	0,10367	0,812137
April	84,5633	8,8983	75,6650	46,7308	37,8325	0,105226	0,809584
May	82,9153	8,8983	74,0170	45,9068	37,0085	0,107318	0,806166
June	80,9383	8,8983	72,0400	44,9183	36,02	0,109939	0,8019
July	80,2913	8,8983	71,3930	44,5948	35,6965	0,110825	0,800463
August	80,3683	8,8983	71,4700	44,6333	35,735	0,110719	0,800635
September	81,7183	8,8983	72,8200	45,3083	36,41	0,10889	0,803606
October	83,3653	8,8983	74,4670	46,1318	37,2335	0,106739	0,807111
November	85,3123	8,8983	76,4140	47,1053	38,207	0,104303	0,811098
December	86,5623	8,8983	77,6640	47,7303	38,832	0,102796	0,813571

Πίνακας 9. Παράμετροι κόπωσης

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ S-N (Wohler)

Παρατηρώντας το διάγραμμα 13 (Διάγραμμα Wohler) για το συγκεκριμένο υλικό, βλέπουμε πως όλες οι τιμές της μέγιστης τάσης αντιστοιχίζονται σε χρόνο ζωής περίπου 7 □ 10^5 κύκλων.



Διάγραμμα 13.Διάγραμμα Wohler για AISY type 316 Stainless Steel

Το γεγονός αυτό μας δείχνει πως για σταθερή έτησια φόρτιση αριθμού Κ κύκλων φόρτισης, ο χρόνος ζωής της κρίσιμης περιοχής μέχρι την αστοχία της είναι $\frac{7 \cdot 10^5}{K}$ Χρόνια.

Δ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βιβλιογραφία

1. *ASM International, Metals Handbook (Desk Edition) Chapter 32 (Failure Analysis), American Society for Metals, (1997) pp 32-24 to 32-26*
2. *Γ. Χ. Βοσνιάκος, «Οι χάλυβες», Σημειώσεις μεταπτυχιακών μαθημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2007*
3. *J.-P. Birat, "Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective…" La Revue de Métallurgie – CIT, année 101 (2006), n° 11, pp. 937–955.*
4. *International Iron and Steel Institute, "About steel"*
5. *International Iron and Steel Institute, "Steel statistics archive 2013"*
6. *International Iron and Steel Institute, "Top steel producers 2013".*
7. *U.S. Geological Survey "Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States"*
8. *Παπαδόπουλος Α. Χρήστος. «Συγκολλήσεις», Στοιχεία Μηχανών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.*
9. *Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος (2010): «Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις», εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα.*
10. *Κωνσταντίνος Σταϊκούρας, «Μελέτη της τάσης για διάβρωση συγκολλήσεων ανοξείδωτου χάλυβα 316 L, με χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κων, ΕΜΠ.*
11. *Fundamentals of Metallic Corrosion*: Atmospheric and Media Corrosion of Metals (Corrosion Engineering Handbook, Second Edition) [*Philip* A. Schweitzer P.E.]
12. *Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties (Corrosion Technology) [Philip A. Schweitzer P.E.]*
13. *ASM Metals Handbook Volume 13 - Corrosion. 2003.*
14. *ASM Metals Handbook Volume 13A - Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection, 2003.*
15. *Corrosion of Weldments. edited by J. R. Davis, ASM, 2006.*
16. *ASTM G3-89 (Reapproved 1999), Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.*
17. *ASTM G5-94 (Reapproved 1999), Standard Reference Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.*
18. *ASTM G59-97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.*
19. *David and James Talbot, Corrosion Science and Technology, CRC Press. 1998.*
20. *R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig, Corrosion and corrosion control, John Wiley & Sons, 2008.*
21. *Philippe Marcus, Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, Marcel Dekker. 2002.*
22. *Bard, Allen J., Electrochemical methods : fundamentals and applications. John Wiley & Sons, 2001.*
23. *Robert G. Kelly, John R. Scully, David W. Shoesmith, Rudolph G. Buchheit, Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, Marcel Dekker. 2002.*
24. *Stress Corrosion Cracking, Recommended Practices, 2nd Edition, CEPA.*