



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και
επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για
υποθαλάσσιους αγωγούς**

Διπλωματική Εργασία

Αθανασόπουλος Νικόλαος

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και
επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για
υποθαλάσσιους αγωγούς**

Διπλωματική Εργασία

Αθανασόπουλος Νικόλαος

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 19/10/2017

Σπ. Παπαευθυμίου, Επικ. Καθηγητής(Υπογραφή)

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής(Υπογραφή)

Δ. Πάνιας, Καθηγητής(Υπογραφή)

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| Πίνακας Εικόνων..... | i |
| Πίνακας Διαγραμμάτων..... | v |
| Πίνακας Πινάκων..... | vi |
| Ευχαριστίες..... | vii |
| Εισαγωγή..... | 1 |
| Περίληψη..... | 3 |
| Abstract..... | 3 |
| Synopsis..... | 5 |
| 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 15 |
| 1.1 ΜΙΚΡΟΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (HSLA STEELS) 15 | |
| 1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ HSLA | 15 |
| 1.1.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ..... | 17 |
| 1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ-ΕΠΗΡΕΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ..... | 19 |
| 1.2.1 Θερμομηχανικές κατεργασίες (Thermomechanical Processes-TMCP) | 19 |
| 1.2.2 Μικροκραματικές προσθήκες..... | 26 |
| 1.2.3 Μηχανισμοί σκλήρωσης..... | 28 |
| 1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΓΙΑ ΑΓΩΓΟΥΣ..... | 31 |
| 1.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ JCOE..... | 31 |
| 1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΓΩΓΟΥ (ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ-COMPRESSIVE STRAIN CAPACITY)..... | 37 |
| 1.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (STRESS-STRAIN CURVE) 39 | |
| 1.4.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΑΓΩΓΟΥ..... | 41 |
| 1.4.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ..... | 43 |
| 1.4.4 ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ..... | 50 |
| 1.4.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ JCOE..... | 51 |
| 1.4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ..... | 59 |
| 1.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΓΩΓΟΥ..... | 65 |
| 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 73 |
| 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 75 |
| 3.1 ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ..... | 75 |
| 3.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΩΛΗΝΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ..... | 75 |
| 3.1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΩΝ..... | 76 |
| 3.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ..... | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2.1 | ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 80 |
| 3.2.2 | ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (BOUNDARY CONDITIONS)..... | 81 |
| 3.2.3 | ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (ANALYSIS SETTINGS)..... | 82 |
| 3.2.4 | ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 83 |
| 3.2.5 | ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ..... | 86 |
| 3.2.6 | ΜΟΝΤΕΛΟ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ | 87 |
| 3.2.7 | ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (FEM VERIFICATION)..... | 88 |
| 4 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 91 |
| 4.1 | ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ | 91 |
| 4.1.1 | ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ | 91 |
| 4.1.2 | ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ..... | 97 |
| 4.2 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ-ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 100 | |
| 4.2.1 | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ DNV ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 100 |
| 4.2.2 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΓΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ (H) ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ | 109 |
| 4.2.3 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΠΟΥ (GRADE) ΑΓΩΓΟΥ | 110 |
| 4.2.4 | ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ | 111 |
| 4.2.5 | ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΖΩΝΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ | 112 |
| 5 | ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ | 115 |
| 5.1 | ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 115 |
| 5.2 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 120 |
| 5.3 | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ | 121 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 123 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 133 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ισορροπίας Fe-C [58]..... | 18 |
| Εικόνα 1.2 Τυπική διάταξη έλασης με τον επιμέρους βοηθητικό εξοπλισμό [79]...... | 19 |
| Εικόνα 1.3 Διάγραμμα της θερμομηχανικής κατεργασίας της έλασης (TMCP) και των μικροδομών που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία [79]. | 20 |
| Εικόνα 1.4 Ποσότητα Nb(CN) και Ti(CN) (wt %) σε χάλυβα HSLA μετά από αναθέρμανση για 1 ώρα σε διάφορες θερμοκρασίες [80]. | 21 |
| Εικόνα 1.5 Μέγεθος κόκκου ωστενίτη (μm), ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο αναθέρμανσης [92]. | 21 |
| Εικόνα 1.6 Σχηματική αναπαράσταση της παραμόρφωσης μεταξύ δύο διαδοχικών υποβιβασμών κατά την έλαση σε θερμοκρασία: Επάνω) μεγαλύτερη από την T_{NR} , όπου υφίσταται ολοκληρωμένη στατική ανακρυστάλλωση και Κάτω) μικρότερη από την T_{NR} , όπου σημαντικά παραμορφωμένοι κόκκοι ωστενίτη (“pancaked” grains) οδηγούν στην ύπαρξη περισσότερων θέσεων πυρήνωσης για το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη [51]. | 22 |
| Εικόνα 1.7 Συμβατική ελεγχόμενη έλαση (CCR) [39]..... | 24 |
| Εικόνα 1.8 Τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή [39]. | 25 |
| Εικόνα 1.9 Τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή, ακολουθούμενη από επιταχυνόμενη απόψυξη [39]..... | 26 |
| Εικόνα 1.10 Επίδραση του κλάσματος όγκου και μεγέθους του κατακρημνίσματος , στο μέγιστο δυνατό μέγεθος κόκκου [20]. | 30 |
| Εικόνα 1.11 Επεξεργασία-φρεζάρισμα των άκρων (edge milling), όπου επιτυγχάνεται ο σχηματισμός διπλού V στα άκρα της πλάκας [41], [43]. | 32 |
| Εικόνα 1.12 Πρεσάρισμα των άκρων (edge crimping) της πλάκας [41], [43]..... | 32 |
| Εικόνα 1.13 Διαδικασία διαμόρφωσης JCO (JCO forming) [41], [43]. | 33 |
| Εικόνα 1.14 Τελική πρέσα κλεισίματος [43]..... | 34 |
| Εικόνα 1.15 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SAW [45]. | 35 |
| Εικόνα 1.16 Κύρια συγκόλληση LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding) στην εσωτερική (άνω μέρος) και στην εξωτερική πλευρά (κάτω μέρος) του σωλήνα [43]. | 35 |
| Εικόνα 1.17 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής ζώνης συγκόλλησης [46]..... | 36 |
| Εικόνα 1.18 Μηχανικός διαστολέας [41], [43]. | 37 |
| Εικόνα 1.19 Συμβατική μέθοδος σχεδιασμού αγωγού που βασίζεται στην επιβολή τάσης (stress-based design) [49]. | 38 |
| Εικόνα 1.20 Σύγχρονη μέθοδος σχεδιασμού αγωγού που βασίζεται στην ικανότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά (strain-based design) [49]. | 39 |
| Εικόνα 1.21 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και οι επιμέρους ιδιότητες που προσδιορίζονται μέσω αυτού [49]..... | 40 |
| Εικόνα 1.22 Διαφορετικές μορφές καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης [49]..... | 40 |
| Εικόνα 1.23 Πυκνότητα διαταραχών φερρίτη και μπαινίτη [3]. | 42 |
| Εικόνα 1.24 Μικρογραφίες φερρίτη από TEM, οι οποίες δείχνουν τη δομή των διαταραχών: α) στην πλάκα, β) στο σωλήνα μετά από διαμόρφωση UOE και γ) στον επικαλυμμένο σωλήνα [47]. | 42 |
| Εικόνα 1.25 Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης Ramberg-Osgood για τη συμπεριφορά σωλήνα X60 και X70 στον εγκάρσιο άξονα [75]. | 44 |
| Εικόνα 1.26 Σχηματική αναπαράσταση της επίδρασης της εργογήρανσης (strain aging) στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χαλύβων HSLA [51]..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.27 Προσδιορισμός ορίου διαρροής από την καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης με βάση το 0.2% και το 0.5% της παραμόρφωσης [49]..... | 48 |
| Εικόνα 1.28 Ιστορικό και είδος παραμορφώσεων που επιβάλλονται στις διάφορες ζώνες της πλάκας κατά τη διαμόρφωσή της σε σωλήνα μέσω της διαδικασίας JCOE [4], [52]..... | 49 |
| Εικόνα 1.29 Διαδικασία κοπής και επιπέδωσης δοκιμίου για μέτρηση του ορίου διαρροής στον εγκάρσιο άξονα [52]..... | 50 |
| Εικόνα 1.30 Οι τιμές ορίου διαρροής (f) περιμετρικά του δακτυλιδιού ενός ομοιογενούς (άνω μέρος) και ενός ανομοιογενούς αγωγού, όπως υπολογίστηκαν σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων [13]..... | 50 |
| Εικόνα 1.31 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης κατά συμπίεση σε δοκίμια από διαφορετικές θέσεις περιμετρικά του σωλήνα [13]. | 51 |
| Εικόνα 1.32 Καθορισμός παραμενουσών τάσεων, περιμετρικά του σωλήνα, με τη μέθοδο «διαχωρισμού δακτυλιδιού» (ring splitting method) [11]. | 52 |
| Εικόνα 1.33 Απελευθέρωση φορτίου πρέσας και φαινόμενο «springback» στο στάδιο «Ο» της διαμόρφωσης του σωλήνα [63]..... | 53 |
| Εικόνα 1.34 Πίνακας τιμών συντελεστή α_{fab} ανάλογα με τη διαδικασία διαμόρφωσης [69]. | 54 |
| Εικόνα 1.35 Εγκάρσια διατομή σωλήνα στην οποία καθορίζεται η οβαλότητα [11].. | 55 |
| Εικόνα 1.36 Διαφορά πάχους στην εγκάρσια διατομή σωλήνα, Αριστερά: Στον κάθετο άξονα [11], Δεξιά: Στον οριζόντιο άξονα [71]..... | 56 |
| Εικόνα 1.37 Τοπική μεταβολή του πάχους του σωλήνα [56]..... | 56 |
| Εικόνα 1.38 Επίδραση της θερμικής γήρανσης στην καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης στον εγκάρσιο άξονα [65]. | 57 |
| Εικόνα 1.39 Το όριο διαρροής σε εφελκυσμό και σε συμπίεση και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή στη θέση 180° (απέναντι από τη ραφή της συγκόλλησης), όπου με μπλε χρώμα είναι το δακτυλίδι του σωλήνα που δεν έχει υποστεί θερμική γήρανση και με μπλε χρώμα είναι το αντίστοιχο δακτυλίδι που έχει υποστεί θερμική γήρανση (AC: συμπίεση κατά τον άξονα, CCO: συμπίεση περιμετρικά του σωλήνα στο άκρο της εξωτερικής διαμέτρου, CCI: συμπίεση περιμετρικά του σωλήνα στο άκρο της εσωτερικής διαμέτρου, AT: αξονικός εφελκυσμός, CT: εφελκυσμός περιμετρικά του σωλήνα) [64]..... | 58 |
| Εικόνα 1.40 Μέθοδος εναπόθεσης αγωγού S [60]..... | 60 |
| Εικόνα 1.41 Μέθοδος απότομης εναπόθεσης αγωγού S [5]. | 60 |
| Εικόνα 1.42 Μέθοδος εναπόθεσης αγωγού J [60]. | 61 |
| Εικόνα 1.43 Μέθοδος ξετυλίγματος αγωγού (reeling) [60]. | 62 |
| Εικόνα 1.44 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού στην επιφάνεια της θάλασσας [60]..... | 63 |
| Εικόνα 1.45 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού μεσαίου βάθους [60]..... | 63 |
| Εικόνα 1.46 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού στον πυθμένα [60]. | 64 |
| Εικόνα 1.47 Φορτίσεις που δέχεται ο αγωγός κατά την εγκατάστασή του μέσω της μεθόδου S-lay [5]..... | 65 |
| Εικόνα 1.48 Εφελκυστικές τάσεις που δέχεται ο αγωγός κατά την εγκατάσταση με τη μέθοδο S-lay (αριστερά) και J-lay (δεξιά) [5]. | 65 |
| Εικόνα 1.49 Σύγκριση τιμών παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση σύμφωνα με τα πρότυπα DNV και CSA [86]..... | 67 |
| Εικόνα 1.50 Αγωγός X80 που έχει καταρρεύσει τοπικά [73]. | 68 |
| Εικόνα 1.51 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης του φαινομένου του λυγισμού (buckling) [89]..... | 68 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 1.52 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για το φαινόμενο του μη γραμμικού λυγισμού [89]. | 69 |
| Εικόνα 1.53 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για το φαινόμενο του λυγισμού διακλάδωσης [89]. | 69 |
| Εικόνα 1.54 Τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης [90]. | 70 |
| Εικόνα 1.55 Διδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης [8]. | 71 |
| Εικόνα 1.56 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων [89]. | 72 |
| Εικόνα 3.1 Θέσεις του σωλήνα από τις οποίες προέρχονται τα δείγματα (η θέση 1 και η θέση 12 βρίσκονται λίγο πιο δίπλα από τη ραφή της συγκόλλησης) [10]. | 76 |
| Εικόνα 3.2 Δοκίμια συμπίεσης κυλινδρικής μορφής σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E9. | 76 |
| Εικόνα 3.3 Διαδικασία κοπής δοκιμίων συμπίεσης. | 77 |
| Εικόνα 3.4 Σερβοϋδραυλικό μηχάνημα INSTRON 8802, Αριστερά: γενική άποψη, Δεξιά: εστίαση στις πλάκες σύνθλιψης. | 77 |
| Εικόνα 3.5 Φούρνος που χρησιμοποιήθηκε για τη γήρανση των δοκιμίων συμπίεσης. | 78 |
| Εικόνα 3.6 Δοκίμιο εφελκυσμού τύπου «groundbar». | 79 |
| Εικόνα 3.7 Αρπάγες εφελκυσμού με εγκατεστημένο το επιμηκυσιόμετρο. | 79 |
| Εικόνα 3.8 Διδιάστατο μοντέλο δακτυλιδιού σωλήνα | 80 |
| Εικόνα 3.9 Τα δέκα στρώματα στοιχείων με μέγεθος στοιχείου 3mm. | 80 |
| Εικόνα 3.10 Οριακές συνθήκες μοντέλου. | 81 |
| Εικόνα 3.11 Node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης. | 83 |
| Εικόνα 3.12 Ζώνες πλαστικής παραμόρφωσης σε μοντέλο δακτυλιδιού αγωγού. ... | 83 |
| Εικόνα 3.13 Ενέργεια παραμόρφωσης (mJ) στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού που έχει καταρρεύσει, με το μη παραμορφωμένο δακτυλίδι να φαίνεται από πίσω. | 85 |
| Εικόνα 4.1 Δακτυλίδι σωλήνα με $D=457.2$ mm, $t=22.23$ mm, $f_0=0.5\%$ και $e_c=20\%$. | 111 |
| Εικόνα 4.2 Δακτυλίδι σωλήνα με $D=457.2$ mm, $t=22.23$ mm, $f_0=3\%$ και $e_c=20\%$. | 112 |
| Εικόνα 4.3 Ζώνες συμπίεσης σε δακτυλίδι αγωγού. | 113 |
| Εικόνα 4.4 Ζώνες εφελκυσμού σε δακτυλίδι αγωγού. | 113 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|--|-----|
| Διάγραμμα 3.1 Η Μετατόπιση σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, όπως αυτό προκύπτει από το ANSYS..... | 84 |
| Διάγραμμα 3.2 Η Μετατόπιση σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, με μεγαλύτερη εστίαση. | 84 |
| Διάγραμμα 3.3 Η Ενέργεια Παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού. | 85 |
| Διάγραμμα 3.4 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ελαστικού-πλήρως πλαστικού υλικού, όπως εισάγεται στο ANSYS. | 87 |
| Διάγραμμα 3.5 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υλικού που υφίσταται εργοσκήρυνση, όπως εισάγεται στο ANSYS..... | 88 |
| Διάγραμμα 4.1 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα 16 δοκίμια που υπέστησαν απλή συμπίεση. | 91 |
| Διάγραμμα 4.2 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια που βρίσκονται στις θέσεις 1, 3,6 και 9. | 92 |
| Διάγραμμα 4.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν από τη συμπίεση, με τα αντίστοιχα απλώς συμπιεσμένα δοκίμια στην ίδια θέση του σωλήνα. | 94 |
| Διάγραμμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση του ορίου διαρροής μεταξύ των δοκιμίων που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν από τη συμπίεση και αυτών που έχουν απλώς συμπιεστεί..... | 96 |
| Διάγραμμα 4.5 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων εφελκυσμού..... | 97 |
| Διάγραμμα 4.6 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό στις θέσεις 1,3 και 6..... | 98 |
| Διάγραμμα 4.7 Σχηματική αναπαράσταση του ορίου διαρροής ανά Θέση κατά τον Εφελκυσμό και τη Συμπίεση. | 99 |
| Διάγραμμα 4.8 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 0.5%. | 100 |
| Διάγραμμα 4.9 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 1%. | 101 |
| Διάγραμμα 4.10 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 2%. | 101 |
| Διάγραμμα 4.11 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 3%. | 102 |
| Διάγραμμα 4.12 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 4%. | 102 |
| Διάγραμμα 4.13 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 5%. | 103 |
| Διάγραμμα 4.14 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=14.4$ | 104 |
| Διάγραμμα 4.15 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια με λόγο $D/t=16$ | 104 |
| Διάγραμμα 4.16 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=18$ | 104 |
| Διάγραμμα 4.17 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=20.57$ | 105 |
| Διάγραμμα 4.18 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=24$ | 105 |

| | |
|---|-----|
| Διάγραμμα 4.19 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=28.79$. | 106 |
| Διάγραμμα 4.20 Τιμές της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το συντελεστή εργοσκήρυνσης. | 109 |
| Διάγραμμα 4.21 Τιμές της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το όριο διαρροής, δηλαδή τον τύπο (Grade) του σωλήνα (X70, X80, X100). | 110 |
| Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα φάσεων όπως προκύπτει από το λογισμικό Thermocalc με βάση τη χημική σύσταση του σωλήνα των δοκιμίων. | 116 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 3.1 Διαστάσεις και χημική ανάλυση του σωλήνα από τον οποίο παραλήφθηκαν τα δοκίμια. | 75 |
| Πίνακας 3.2 Συνθήκες θερμικής γήρανσης των δοκιμίων που θερμάνθηκαν πριν συμπιεστούν. | 78 |
| Πίνακας 3.3 Σύγκριση τιμών πίεσης κατάρρευσης που προκύπτουν από επιστημονικά άρθρα με αυτές που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV και με αυτές που προκύπτουν από την παρούσα εργασία. | 89 |
| Πίνακας 4.1 Τιμές ορίου διαρροής και αντοχής σε παραμόρφωση 5% για τα 16 δοκίμια που συμπίεστηκαν. | 93 |
| Πίνακας 4.2 Τιμές ορίου διαρροής των 16 δοκιμίων που έχουν υποστεί απλή συμπίεση, με την τυπική απόκλιση μεταξύ των τιμών να αναγράφεται στο τέλος του πίνακα. | 95 |
| Πίνακας 4.3 Μέση αύξηση του ορίου διαρροής των δοκιμίων που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν συμπιεστούν σε σχέση με το όριο διαρροής των δοκιμίων που έχουν απλώς συμπιεστεί. | 96 |
| Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού. | 98 |
| Πίνακας 4.5 Μεταβολές πίεσης κατάρρευσης για τις δύο ακραίες περιπτώσεις οβαλότητας 0.5 και 5% για τους 6 λόγους D/t . | 106 |
| Πίνακας 4.6 Τιμές σφάλματος-απόκλισης μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV και του μοντέλου προσομοίωσης και για τους δύο τύπους συμπεριφοράς του υλικού, plane strain και plane stress. | 108 |
| Πίνακας 4.7 Αύξηση της τιμής της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την αύξηση του συντελεστή εργοσκήρυνσης. | 110 |
| Πίνακας 4.8 Αύξηση της τιμής της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την αλλαγή τύπου σωλήνα. | 111 |

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Dr.-Ing. Σπ. Παπαευθυμίου για την πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τη συμβολή του στην ανάληψη ενός σύγχρονου θέματος της βιομηχανίας της Ελλάδας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους της εταιρείας «Σωληνουργία Κορίνθου Α.Ε.» για την πολύτιμη χορήγηση των δοκιμών, την υποστήριξη της εν λόγω διπλωματικής εργασίας και για την ελεύθερη πρόσβαση στις εγκαταστάσεις της εταιρείας και συγκεκριμένα τους κ. Αθ. Ταζεδάκη, Χ. Παλάγκα, Ε. Δουρδούνη και Θ. Τσάκουμα.

Ευχαριστώ τη διοίκηση της εταιρείας «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» και συγκεκριμένα τους κ. Κ. Δανηλίδη, Αθ. Μηλιώκα και Γ. Πανταζόπουλο, που επέτρεψαν τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας μου χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις της εταιρείας.

Ευχαριστώ θερμά τον υπεύθυνο του εργαστηρίου μηχανικών δοκιμών του «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» κ. Α. Τουλφατζή για την πολύτιμη βοήθειά του και τη συνεργασία κατά τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών, αλλά και τον υπεύθυνο του εργαστηρίου μεταλλογραφίας του «ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.» κ. Αθ. Βαζδερβανίδη για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την επιστημονική συζήτηση.

Ιδιαίτερως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ε. Γαβαλά, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη για όλα τα θέματα που αφορούσαν το πρόγραμμα ANSYS, αλλά και για τη διαμόρφωση της εργασίας, καθώς και τη Μ. Μπουζούνη, υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π. για τις εύστοχες παρατηρήσεις της.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και κυρίως την αδερφή μου Έλενα για την υποστήριξη της, αλλά και τους φίλους μου για την κατανόηση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, με το συνεχώς αυξανόμενο μήκος των αγωγών, αλλά και με την όλο και μεγαλύτερη πίεση λειτουργίας, η ανάπτυξη χαλύβων υψηλής αντοχής κατέχει εξέχοντα ρόλο στην προσπάθεια μείωσης του κόστους των αγωγών. Ειδικά στην περίπτωση των υποθαλάσσιων αγωγών η πίεση λειτουργίας δεν παίζει τον καθοριστικότερο ρόλο, αλλά η υδροστατική πίεση που επιβάλλεται εξωτερικά είναι η πιο σημαντική. Επομένως, τα κριτήρια σχεδιασμού των υποθαλάσσιων αγωγών επικεντρώνονται περισσότερο στη συμπεριφορά τους κατά την κατάρρευση λόγω της υδροστατικής πίεσης (collapse), γι' αυτό και υπάρχει η τάση να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην υψηλή αντοχή των αγωγών και ιδιαίτερα στην υψηλή τους παραμορφωσιμότητα (strain-based design) [1], [2], [3]. Ο σχεδιασμός για αντοχή στην επιβολή υδροστατικής πίεσης είναι πολύ διαφορετικός από τον αντίστοιχο για την εσωτερική πίεση, διότι εξαρτάται περισσότερο από το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση περιμετρικά του αγωγού παρά από το όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό. Επομένως, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη εκτός από το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση και το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος του αγωγού, ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος (D/t), η οβαλότητα, οι παραμένουσες τάσεις και η ανομοιογένεια του υλικού του αγωγού [3], [4], [5],[7], [8], [12], [13], [14].

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί κατασκευάζονται μέσω της διαδικασίας διαμόρφωσης JCOE (αρχικό σχήμα σωλήνα J, στη συνέχεια C και O και τελικώς μηχανική διαστολή E) και UOE (αρχικό σχήμα σωλήνα U, στη συνέχεια O και τελικώς μηχανική διαστολή E), όπου ο σχεδόν «κλειστός» σωλήνας συγκολλάται με τη μέθοδο βυθιζόμενου τόξου κατά το διαμήκη άξονα (Longitudinal Submerged Arc Welding-LSAW) [41], [42]. Είναι γνωστό ότι κατά τη διαδικασία της ψυχρής διαμόρφωσης, όπως είναι οι προαναφερθείσες και ειδικά στο τελικό στάδιο της μηχανικής διαστολής το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση μειώνεται σημαντικά, ωστόσο κατά τη διεργασία της επικάλυψης και χάρη στη θερμική γήρανση μέσω επαγωγικών πηνίων σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ των 200 και 240°C, το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση αυξάνεται εκ νέου [4], [6], [10], [15].

Ο έλεγχος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του υλικού είναι εξαιρετικά σημαντικός, καθώς φυσικές παράμετροι του υλικού όπως ο λόγος Y/T , η ομοιόμορφη επιμήκυνση και ο συντελεστής εργοσκήρυσης καθορίζουν την παραμορφωσιμότητα των αγωγών υψηλής αντοχής [1], [9], [75]. Η παραμορφωσιμότητα των αγωγών αυτών

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

είναι καλύτερη όταν το σχήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης κατά το διαμήκη άξονα είναι τύπου «roundhouse», απ' ότι στην περίπτωση που εμφανίζεται σε αυτή πλατό διαρροής Luders [1].

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων από το διαμήκη άξονα, κατά τη συμπίεση και τον εφελκυσμό, τα οποία προέρχονται από τη μονάδα παραγωγής LSAW της «Σωληνουργεία Κορίνθου Α.Ε.», ενώ σε δεύτερο στάδιο η δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ANSYS, προκειμένου να προσδιοριστεί η πίεση κατάρρευσης (collapse pressure) σε δακτυλίδια αγωγών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων από το διαμήκη άξονα περιμετρικά του σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου $D=457.2$ mm και πάχους $t=31.75$ mm από τη μονάδα LSAW της «Σωληνουργεία Κορίνθου Α.Ε.». Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπίεσης και εφελκυσμού σε δοκίμια από το μορφοποιημένο σωλήνα και δοκιμές συμπίεσης μετά από θερμική κατεργασία γήρανσης στους 250 και 280°C για 1 h. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μοντέλο προσομοίωσης μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, μέσω του οποίου προσδιορίστηκε η πίεση κατάρρευσης σε αγωγούς για έξι (6) διαφορετικούς λόγους D/t και οβαλότητα από 0.5 έως 5%. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τιμών για συνθήκες παραμόρφωσης επιπέδου (plane strain) και τάσης επιπέδου (plane stress) με αυτές που υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης του προτύπου DNV-OS-F101, όπου διαπιστώθηκε μικρή απόκλιση, τουλάχιστον με τη λειτουργία παραμόρφωσης επιπέδου. Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση και άλλων παραμέτρων, όπως του συντελεστή εργοσκήρυνσης, του τύπου του σωλήνα (grade) και της εκκεντρότητας. Τέλος, υπολογίστηκε η πίεση κατάρρευσης του αγωγού πριν και μετά τη γήρανση.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, the mechanical properties of specimens taken from the longitudinal axis of an X70 grade pipe have been investigated. Specifically, the pipe had an external diameter of 457.2mm and a wall thickness of 31.75mm and was derived from the LSAW production of “Corinth Pipeworks S.A.”. The mechanical tests that took place was a compression and a tensile test of specimens taken from the manufactured pipe and a compression test of thermal aged samples at temperatures of 250 and 280°C for 1 h. In addition, a simulation in the Finite Element Method (FEM) software ANSYS was created, so that the collapse pressure of pipes with six (6) different D/t ratios and ovalities from 0.5 to 5% could be defined. After completing these simulations with both plane strain and plane stress, the results were compared with the corresponding values, calculated by the DNV-OS-F101 offshore standard equation, which indicates that there is a slight deviation between FEM and DNV predictions, at least when the plane strain behavior was used. The effect of other parameters, like hardening modulus, steel grade and eccentricity on collapse pressure was also studied. Finally, the collapse pressure of the pipe prior to and after thermal aging was calculated.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

SYNOPSIS

In recent years, with the constantly increasing length of pipelines and the higher internal operation pressure, the development of High Strength Alloy Steels (HSLA) has been of paramount importance, in the effort of reducing the cost of these pipelines. Especially in the case of deepwater pipelines, the internal operation pressure does not play the major role, but it is the external hydrostatic pressure that needs to be concerned. Therefore, the design criteria of deepwater pipelines mainly focus on their collapse behavior under external hydrostatic pressure, hence there is a trend in pipelines' manufacture, which is based on high deformability (strain-based design). The design against the hydrostatic pressure is differentiated from the corresponding against internal pressure, because it is more dependent on the compressive yield strength around pipe's circumference than on the tensile yield strength. Consequently, measures must be taken referring not only to compressive yield strength, but also with regards to external diameter-wall thickness ratio (D/t), ovality, residual stresses and material inhomogeneity of the pipe.

Deepwater pipelines are usually manufactured through a cold forming process, called JCOE (four stages-pipe initial shape "J", then "C" and "O" and finally the mechanical expansion "E"), which is followed by the welding process of the pipe with the LSAW method, namely Longitudinal Submerged Arc Welding. Although the compressive yield strength decreases during this cold forming process and specifically in the last stage of mechanical expansion, it increases again after the coating process, thanks to thermal aging that takes place at temperatures between 200 and 240°C. During thermal aging nitrides and carbides are expected to precipitate from a solid solution to the dislocations and thereby locking them and in this way delaying material yielding.

Controlling the stress-strain curve of pipelines is indispensable, since parameters like Y/T , uniform elongation and hardening modulus define pipeline's deformability. It is also essential that pipe's collapse pressure due to hydrostatic pressure be specified, as it is one of the most common reasons of pipelines' failure.

For all the aforementioned, compression tests of specimens taken from the longitudinal axis around pipe's circumference were conducted. The results indicate that the specimens that were simply compressed show a yield strength deviation of about 17.2

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Mpa and that there is a slight difference in yield strength between 0°, 90°, 180° and 270° positions, with the 90° having the lowest value of the four (**Figure 1, Figure 2**)

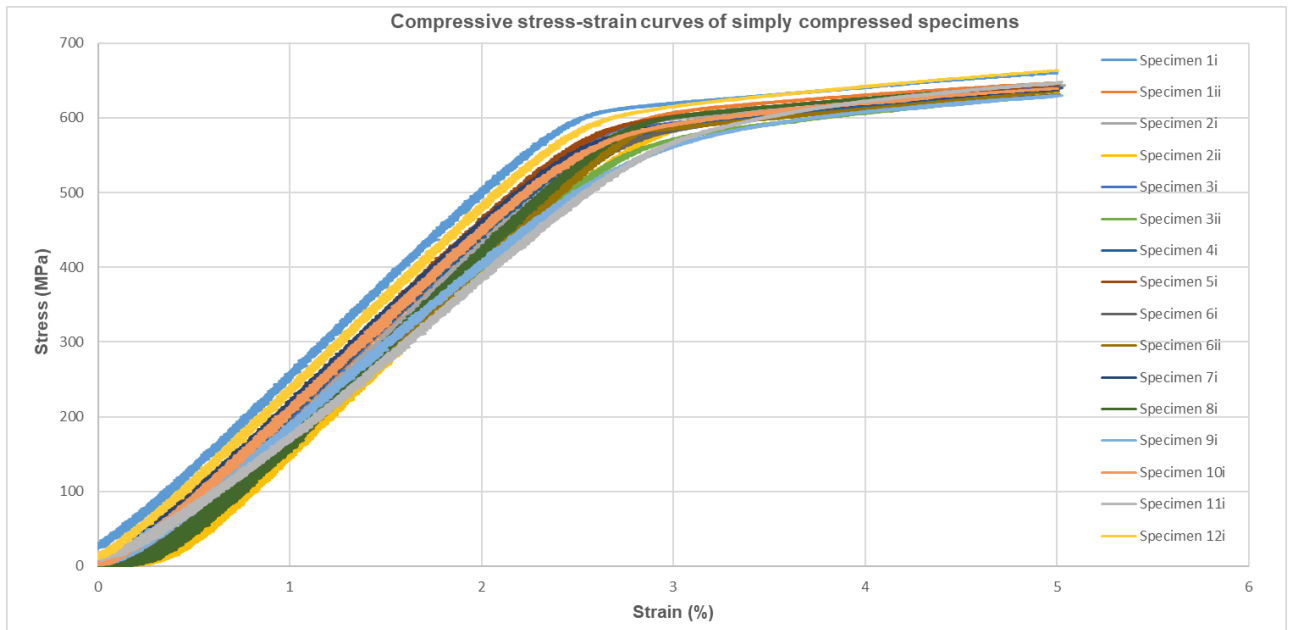


Figure 1 Compressive stress-strain curves of simply compressed specimens.

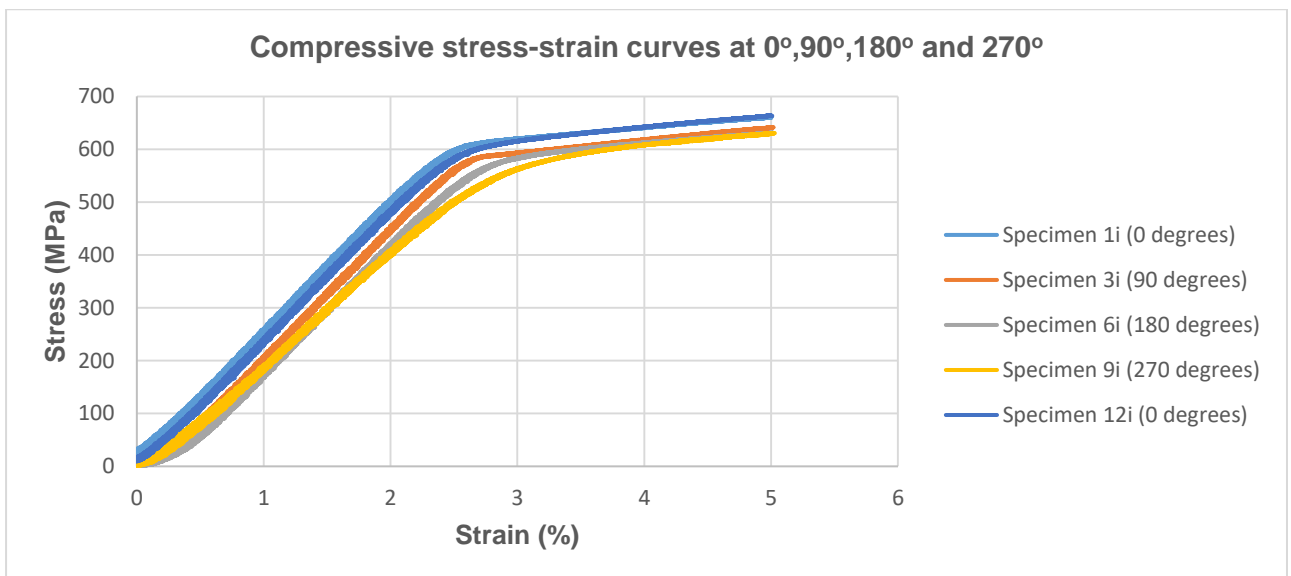


Figure 2 Compressive stress-strain curves at 0°, 90°, 180° and 270°.

For those specimens that were thermal aged at 250 and 280°C for 1 hour prior to compression testing, the mean increase, compared to those that were simply compressed and taken from the same position, is 20.13 Mpa (3.57%) and two characteristic stress-strain curves which demonstrate that difference are being presented in **Figure 3**. Although the compressive yield strength increment is relatively

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

small and cannot be surely attributed to carbides'/'nitrides' precipitation due to thermal aging, the phase diagram as it was calculated in software Thermocalc (**Figure 4**), taking the chemical composition of pipe's material into account, shows that carbides $M_{23}C_6$ and M_6C can be precipitated at temperatures between about 260 and 300°C.

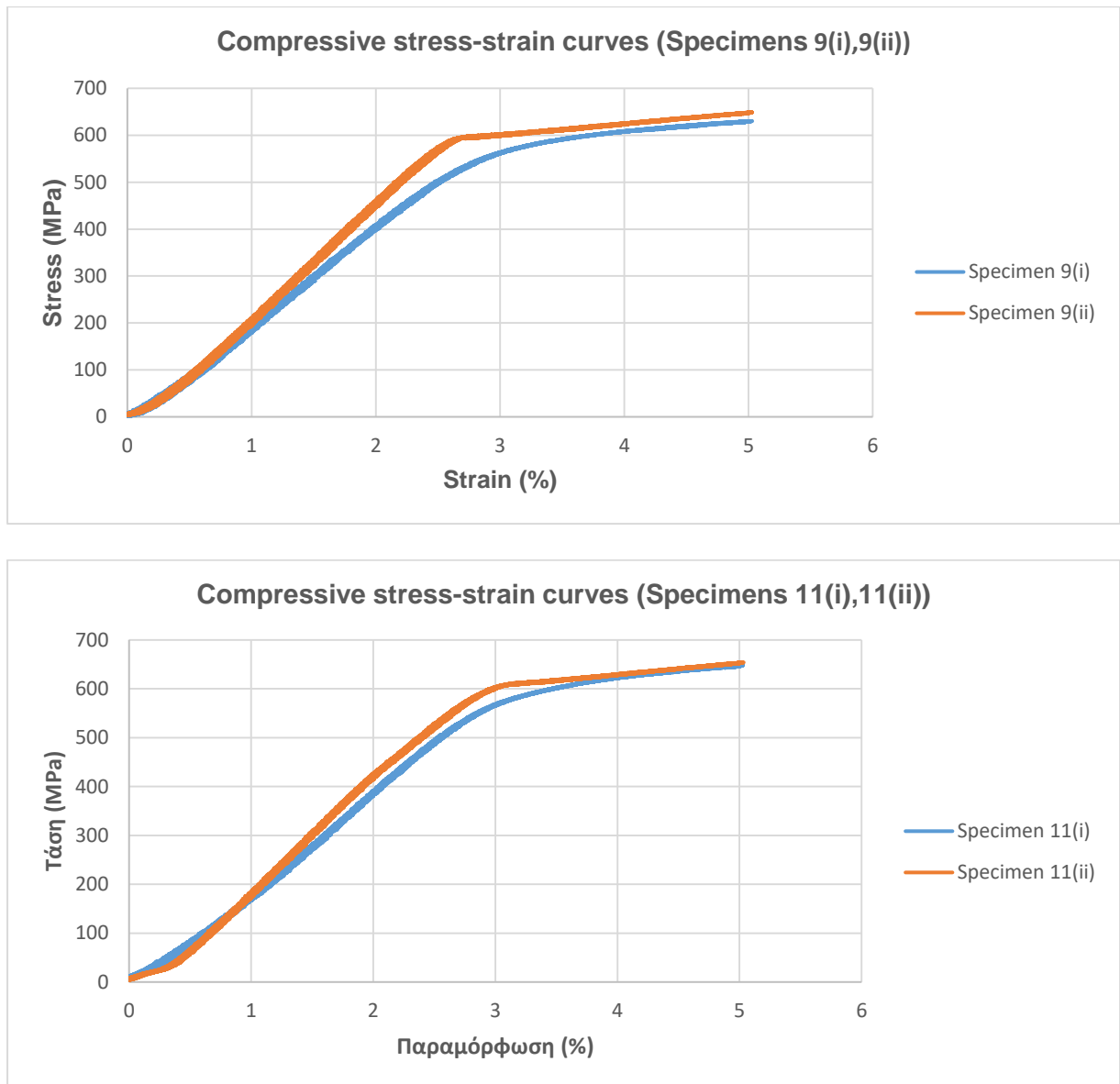


Figure 3 Characteristic compressive stress-strain curves of specimens, simply compressed and thermal aged before compression, taken from the same position.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

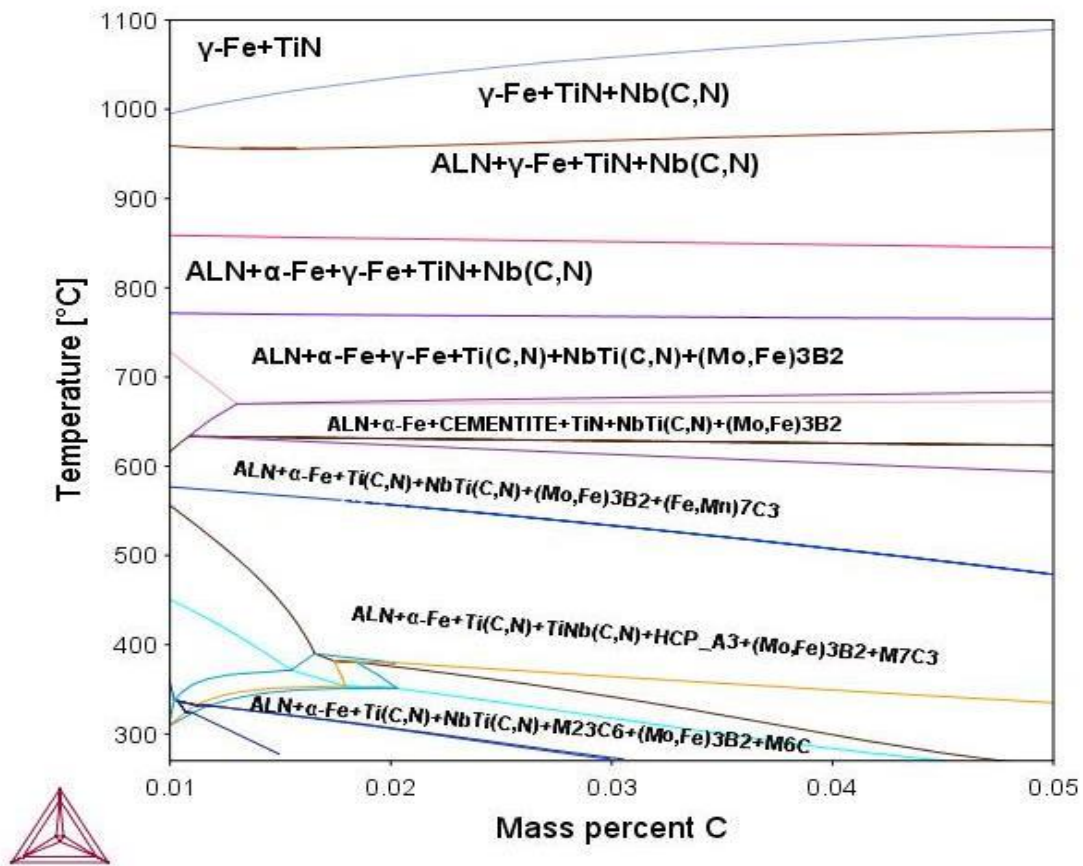


Figure 4 Phase diagram calculated in ThermoCalc.

As for the tensile tests of specimens taken from the same positions with compression specimens, two groups of stress-strain curves are noticed, one in which the yield strength is lower but the uniform elongation is higher and another one where the yield strength is higher, but the uniform elongation is lower (**Figure 5**). The specimen 12 is not included because it broke out of the gauge length and thus it cannot be evaluated.

As far as the values of yield strength, for both compression and tension at the same positions, are concerned, compressive yield strength is higher than tensile yield strength at the 8 out of 11 positions (**Figure 6**), but at 3 positions the compressive yield strength is lower than the tensile yield strength, presumably because of the mechanical expansion process.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

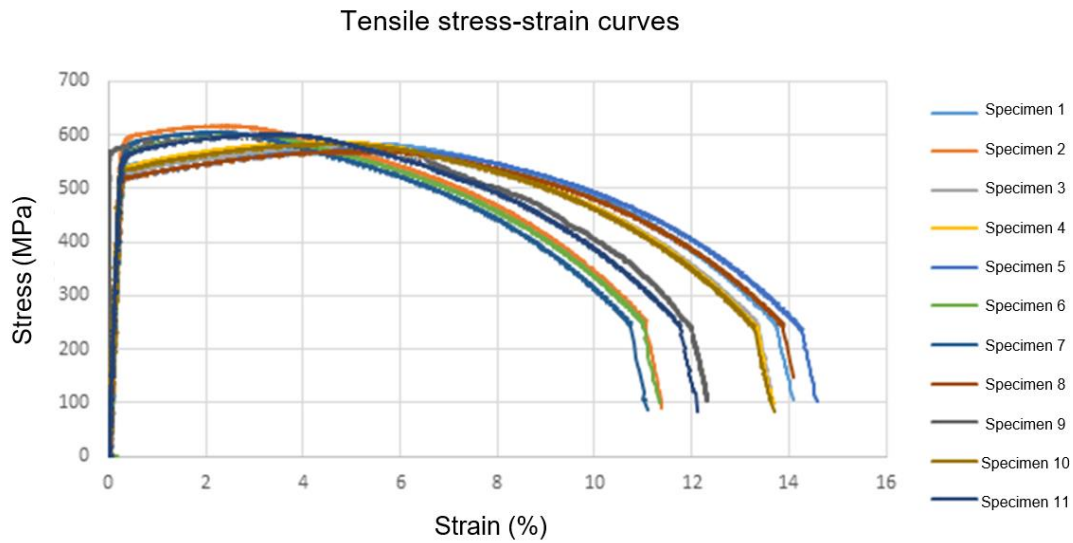


Figure 5 Tensile stress-strain curves.

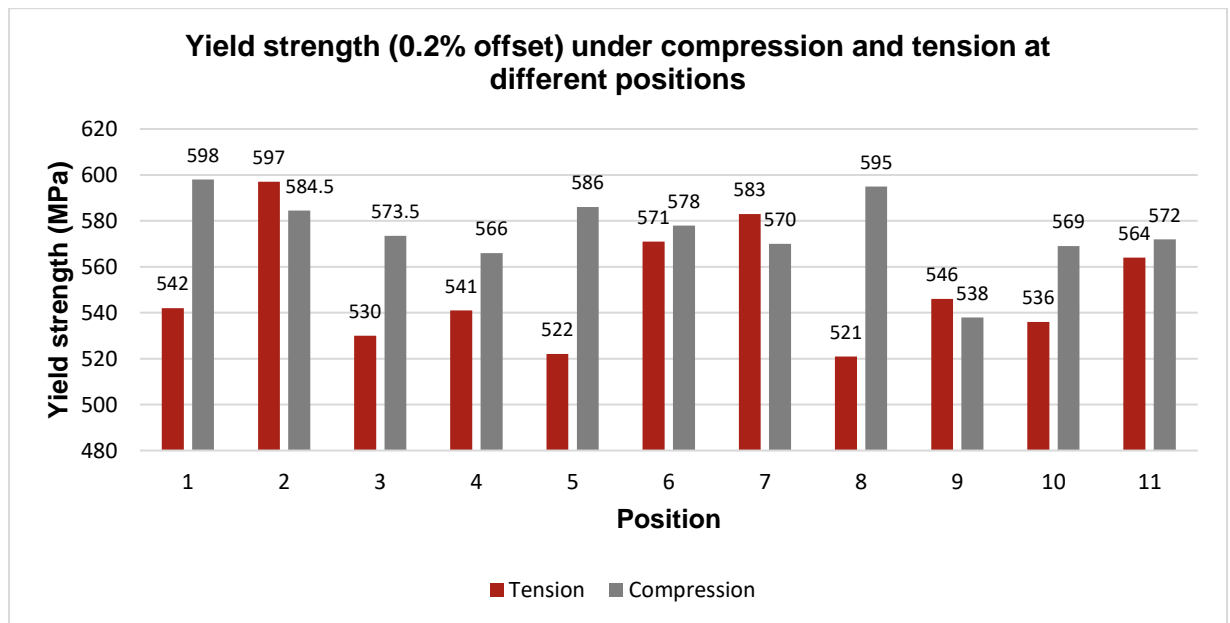


Figure 6 Yield strength (0.2% offset) under compression and tension at different positions.

The results from the simulation of the 2D pipe ring indicate that:

- The collapse pressure decreases when the D/t increases (**Figure 7**, **Figure 8**).
- The higher the D/t is the less sensitive is the pipe in the increase of ovality (**Table 1**).
- Values that are calculated by the DNV standard are approached very closely by the FEM model, at least when the plane strain behavior is used, where the

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

deviation is only 2.04%, whereas with the plane stress behavior the deviation is 10.49%.

- The DNV standard estimates very low collapse pressures for pipes with $D/t < 15$.

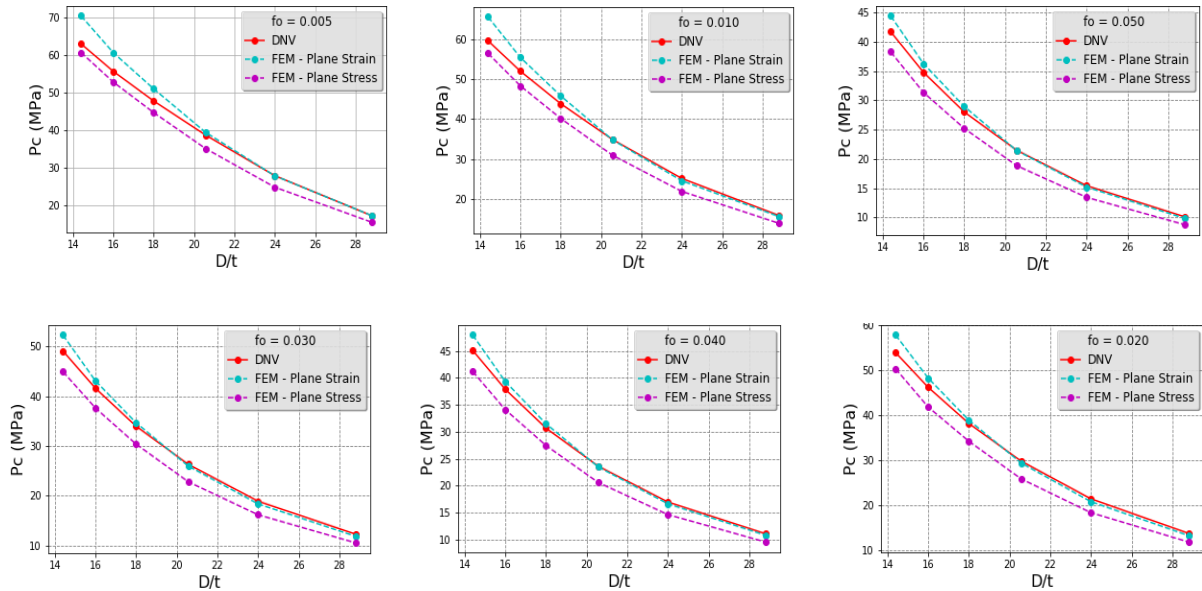


Figure 7 Collapse pressure- D/t diagrams of pipes with different ovalities.

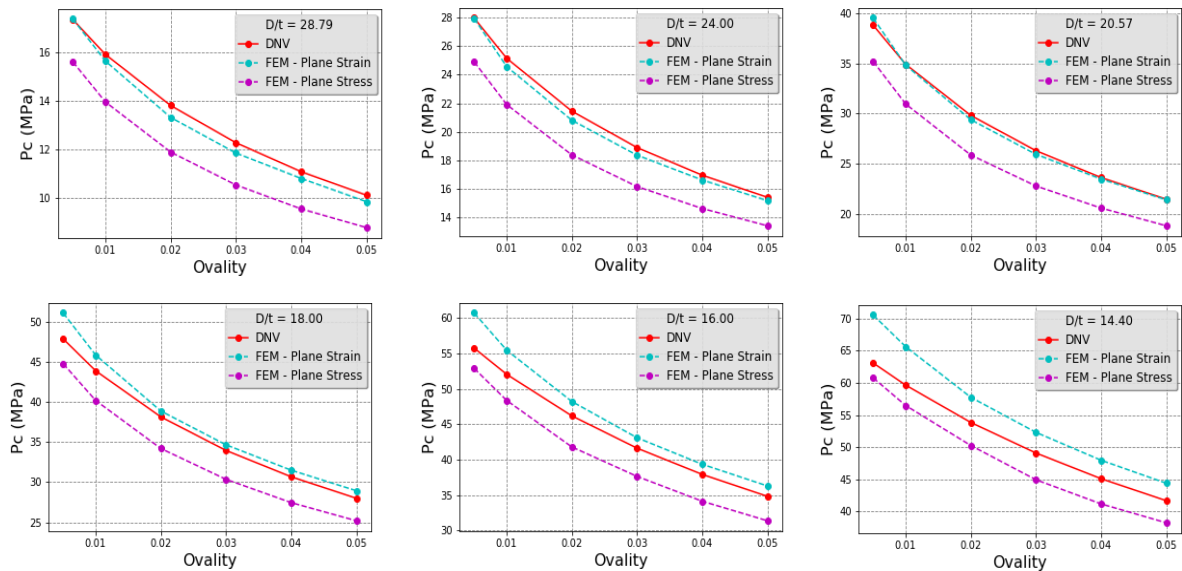


Figure 8 Collapse pressure-Ovality diagrams of pipes with different D/t .

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Table 1 Collapse pressure decrease of pipes with 0.5% and 5% ovality.

| D/t | $P_c (f_0=0.5\%)$ | $P_c (f_0=5\%)$ | ΔP_c |
|-------|-------------------|-----------------|--------------|
| 14.4 | 62.95 | 41.4 | 21.55 |
| 16 | 55.55 | 34.48 | 21.07 |
| 18 | 47.5 | 27.67 | 19.83 |
| 20.57 | 38.12 | 21.15 | 16.97 |
| 24 | 27.09 | 15.11 | 11.98 |
| 28.79 | 16.67 | 9.87 | 6.8 |

The results from the simulations conducted in the search of other parameters' effect on collapse pressure demonstrate that:

- The effect of hardening modulus on collapse pressure is not significant, while it is conspicuous that the lower the D/t is the bigger is the effect of hardening modulus' increase on collapse pressure's increment (**Figure 9**).
- The pipe grade that is used affects more the collapse pressure of pipes with lower D/t (**Figure 10**).
- The D/t does not affect pipe's sensitivity in eccentricity, because for a pipe with the same characteristics and eccentricity, but with higher ovality, the decrease in collapse pressure is found to be lower.
- Pipe's collapse pressure is increased by 2.1%, thanks to compressive yield's strength increment due to thermal aging.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

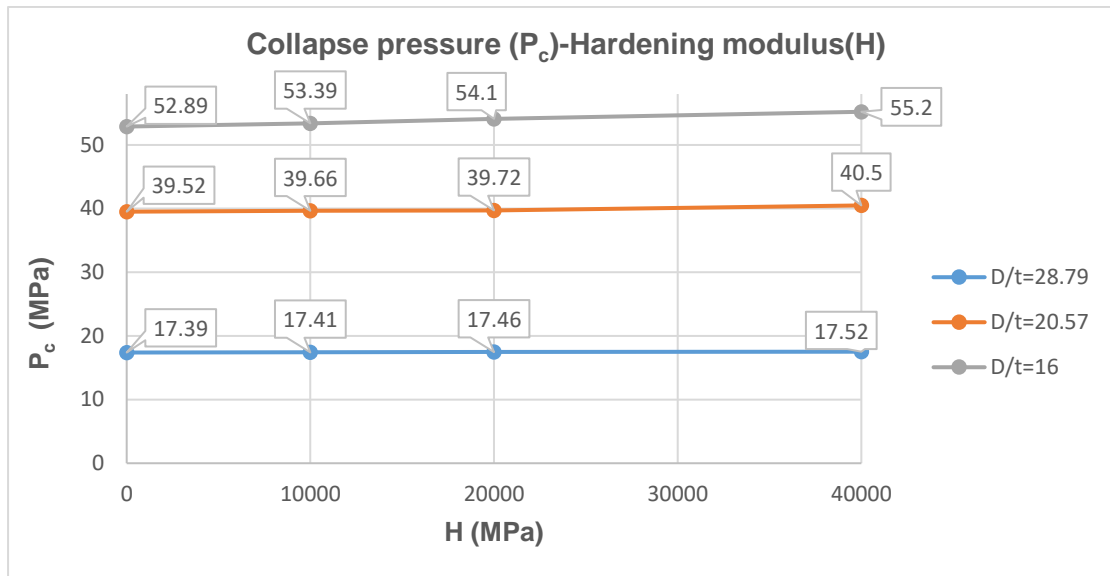


Figure 9 Collapse pressure-Hardening modulus diagram of pipes with different D/t.

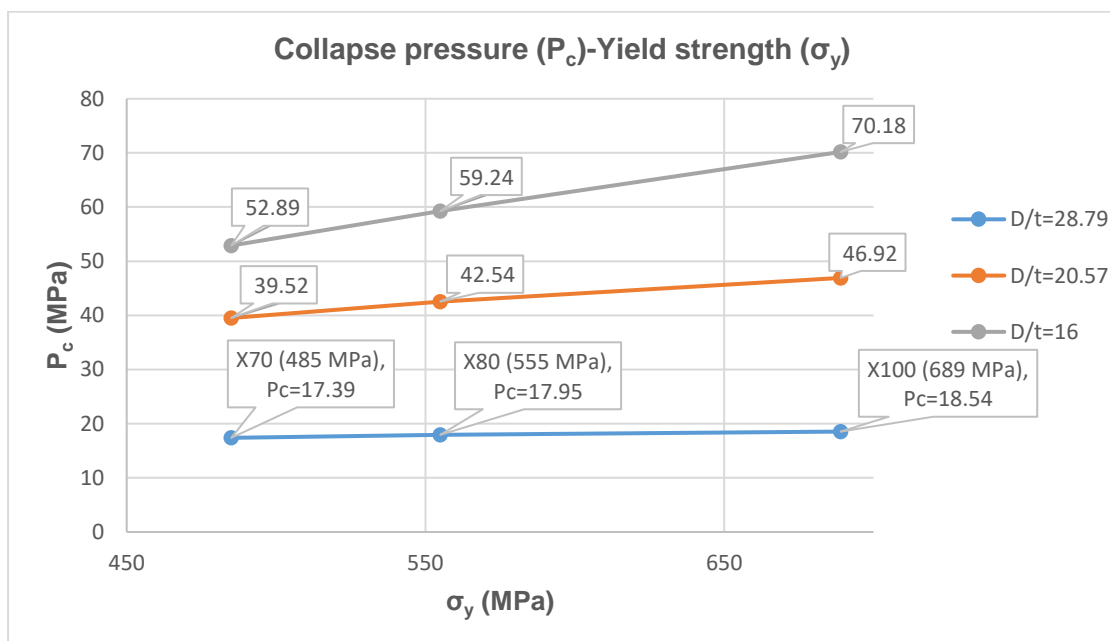


Figure 10 Collapse pressure-Yield strength diagram of pipes with different D/t.

In terms of further research, tensile tests of specimens taken from all the other axes must be conducted, so that we can examine the yield strength anisotropy and utilize the data in FEM models. There is also a need of a TEM analysis, so as to be possible for us to confirm whether there is precipitation of carbides and nitrides during thermal aging and if the compressive yield strength increment can be ascribed to their presence. What's more, the effect of residual stresses on collapse pressure is critical and it has to be assessed. Finally, the Ramberg-Osgood stress-strain curve should be

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

used in FEM models, which ensures a normal transition from elastic to plastic deformation's region and the effect of thermal aging on pipe's tensile properties must be evaluated, followed by the recalculation of pipe's collapse pressure.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 ΜΙΚΡΟΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (HSLA STEELS)

1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ-ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ HSLA

Οι μικροκραματωμένοι χάλυβες HSLA αντιπροσωπεύουν μια ομάδα χαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, στους οποίους χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες κραματικών στοιχείων, όπως Mo, Nb, Ti και V, προκειμένου να αποκτήσουν όριο διαρροής μεγαλύτερο από 275 MPa (40 ksi) αμέσως μετά την έλασή τους [16], [35]. Αυτού του είδους οι χάλυβες χαρακτηρίζονται από καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μερικές φορές εμφανίζουν καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση από τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες μετά από έλαση, ενώ επειδή η επιθυμητή αντοχή των HSLA χαλύβων μπορεί να επιτευχθεί και με μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, η συγκολλησιμότητα τους ενδέχεται να είναι ακόμα και καλύτερη από την αντίστοιχη των κοινών ανθρακούχων [35].

Οι χάλυβες HSLA, λοιπόν, χωρίζονται στις παρακάτω έξι κατηγορίες:

- Χάλυβες σκληρυνόμενοι στον αέρα (weathering steels), οι οποίοι περιέχουν μικρές ποσότητες κραματικών στοιχείων, όπως είναι ο χαλκός και ο φώσφορος, προκειμένου να βελτιωθεί η αντίστασή τους στην ατμοσφαιρική διάβρωση και να επιτευχθεί σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος.
- Μικροκραματωμένοι φερριτοπερλιτικοί χάλυβες (microalloyed ferrite-pearlite steels), οι οποίοι περιέχουν πολύ μικρές προσθήκες (συνήθως μικρότερες από 0,1%) ισχυρών καρβιδιογόνων ή καρβονιτριδιογόνων στοιχείων, όπως είναι το νιόβιο, το βανάδιο και/ή το τιτάνιο για σκλήρωση με κατακρήμνιση, εκλέπτυνση των κόκκων και πιθανώς έλεγχο των θερμοκρασιών μετασχηματισμού.
- Περλιτικοί χάλυβες που προέρχονται από διαδικασία έλασης (as-rolled steels), οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν τους ανθρακομαγνανιούχους χάλυβες, αλλά έχουν επιπλέον κάποιες μικρές προσθήκες από άλλα κραματικά στοιχεία για την ενίσχυση της αντοχής, της δυσθραυστότητας, της διαμορφωσιμότητας και της συγκολλησιμότητας.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

- Χάλυβες βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite steels) ή αλλιώς (μπαινιτικοί χαμηλού άνθρακα, low-carbon bainite), με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,08 (<0,08% wt C), οι οποίοι επιδεικνύουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό ορίου διαρροής, συγκολλησιμότητας, διαμορφωσιμότητας και δυσθραυστότητας.
- Διφασικοί χάλυβες (dual-phase steels), η μικροδομή των οποίων αποτελείται από μαρτενσίτη, ο οποίος είναι διεσπαρμένος στη φερριτική μήτρα, προσφέροντας έτσι έναν καλό συνδυασμό ολκιμότητας και υψηλής εφελκυστικής αντοχής.
- Χάλυβες με ελεγχόμενου σχήματος εγκλείσματα (inclusion shape controlled steels), τα οποία προσφέρουν βελτιωμένη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα κατά το πάχος, λόγω των μικρών προσθηκών ασβεστίου, ζirkονίου, τιτανίου ή ακόμα και σπάνιων-γαιών, έτσι ώστε να αλλάξει το σχήμα των εγκλεισμάτων των σουλφιδίων και από επιμήκη να γίνουν τελικώς σχεδόν σφαιροειδή και διεσπαρμένα στη μικροδομή.
- Χάλυβες ανθεκτικοί στη ψαθυροποίηση μέσω υδρογόνου με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και σε σουλφίδια και με έλεγχο του σχήματος των εγκλεισμάτων και περιορισμένο διαφορισμό του μαγγανίου, σε συνδυασμό με περιεκτικότητα σε χαλκό μεγαλύτερη από 0,26% κατά βάρος (wt%).

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που επισημάνθηκαν επτά κατηγορίες, δεν είναι απαραίτητο να αποτελούν διακριτές ομάδες HSLA χαλύβων, διότι ενδέχεται σε όλες τις προαναφερθείσες κατηγορίες χαλύβων να υπάρχει, για παράδειγμα, έλεγχος του μεγέθους των εγκλεισμάτων [35].

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι χάλυβες HSLA είναι στην κατασκευή σωλήνων, οι οποίοι αποτελούν την πιο αποδοτική λύση για μαζική μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου [48]. Σύμφωνα, λοιπόν, με το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Πετρελαίου (API-America Petroleum Institute) οι σωλήνες έχουν χαρακτηριστικό όνομα X το οποίο ακολουθείται από έναν αριθμό (π.χ. X70, X80, X100), ο οποίος υποδηλώνει το όριο διαρροής τους σε ksi (δηλαδή X70=70*6.89=483 MPa).

1.1.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ-ΑΝΘΡΑΚΑ

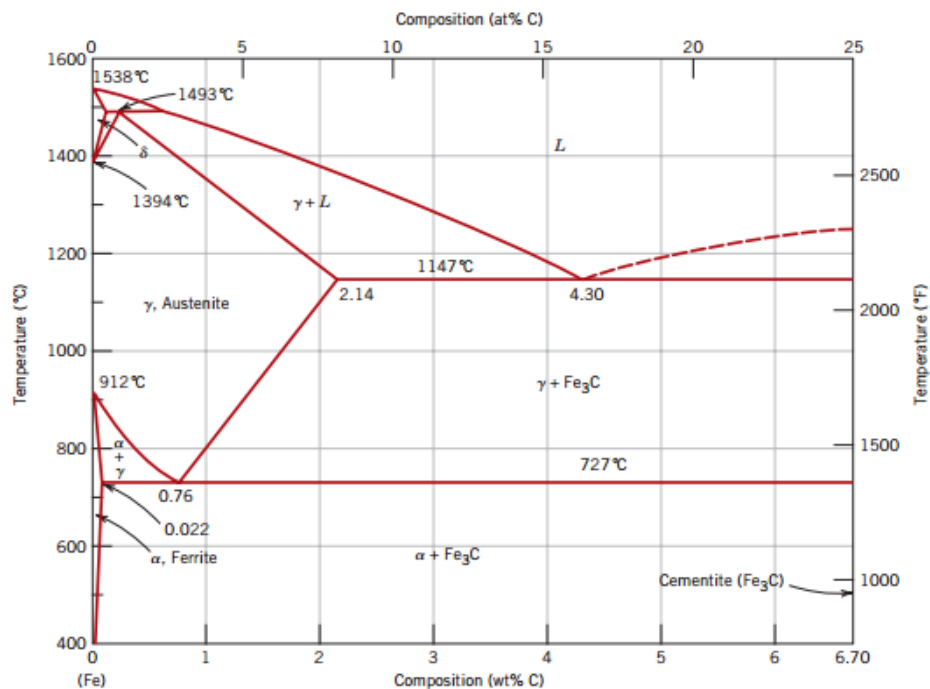
Ο σίδηρος (Fe) είναι ένα αλλοτροπικό στοιχείο, γεγονός που σημαίνει ότι η κρυσταλλική του δομή μπορεί να μεταβληθεί, εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία [48]. Έτσι, ο σίδηρος κρυσταλλώνεται είτε στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (BCC), είτε στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC). Στο πρώτο σύστημα ανήκουν οι φάσεις του σιδήρου α-φερρίτης και δ-φερρίτης, ενώ στο δεύτερο ανήκει η φάση του γ-ωστενίτη. Επιπλέον, υπάρχει και μία μετασταθής ένωση, η οποία ονομάζεται σεμεντίτης (Fe_3C) και κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό σύστημα μέγιστης πυκνότητας (HCP).

Το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C (**Εικόνα 1.1**) είναι ουσιαστικά ένας χάρτης, ο οποίος αποτυπώνει τις φάσεις σιδήρου που σχηματίζονται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα σε συγκεκριμένα θερμοκρασιακά εύρη. Βέβαια, η ύπαρξη των φάσεων σε αυτό το διάγραμμα στα συγκεκριμένα θερμοκρασιακά εύρη προϋποθέτει κατάσταση ισορροπίας (equilibrium), δηλαδή αργούς ρυθμούς απόψυξης [48]. Σε κατάσταση ισορροπίας, λοιπόν, ο α-φερρίτης υφίσταται μέχρι τη θερμοκρασία των $912^{\circ}C$ ($1675^{\circ}F$), ο γ-ωστενίτης υφίσταται στο θερμοκρασιακό εύρος των $912-1394^{\circ}C$ ($1675-2540^{\circ}F$) και ο δ-φερρίτης στο θερμοκρασιακό εύρος των $1394-1538^{\circ}C$ ($2540-2800^{\circ}F$), δηλαδή μέχρι το σημείο τήξης του καθαρού σιδήρου [48]. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε κατάσταση ισορροπίας είναι οι εξής [48], [58] :

- $1493^{\circ}C$: δ-φερρίτης (0.1% wt C) + Υγρό (4.30% wt C) = γ-ωστενίτης, δηλαδή μια περιτηκτική αντίδραση, στην οποία κατά τη διάρκεια της ψύξης μια στερεή φάση αντιδρά με μια υγρή προς το σχηματισμό μιας στερεής φάσης.
- $1147^{\circ}C$: Υγρό (4.30% wt C) = Fe_3C (6.70% wt C) + γ-ωστενίτης (2.14% wt C), δηλαδή μια ευτηκτική αντίδραση, στην οποία κατά τη διάρκεια της ψύξης μια υγρή φάση οδηγεί στο σχηματισμό δύο στερεών φάσεων.
- $727^{\circ}C$: γ-ωστενίτης (0.76% wt C) = α-φερρίτης (0.022% wt C) + Fe_3C (6,70% wt C), δηλαδή μια ευτηκτοειδής αντίδραση, στην οποία κατά τη διάρκεια της ψύξης μια στερεή φάση οδηγεί στο σχηματισμό δύο νέων στερεών φάσεων.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Οι κρίσιμες θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο διάγραμμα είναι η A_1 (727°C), δηλαδή η ευτηκτοειδής θερμοκρασία, που είναι η ελάχιστη θερμοκρασία για το σχηματισμό ωστενίτη, η A_3 (912°C) που αποτελεί το κατώτατο θερμοκρασιακό όριο μεταξύ ωστενιτικής και ωστενιτικής+φερριτικής περιοχής και τέλος η θερμοκρασία A_{cm} (1147°C), η οποία οριοθετεί τις περιοχές ωστενίτη και ωστενίτη+ Fe_3C [53]. Οι θερμοκρασίες αυτές ισχύουν μόνο σε κατάσταση ισορροπίας, όπου όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ρυθμοί απόψυξης είναι πολλοί αργοί. Σε περίπτωση ισορροπίας οι θερμοκρασίες αυτές συμβολίζονται A_{e1} , A_{e3} , A_{ecm} (equilibrium). Όμως με την προσθήκη κραματικών στοιχείων και με πιο γρήγορους ρυθμούς απόψυξης ή θέρμανσης, δηλαδή σε συνθήκες εκτός ισορροπίας (paraequilibrium), οι θερμοκρασίες αυτές διαφοροποιούνται και έτσι έχουμε πλέον τις θερμοκρασίες A_{c1} , A_{c3} , A_{ccm} κατά τη θέρμανση (chauffant) και A_{r1} , A_{r3} , A_{rcm} κατά τη ψύξη (refroidissant) [48], [53].

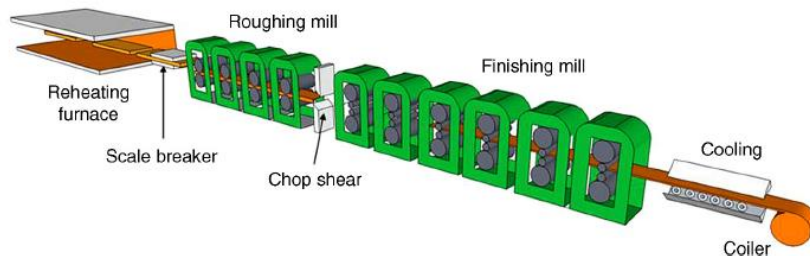


Εικόνα 1.1 Διάγραμμα ισορροπίας Fe-C [58].

1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ-ΕΠΗΡΕΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

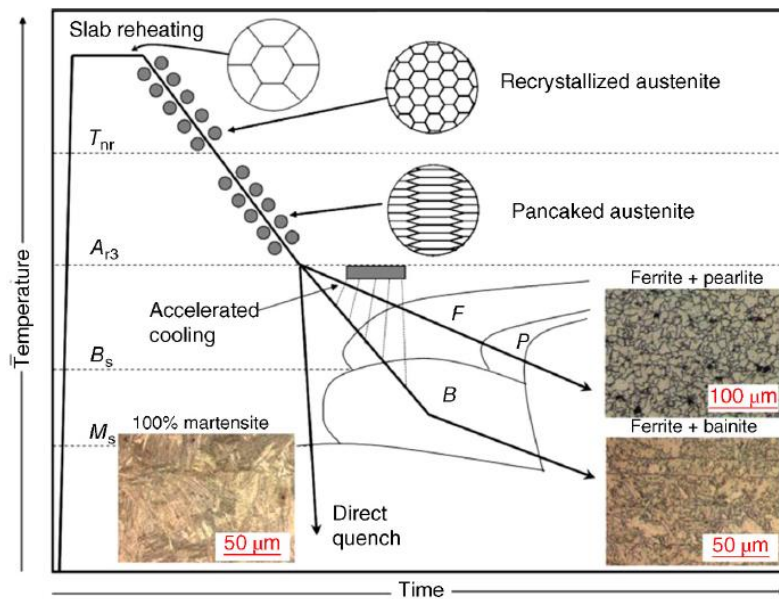
1.2.1 Θερμομηχανικές κατεργασίες (Thermomechanical Processes-TMCP)

Οι επιθυμητές ιδιότητες στους HSLA χάλυβες επιτυγχάνονται κυρίως μέσω της εκλέπτυνσης των κόκκων του φερρίτη και της κατακρήμνισης καρβονιτριδίων, τα οποία προέρχονται από τις μικροκραματικές προσθήκες [59]. Για τη βελτιστοποίηση των επιδράσεων αυτών χρησιμοποιούνται θερμομηχανικές κατεργασίες (Thermomechanical Processes-TMCP), κατά τη διάρκεια των οποίων εφαρμόζονται ταυτόχρονα θερμικοί κύκλοι, αλλά και κύκλοι απόψυξης στο υλικό, συνδυαζόμενοι με την εφαρμογή παραμόρφωσης, με την θερμομηχανική έλαση να είναι η πιο διαδεδομένη [18], [22], [23], [24], [35]. Τα βασικά στάδια που ακολουθούνται κατά τις θερμομηχανικές διεργασίες είναι αρχικά επαναθέρμανση της πλάκας του χάλυβα, η αρχική έλαση ενδοτράχυνσης (roughing), η τελική έλαση (finishing rolling) και τέλος η ελεγχόμενη απόψυξη [79].



Εικόνα 1.2 Τυπική διάταξη έλασης με τον επιμέρους βοηθητικό εξοπλισμό [79].

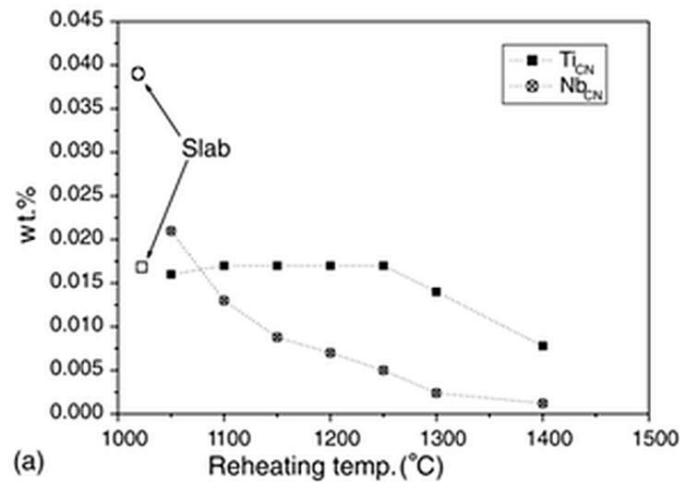
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



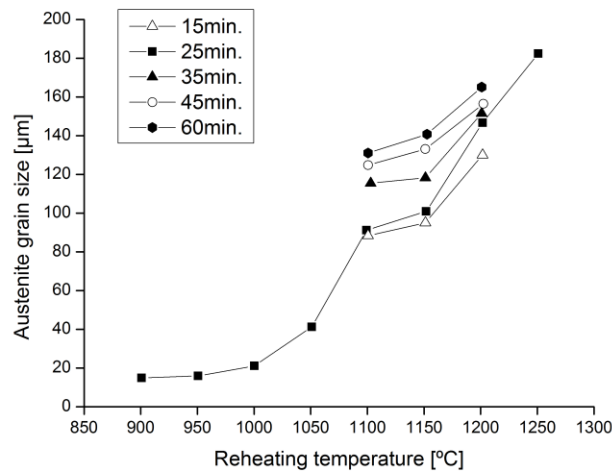
Εικόνα 1.3 Διάγραμμα της θερμομηχανικής κατεργασίας της έλασης (TMCP) και των μικροδομών που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία [79].

Η επαναθέρμανση πλάκας (Slab reheating) αποτελεί το πρώτο στάδιο στη γραμμή παραγωγής της συμβατικής ελεγχόμενης έλασης, κατά το οποίο επαναθερμαίνεται η πλάκα που προκύπτει από τη χύτευση. Αυτό γίνεται διότι η πλάκα αμέσως μετά τη χύτευση χαρακτηρίζεται από μικροδιαφορισμό των κραματικών στοιχείων, αλλά και από μακροδιαφορισμό κατά την κεντρική γραμμή της πλάκας. Ο διαφορισμός αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο, διότι οδηγεί σε ανομοιομορφίες στο μέγεθος των κόκκων στη μικροδομή της πλάκας, αλλά ακόμα και σε διαφορετικές μικροδομές κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της πλάκας. Η επαναθέρμανση της πλάκας, λοιπόν, δεν εξαλείφει το φαινόμενο του διαφορισμού, αλλά δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες, έτσι ώστε να ελέγχεται η μικροδομή, μέσω του καθορισμού του μεγέθους κόκκου του ωστενίτη και του επιπέδου διάλυσης των κραματικών στοιχείων στον ωστενίτη [79]. Η διάλυση κατακρημνισμάτων όπως Nb(CN) και Ti(CN) επηρεάζεται από τη θερμοκρασία αναθέρμανσης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1.4** [80]. Υψηλές θερμοκρασίες αναθέρμανσης προωθούν τη μεγέθυνση των κόκκων του ωστενίτη (**Εικόνα 1.5**), κάτι που είναι ανεπιθύμητο, γι' αυτό και η θερμοκρασία αναθέρμανσης που θα επιλεγεί θα πρέπει να οδηγεί μεν στη διαλυτοποίηση των κραματικών στοιχείων, αλλά παράλληλα να εμποδίζει τη σημαντική μεγέθυνση των κόκκων του ωστενίτη [92].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.4 Ποσότητα Nb(CN) και Ti(CN) (wt %) σε χάλυβα HSLA μετά από αναθέρμανση για 1 ώρα σε διάφορες θερμοκρασίες [80].

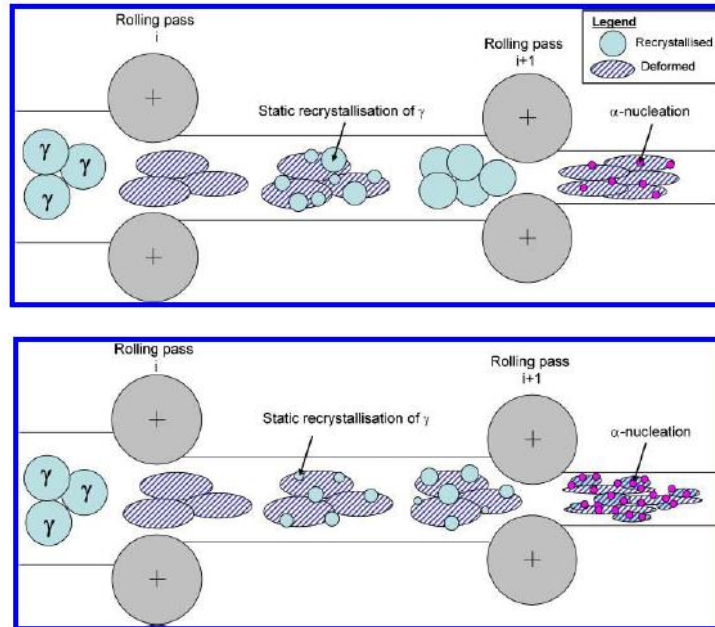


Εικόνα 1.5 Μέγεθος κόκκου ωστενίτη (μm), ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο αναθέρμανσης [92].

Όταν η παραμόρφωση κατά την έλαση πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την T_{NR} οι πλήρως ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι ωστενίτη που προκύπτουν είναι ισαξονικοί, ενώ χωρίς περαιτέρω ανακρυστάλλωση θα συνεχίσουν να μεγαθύνονται [57], [62]. Παραμορφώσεις μεταξύ των θερμοκρασιών T_{NR} και A_{r3} οδηγούν στο σχηματισμό ενδοκρυσταλλικών σφαλμάτων στον ωστενίτη, όπως παραμορφωμένα όρια κόκκων και ζώνες παραμόρφωσης, τα οποία δρουν ως σημεία

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

πυρήνωσης για το φερρίτη, με αποτέλεσμα η μικροδομή να αποτελείται τελικά από μια μείξη ανακρυσταλλωμένων κόκκων ωστενίτη και μερικών παραμορφωμένων (επιμηκυμένοι ή αλλιώς “pancaked” κόκκοι) (**Εικόνα 1.6**) [57], [62].



Εικόνα 1.6 Σχηματική αναπαράσταση της παραμόρφωσης μεταξύ δύο διαδοχικών υποβιβασμών κατά την έλαση σε θερμοκρασία: Επάνω) μεγαλύτερη από την T_{NR} , όπου υφίσταται ολοκληρωμένη στατική ανακρυστάλλωση και Κάτω) μικρότερη από την T_{NR} , όπου σημαντικά παραμορφωμένοι κόκκοι ωστενίτη (“pancaked” grains) οδηγούν στην ύπαρξη περισσότερων θέσεων πυρήνωσης για το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη [51].

Οι τύποι θερμομηχανικής έλασης που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθοι:

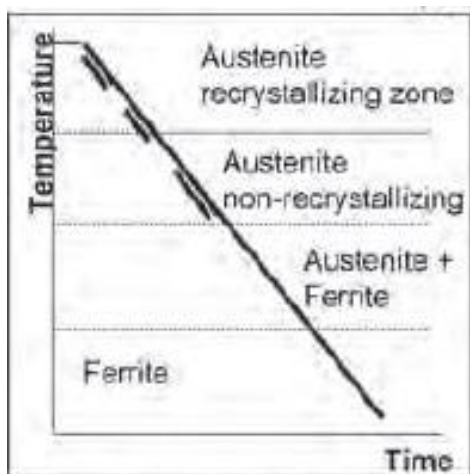
Η *συμβατική ελεγχόμενη έλαση* (Conventional Controlled Rolling-CCR), η οποία συνήθως χρησιμοποιείται σε χάλυβες με φερριτικές και φερριτοπερλιτικές μικροδομές. Με τον όρο ελεγχόμενη έλαση εννοείται η διεργασία έλασης κατά την οποία παράμετροι που σχετίζονται με την έλαση, όπως η θερμοκρασία έλασης, η παραμόρφωση, ο ρυθμός παραμόρφωσης, ο αριθμός των υποβιβασμών και η θερμοκρασία λήξης της έλασης, είναι προκαθορισμένοι και μπορούν να οριστούν με ακρίβεια για κάθε τύπο χάλυβα [35].

Η θερμοκρασία λήξης ανακρυστάλλωσης (T_{NR}) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά την έλαση. Η ανακρυστάλλωση είναι ο σχηματισμός νέων ισαξονικών κόκκων, οι οποίοι είναι απαλλαγμένοι από

παραμορφώσεις και λαμβάνει χώρα όταν ένα υλικό έχει υποστεί την απαιτούμενη παραμόρφωση και έχει θερμανθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να υπάρχει αρκετή ενέργεια διαθέσιμη, προκειμένου να προωθηθεί η ανακρυστάλλωση [62]. Στις χαλύβδινες πλάκες η παραμόρφωση που απαιτείται προσφέρεται μέσω της έλασης. Η θερμοκρασία T_{NR} είναι εξέχουσας σημασίας, διότι σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτή σταματά η στατική ανακρυστάλλωση για δεδομένο χρόνο παραμονής [17], [20], [62]. Προφανώς δε μπορεί να μη συμπεριληφθεί στις κρίσιμες θερμοκρασίες κατά την έλαση και η A_{r3} , η οποία αποτελεί τη θερμοκρασία εκκίνησης του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε φερρίτη. Στατική ανακρυστάλλωση (static recrystallization) υφίστανται οι κόκκοι μεταξύ των υποβιβασμών της έλασης, όπου δεν υπάρχει επιβολή παραμόρφωσης και οι κόκκοι αρχίζουν να μεγαλώνουν. Αντίθετα, όταν η πλάκα βρίσκεται στο ρολό του υποβιβασμού και εφόσον έχει συσσωρευθεί αρκετό ποσό παραμόρφωσης από πριν, πραγματοποιείται ανακρυστάλλωση, η οποία πλέον ονομάζεται δυναμική ανακρυστάλλωση (dynamic recrystallization).

Έτσι, λοιπόν, στη συμβατική ελεγχόμενη έλαση (CCR) (**Εικόνα 1.7**), η θερμοκρασία στην οποία επιβάλλεται η τελική έλαση είναι χαμηλότερη από την T_{NR} . Αυτός ο τύπος έλασης περιλαμβάνει την ενδοτράχυνση του χαλυβδόφυλλου στο ανώτερο θερμοκρασιακό εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης και τον τερματισμό της διεργασίας της έλασης στο κατώτερο θερμοκρασιακό εύρος, έτσι ώστε να επιτευχθεί κατακρήμνιση φάσεων τύπου MX (M =μεταλλικό στοιχείο, X =μη μεταλλικό στοιχείο) και να περιοριστεί η ανάπτυξη των κόκκων του ανακρυσταλλωμένου ωστενίτη ανάμεσα στους υποβιβασμούς-πάσα. Η θερμοκρασία στην οποία συνήθως τελειώνει η έλαση είναι ελάχιστα μικρότερη από τη θερμοκρασία λήξης ανακρυστάλλωσης (T_{NR}) και λίγο υψηλότερη από τη θερμοκρασία A_{r1} ή A_{r3} , ενώ στη συνέχεια ακολουθεί απόψυξη του προϊόντος στον αέρα. Η ύπαρξη επιπέδων ολίσθησης και επιπέδων παραμορφώσεων στον μη ανακρυσταλλωμένο ωστενίτη προκαλεί μια αύξηση του αριθμού των περιοχών που ευνοούν το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη ($\gamma \rightarrow \alpha$), οδηγώντας έτσι σε μια λεπτομερή μικροδομή του χαλύβδινου προϊόντος [30], [37], [54], [57], [59], [72], [78].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



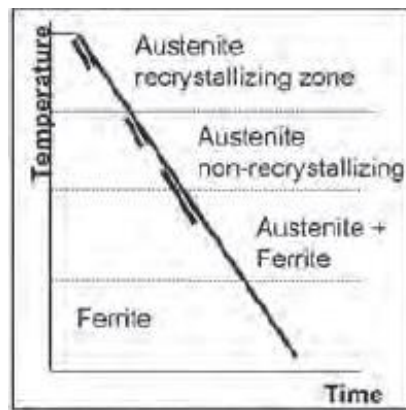
Εικόνα 1.7 Συμβατική ελεγχόμενη έλαση (CCR) [39].

Η *ελεγχόμενη έλαση ανακρυστάλλωσης* (Recrystallisation Controlled Rolling-RCR), η οποία χρησιμοποιείται σε χάλυβες με μαρτενσιτικές και μπαινιτικές μικροδομές. Στην ελεγχόμενη έλαση ανακρυστάλλωσης οι υποβιβασμοί πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία ανώτερη της «θερμοκρασίας λήξης της ανακρυστάλλωσης» (non-recrystallization temperature, T_{NR}). Τα στάδια αυτού του τύπου έλασης περιλαμβάνουν αρχικά έλαση στο θερμοκρασιακό εύρος όπου κατακρημνίζονται φάσεις τύπου MX, με παύσεις μεταξύ των συνεχών υποβιβασμών, ενεργοποιώντας κατά αυτό τον τρόπο την πλήρη ανακρυστάλλωση του ωστενίτη. Εκτός από αυτό, επιτυγχάνεται μια ισοθερμοκρασιακή παραμονή σε μια κατάλληλα επιλεγμένη θερμοκρασία στο τέλος της θερμής διεργασίας-έλασης, για χρόνο $t_{0.5}$, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται προκειμένου να αναπτυχθεί το 50% του όγκου του ανακρυσταλλωμένου ωστενίτη και άμεση απόψυξη με τον κατάλληλο ρυθμό απόψυξης. Η ισοθερμοκρασιακή παραμονή σε αυτό το χρόνο είναι απαραίτητη, διότι η μεγάλη πυκνότητα διαταραχών στον πλαστικά παραμορφωμένο ωστενίτη, αυξάνει τον κρίσιμο ρυθμό απόψυξης [30], [37], [54], [57], [59], [72], [78].

Η *ελεγχόμενη έλαση δυναμικής ανακρυστάλλωσης* (Dynamic Recrystallisation Controlled Rolling-DRCR) αποτελεί μια τροποποίηση της ελεγχόμενης έλασης ανακρυστάλλωσης (RCR). Η ολική παραμόρφωση στο τελικό στάδιο της έλασης είναι υψηλότερη συγκριτικά με τη RCR και η συσσώρευση των παραμορφώσεων από υποβιβασμό σε υποβιβασμό, οδηγεί στην υπέρβαση της κρίσιμης τιμής παραμόρφωσης που απαιτείται για δυναμική ανακρυστάλλωση. Σε αυτή την περίπτωση η τελική εκλέπτυνση των κόκκων είναι η καλύτερη δυνατή [30], [37], [54], [57], [59], [72], [78].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

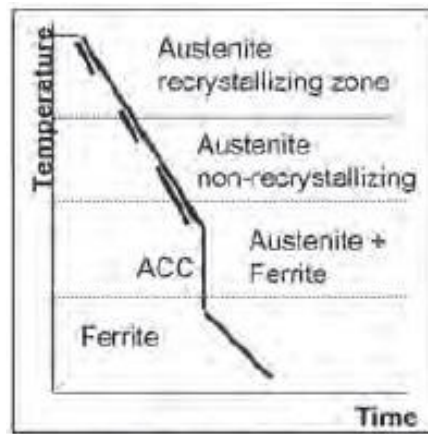
Η τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή (two-phase rolling technology) αποτελεί μια παραλλαγή της συμβατικής ελεγχόμενης έλασης (CCR) (**Εικόνα 1.8**). Η βασική διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στο συγκεκριμένο τύπο έλασης, το τελικό στάδιο της έλασης πραγματοποιείται μερικώς στη διφασική περιοχή ($\gamma+\alpha$). Μετά την απόψυξη οι κόκκοι του ωστενίτη θα μετασχηματιστούν σε λεπτομερείς κόκκους φερρίτη, ενώ οι παραμορφωμένοι φερριτικοί κόκκοι θα ανακρυσταλλωθούν και θα γίνουν λεπτομερέστεροι. Η τεχνολογία της έλασης στη διφασική περιοχή χρησιμοποιείται για την παραγωγή λεπτών ελασμάτων, λόγω της υψηλής αντίστασης στην παραμόρφωση. Μία από τις προτιμητέες μικροδομές στους HSLA χάλυβες είναι αυτή που αποτελείται από «μαλακές» φάσεις φερρίτη/περλίτη και «σκληρές» μπαινιτικές/μαρτενσιτικές δομές [30], [37], [54], [57], [59], [72], [78] .



Εικόνα 1.8 Τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή [39].

Τέλος, υπάρχει η τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή ακολουθούμενη από επιταχυνόμενη απόψυξη (CCR+ACC) (**Εικόνα 1.9**) κατά την οποία προσφέρεται συγκεκριμένη ποσότητα φερρίτη προς μετασχηματισμό, εμπλουτίζεται το υπόλοιπο μέρος της μήτρας με άνθρακα και ελατώνεται η θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη. Με περαιτέρω απόψυξη ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μπαινίτη ή/και σε μαρτενσίτη. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας έλασης παράγονται μεικτές μικροδομές, οι οποίες αποτελούνται από πολύ λεπτομερείς κόκκους φερρίτη και μπαινίτη ή/και μαρτενσίτη [30], [37], [54], [57], [59], [72], [78].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.9 Τεχνολογία έλασης στη διφασική περιοχή, ακολουθούμενη από επιταχυνόμενη απόψυξη [39].

1.2.2 Μικροκραματικές προσθήκες

Οι χάλυβες HSLA είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να προσφέρουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό πραγματοποιούνται οι κατάλληλες μικροκραματικές προσθήκες, στις κατάλληλες ποσότητες, ανάλογα με τις απαιτήσεις και την εφαρμογή του χάλυβα. Ειδικά στην περίπτωση των HSLA χαλυβδόφυλλων τα οποία προέρχονται από θερμομηχανική κατεργασία και προορίζονται για χρήση σε αγωγούς, οπότε και απαιτείται η διαμόρφωση και συγκόλλησή τους για να πάρουν την τελική μορφή του σωλήνα, η συγκολλησιμότητα, δηλαδή η επιδεκτικότητα στη συγκόλληση, είναι μια εξέχουσας σημασίας ιδιότητα [20]. Η συγκολλησιμότητα, λοιπόν, καθορίζεται από το ισοδύναμο άνθρακα (CE-Carbon Equivalent), το οποίο σύμφωνα με το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (International Institute of Welding-IWW) για χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 0,18% wt ισούται με $CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$, ενώ για χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,18% wt ισούται με $CE_{IWW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$ [20], [21]. Χάλυβες με $CE < 0,4\%$ θεωρείται ότι έχουν καλή συγκολλησιμότητα [20].

Στη συνέχεια, θα αναφερθούν συγκεκριμένα οι επιδράσεις των μικροκραματικών προσθηκών στη μικροδομή των χαλύβων HSLA:

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

- Άνθρακας (C): Ο άνθρακας αποτελεί το βασικό κραματικό στοιχείο για τον έλεγχο της αντοχής και σκληρότητας όλων των χαλύβων. Ανάλογα, λοιπόν, με τον τύπο του ελάσματος χάλυβα, την αντοχή του, αλλά και το πάχος του η μέγιστη περιεκτικότητα σε C μπορεί να κυμαίνεται από 0,12 έως 0,25% wt. Ωστόσο, σε σύγχρονους τύπους κατασκευαστικών και μπαινιτικών χαλύβων η περιεκτικότητα σε C μειώνεται σε 0,03-0,06 %wt κι έτσι η προσθήκη άλλων κραματικών στοιχείων αντισταθμίζει τη μείωση στη σκληρότητα, που προκαλείται από τη χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα [20].
- Τιτάνιο (Ti): Το τιτάνιο σχηματίζει νιτρίδια (TiN), τα οποία είναι σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα νιτρίδια αυτά προσφέρουν έλεγχο του μεγέθους του κόκκου του ωστενίτη, στο στάδιο της επαναθέρμανσης του χαλυβδόφυλλου (slab reheating), πριν από τη θερμομηχανική κατεργασία (TMCP), αλλά και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) και συγκεκριμένα στο όριο με τη ζώνη τήξης (FZ). Το τιτάνιο, επίσης, σχηματίζει σε χαμηλές θερμοκρασίες καρβίδια και καρβουσιφλίδια, τα οποία αποτελούν σημαντικά κατακρημνίσματα σκλήρωσης. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία υπάρχει μια ασυμφωνία όσον αφορά τις ποσότητες του τιτανίου που πρέπει να προστίθενται για την επίτευξη των όσο το δυνατόν καλύτερων αποτελεσμάτων [20].
- Νιόβιο (Nb): Το νιόβιο σχηματίζει Nb(C,N), τα οποία διαλύονται ολικώς στον ωστενίτη σε υψηλές θερμοκρασίες κι επιφέρουν τα ακόλουθα αποτελέσματα: 1) Επιβραδύνουν τη στατική ανακρυστάλλωση του ωστενίτη κατά τη θερμομηχανική κατεργασία, οδηγώντας σε εκλέπτυνση των κόκκων, 2) το νιόβιο συνεισφέρει στη σκλήρωση είτε μέσω στερεού διαλύματος, είτε μέσω των κατακρημνισμάτων Nb(C,N) που σχηματίζει και 3) το νιόβιο έχει σαφή επίδραση κατά το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη, ο οποίος καθυστερεί σημαντικά ακόμα και σε πολύ χαμηλές περιεκτικότητες σε νιόβιο, κάτι που είναι απρόσμενο, αφού το νιόβιο θεωρείται σταθεροποιητής του φερρίτη (α-σταθεροποιητής). Μια εξήγηση, ωστόσο είναι ότι η καθυστέρηση του μετασχηματισμού οφείλεται στο solute drag effect του Nb στα όρια των κόκκων [20].
- Βανάδιο (V): Το βανάδιο δε σχηματίζει σχεδόν καθόλου κατακρημνίσματα στον ωστενίτη, γι' αυτό και είναι διαθέσιμο για να συνεισφέρει στη σκλήρωση μέσω κατακρήμνισης, κατά τη διάρκεια ή μετά το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη. Η κατακρήμνιση, λοιπόν, των V(C,N) στο φερρίτη μπορεί να οδηγήσει

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

σε αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής, κάτι που όμως εξαρτάται από τη διαδικασία της έλασης, αλλά και τη χημική σύσταση [20].

- Μολυβδαίνιο (Mo): Το μολυβδαίνιο προστίθεται στους χάλυβες HSLA κυρίως για να βελτιώσει τη σκληρότητα, δηλαδή όταν είναι επιθυμητές δομές εκτός των φερριτοπερλιτικών. Αν και το Mo καθυστερεί την ανάπτυξη του μπαϊνίτη μέσω solute drag effect, επιβραδύνει το σχηματισμό του φερρίτη και του περλίτη σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Επιπλέον, το μολυβδαίνιο αυξάνει τη διαλυτότητα του Nb στον ωστενίτη κι επομένως προωθεί την κατακρήμνιση Nb(C,N) στο φερρίτη, ενισχύοντας παράλληλα την επίδραση της σκλήρωσης μέσω κατακρήμνισης [20].
- Χαλκός (Cu): Ο χαλκός προστίθεται προκειμένου να προσδώσει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Ο χαλκός αυξάνει την αντοχή μέσω της σκλήρωσης του φερρίτη, η οποία συνοδεύεται από ελαφρά μείωση της ολκιμότητας. Ο χαλκός παραμένει σε στερεό διάλυμα, ακόμα και σε αργούς ρυθμούς απόψυξης [20]. Επιπλέον, χρειάζεται προσοχή στη χρήση του, διότι ενδέχεται να δημιουργήσει CuS, προκαλώντας θερμή ρηγμάτωση.
- Νικέλιο (Ni): Το νικέλιο προστίθεται συχνά σε χάλυβες ένσφαιρων τριβέων (bearing steels) για να ελαχιστοποιήσει το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης (hot shortness), ενώ σε περιεκτικότητα 0,25-0,5% wt βελτιώνει επίσης τη δυσθραυστότητα και την αντίσταση σε διάβρωση. Η αύξηση της σκληρότητας οφείλεται στο γεγονός ότι το Ni αυξάνει τον αριθμό των ορίων των κόκκων, δηλαδή προκαλεί εκλέπτυνση των κόκκων, μειώνοντας τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη σε φερρίτη [20].

1.2.3 Μηχανισμοί σκλήρωσης

Οι χάλυβες HSLA θεωρούνται υψηλής αντοχής, αλλά μόνο σε σύγκριση με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, με το όριο διαρροής τους να κυμαίνεται μεταξύ 355-800 MPa. Αυτός ο περιορισμός στο χαρακτηρισμό τους ως υψηλής αντοχής, πηγάζει από το γεγονός ότι ένα υλικό για να θεωρείται υψηλής αντοχής θα πρέπει να πληροί και άλλες προϋποθέσεις ως προς τις ιδιότητές του, όπως δυσθραυστότητα, διαμορφωσιμότητα, συγκολλησιμότητα και αντοχή στη διάβρωση [20]. Το όριο διαρροής των χαλύβων HSLA, λοιπόν, καθορίζεται από διάφορους μηχανισμούς σκλήρωσης που λαμβάνουν χώρα κατά τη δημιουργία τους και εκφράζεται μέσω της εξίσωσης $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_T + \Delta\sigma_P + \Delta\sigma_D + k_y d_a^{-1/2} (1)$, όπου σ_0 είναι η εσωτερική

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

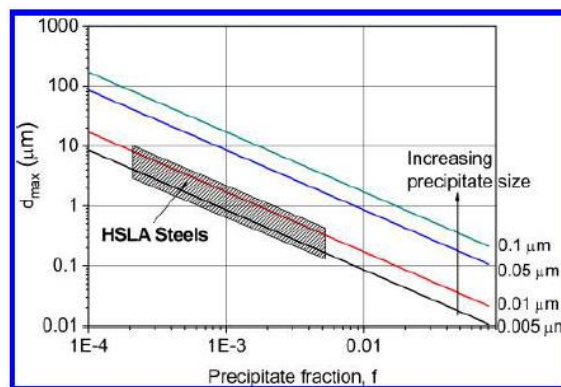
αντοχή του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου, $\Delta\sigma_s$ είναι η σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος παρεμβολής ή αντικατάστασης, $\Delta\sigma_T$ είναι η σκλήρωση μέσω του κρυσταλλογραφικού ιστού, $\Delta\sigma_p$ είναι η σκλήρωση που προέρχεται από κατακρήμνιση, $\Delta\sigma_D$ είναι η σκλήρωση που προέρχεται από την αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών και $k_y d_a^{-1/2}$ είναι η σκλήρωση από την εκλέπτυνση των κόκκων [36], [57]. Ωστόσο, στους HSLA χάλυβες ο κύριος μηχανισμός σκλήρωσης είναι μέσω της εκλέπτυνσης των κόκκων, αν και τα απαιτούμενα επίπεδα αντοχής συνήθως επιτυγχάνονται με την επιπλέον σκλήρωση μέσω κατακρημνισμάτων στο φερρίτη [25]. Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση των εν λόγω μηχανισμών σκλήρωσης στους HSLA χάλυβες.

Εκλέπτυνση κόκκου (grain refinement): Το μέγεθος των κόκκων κάθε υλικού έχει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των μηχανικών του ιδιοτήτων. Τα πιο λεπτόκοκκα υλικά έχουν μεγαλύτερο όριο διαρροής σε σχέση με τα πιο χονδροκόκκα, λόγω της αύξησης των ορίων των κόκκων που προκαλείται από την εκλέπτυνση της μικροδομής, τα οποία όρια δημιουργούν εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την αντοχή του υλικού [26], [27]. Πιο αναλυτικά, τα όρια των κόκκων λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών για δύο λόγους: 1) μεταξύ δύο κόκκων υπάρχει διαφορετικός κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός κι έτσι μια διαταραχή προκειμένου να μεταβεί από τον έναν κόκκο στον άλλο θα πρέπει να αλλάξει διεύθυνση κίνησης, γεγονός που γίνεται όλο και δυσκολότερο με την αύξηση των ορίων κόκκων, μέσω της εκλέπτυνσης της μικροδομής και 2) η ατομική αταξία στις περιοχές των ορίων των κόκκων οδηγεί σε ασυνέχεια των επιπέδων ολίσθησης από τον έναν κόκκο στον άλλον [27]. Σύμφωνα με την εξίσωση των Hall [28]-Petch [29], η συμβολή της εκλέπτυνσης του κόκκου στο όριο διαρροής του υλικού είναι $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d_a^{-1/2}$ (2) όπου όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην εξίσωση (1) σ_0 είναι η εσωτερική αντοχή του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου, ενώ k_y είναι σταθερά που σχετίζεται με την αντίσταση των ορίων των κόκκων στην κίνηση των διαταραχών και d_a είναι η μέση διάμετρος των κόκκων. Για τους HSLA χάλυβες η τιμή της σταθεράς k_y είναι $0.55 \text{ m}^{0.5}$ [31].

Έτσι, λοιπόν η εκλέπτυνση του κόκκου στους HSLA χάλυβες πραγματοποιείται μέσω της προσθήκης στοιχείων, όπως Al, V, Nb, ή Ti, τα οποία σχηματίζουν νιτρίδια, καρβίδια ή και καρβονιτρίδια, τα οποία όμως εμφανίζουν χαμηλή διαλυτότητα στον ωστενίτη, με αποτέλεσμα να «αγκυρώνονται» (pinning) στα όρια των κόκκων του ωστενίτη κατά τη διάρκεια της επαναθέρμανσης και πριν τη θερμική κατεργασία κι έτσι

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

να εμποδίζουν την περαιτέρω αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη [32], [33]. Τέτοια σωματίδια είναι συνήθως νιτρίδια του τιτανίου (TiN) και μερικές φορές καρβίδια ή νιτρίδια του νιοβίου (NbC, NbN). Το TiN θεωρείται από τα πιο σταθερά σωματίδια, με την υψηλότερη θερμοκρασία διαλυτότητας και γι' αυτό φαίνεται να είναι το πιο αποδοτικό στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη [32]. Τα σωματίδια που κατακρημνίζονται και λειτουργούν ως εμπόδια στην ανάπτυξη των κόκκων με ακόμη δύο τρόπους: 1) Σωματίδια που διαλύονται κατά τη διάρκεια της επαναθέρμανσης, αλλά κατακρημνίζονται στον ωστενίτη κατά τη θερμή έλαση, με αποτέλεσμα να εμποδίζουν τη ανακρυστάλλωση ή/και την ανάπτυξη των κόκκων, όπως είναι τα καρβίδια/νιτρίδια του νιοβίου (NbC/NbN) και μερικές φορές τα νιτρίδια του βαναδίου (VN) και 2) Σωματίδια που κατακρημνίζονται μετά την έλαση κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού του ωστενίτη σε φερρίτη, που είναι συνήθως (TiC) μερικές φορές [33].



Εικόνα 1.10 Επίδραση του κλάσματος όγκου και μεγέθους του κατακρημνίσματος, στο μέγιστο δυνατό μέγεθος κόκκου [20].

Σκλήρωση με κατακρήμνιση (precipitation strengthening): Εκτός από την κατακρήμνιση σωματιδίων στα όρια των κόκκων, είναι δυνατό όταν η συγκέντρωση ενός διαλυμένου στοιχείου υπερβεί το όριο διαλυτότητας του με τον Fe, να σχηματιστεί κατακρήμνισμα εντός των κόκκων, γεγονός που επίσης αυξάνει την αντοχή του υλικού, διότι τα κατακρημνίσματα αυτά λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών εντός του κρυσταλλικού πλέγματος [20]. Έτσι, όταν μια διαταραχή κινούμενη στο επίπεδο ολίσθησής της συναντήσει κάποιο κατακρήμνισμα, τότε εάν το κατακρήμνισμα είναι αδιαπέραστο, θα αλλάξει πορεία και θα ελιχθεί γύρω του, αλλιώς θα «κόψει» το κατακρήμνισμα [20].

Σκλήρωση μέσω αύξησης της πυκνότητας των διαταραχών: Όταν η χαλύβδινη πλάκα υφίσταται πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της θερμομηχανικής κατεργασίας (TMCP), δηλαδή δέχεται τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής της, τότε οι διαταραχές μετακινούνται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα και λαμβάνουν συγκεκριμένες θέσεις, δημιουργώντας εμπόδια για τις ήδη υπάρχουσες διαταραχές [39], [59]. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας του υλικού, αλλά μείωση της ολκιμότητάς του [39]. Ο μηχανισμός της σκλήρωσης μέσω της αύξησης της πυκνότητας των διαταραχών αναφέρεται επίσης και ως εργοσκλήρυνση (work hardening) [39].

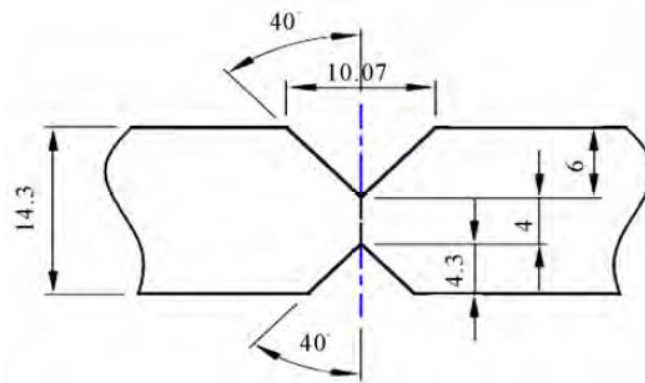
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΓΙΑ ΑΓΩΓΟΥΣ

1.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ JCOE

Μετά τη θερμομηχανική κατεργασία (TMCP) ακολουθεί η κατεργασία της χαλύβδινης πλάκας που προκύπτει, με σκοπό να διαμορφωθεί τελικά ο σωλήνας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

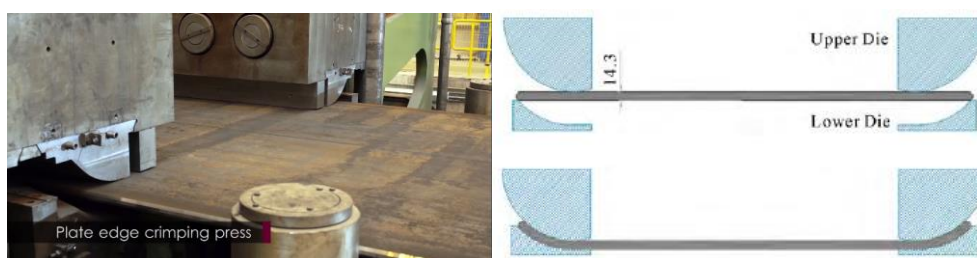
1. Συγκόλληση των tabs στην πλάκα (tab welding): Προκειμένου να επιτευχθεί ένωση των άκρων της πλάκας, έτσι ώστε να διαμορφωθεί ο σωλήνας, αλλά και για τη σταθεροποίηση της διαδικασίας της συγκόλλησης, συγκολλούνται τέσσερα tabs από υλικό όμοιο με αυτό της πλάκας, ένα σε κάθε γωνία αυτής, χειροκίνητα μέσω της μεθόδου συγκόλλησης τόξου με προστατευτικό αέριο (GMAW), τα οποία και κόβονται μετά την τελική συγκόλληση του σωλήνα [79].
2. Επεξεργασία-φρεζάρισμα των άκρων (edge milling): Τα άκρα της πλάκας φρεζάρονται μέσω δύο κεφαλών (μία σε κάθε άκρο) στις οποίες είναι εφαρμοσμένα αναλώσιμα κοπτικά εργαλεία, έτσι ώστε να επιτευχθεί σχηματισμός διπλού V (**Εικόνα 1.11**), με σκοπό όταν ο σωλήνας είναι έτοιμος για την τελική συγκόλληση και πλέον τα άκρα είναι ενωμένα, να ευνοείται η εναπόθεση του μετάλλου προσθήκης και στην εσωτερική, αλλά και στη εξωτερική συγκόλληση [41], [79].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.11 Επεξεργασία-φρεζάρισμα των άκρων (edge milling), όπου επιτυγχάνεται ο σχηματισμός διπλού V στα άκρα της πλάκας [41], [43].

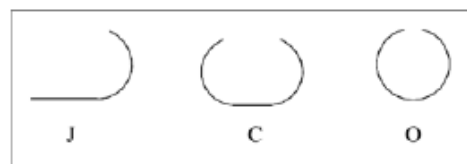
3. Πρεσάρισμα των άκρων (edge crimping): Το πρεσάρισμα των άκρων εκτελείται και στα δύο άκρα της πλάκας μέσω δύο πρεσών οι οποίες πιέζουν τα άκρα, προκειμένου να είναι έτοιμα για να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και να συγκολληθούν μετά το πέρας της διαδικασίας JCO. Το πρεσάρισμα των άκρων είναι μια κρίσιμη διαδικασία, όσον αφορά τις τελικές διαστάσεις του αγωγού γύρω από τη ραφή της συγκόλλησης, οι οποίες ελέγχονται μέσω της επιλογής κατάλληλης ακτίνας στις πρεσαρισμένες άκρες της πλάκας (**Εικόνα 1.12**) [41]



Εικόνα 1.12 Πρεσάρισμα των άκρων (edge crimping) της πλάκας [41], [43].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

4. Διαμόρφωση JCO (JCO forming): Στη συνέχεια η πρεσαρισμένη στα άκρα πλάκα οδηγείται στο στάδιο της διαμόρφωσης JCO, το οποίο είναι εξέχουσας σημασίας, διότι καθορίζει τις τελικές διαστάσεις που θα έχει ο σωλήνας περιμετρικά μετά τη μηχανική διαστολή, μέσω του ελέγχου της ακτίνας της πρέσας, η οποία πιέζει την πλάκα. Μια ακατάλληλη διαμόρφωση είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη οβαλότητα και τοπική επιπεδότητα μετά τη μηχανική διαστολή του σωλήνα. Έτσι, λοιπόν, η διαδικασία της διαμόρφωσης JCO περιλαμβάνει αρχικά το πρεσάρισμα της πλάκας στο ένα της άκρο όπου λαμβάνει σχήμα “J”, ενώ στη συνέχεια το πρεσάρισμα κατευθύνεται προς το κέντρο της πλάκας, όπου η πλάκα λαμβάνει σχήμα “C” και καθώς ολοκληρώνεται η διαδικασία λαμβάνει σχήμα “O” (**Εικόνα 1.13**) [41]. Επιπλέον, εκτός από την κύρια πρέσα, υφίσταται και η τελική πρέσα κλεισίματος, η οποία χρησιμοποιείται σε σωλήνες με μεγάλο πάχος τοιχώματος και ιδιαίτερα σε αυτούς με μικρή διάμετρο, προκειμένου τα άκρα της πλάκας η οποία έχει πλέον σχήμα “O” να έρθουν σε κοντινότερη απόσταση μεταξύ τους και να συγκολληθούν (**Εικόνα 1.14**) [41].



Εικόνα 1.13 Διαδικασία διαμόρφωσης JCO (JCO forming) [41], [43].

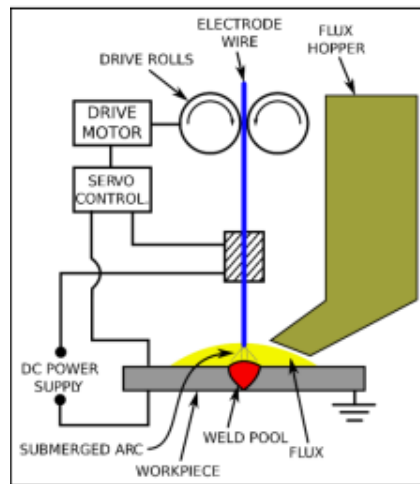


Εικόνα 1.14 Τελική πρέσα κλεισίματος [43].

5. Προ-συγκόλληση (Tack welding): Πριν από την τελική και κύρια συγκόλληση πραγματοποιείται η λεγόμενη «προ-συγκόλληση», η οποία είναι μια συνεχής συγκόλληση με χρήση αδρανούς αερίου (GMAW), προκειμένου να διατηρηθεί το σχήμα του σωλήνα μέχρι το επόμενο στάδιο, αλλά δρα και ως υποστήριξη για την εσωτερική συγκόλληση που θα ακολουθήσει [79].
6. Κύρια συγκόλληση LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding): Η LSAW είναι μια τεχνική συγκόλλησης βυθιζόμενου τόξου, καθ' όλη τη διάρκεια της οποίας το τόξο της συγκόλλησης καλύπτεται από στρώμα σκόνης βόρακα (flux), το οποίο προστατεύει το τόξο από την πιθανή εισχώρηση ανεπιθύμητων στοιχείων από την ατμόσφαιρα και κυρίως του υδρογόνου, το οποίο προκαλεί ψαθυροποίηση (**Εικόνα 1.15**) [42]. Η συγκόλληση, η οποία αρχικά πραγματοποιείται στο εσωτερικό του σωλήνα και στη συνέχεια στην εξωτερική πλευρά (**Εικόνα 1.16**), επιτυγχάνεται με την εναπόθεση ηλεκτροδίων (συνήθως έως και πέντε), τα οποία διαδραματίζουν το ρόλο του υλικού πλήρωσης (filler metal) στην περιοχή του διπλού V που δημιουργείται μεταξύ των άκρων της πλάκας [42], [79]. Η τελική ποιότητα της συγκόλλησης, η οποία καθορίζεται από τις διαστάσεις της ραφής της συγκόλλησης, από την κατανομή της θερμοκρασίας, από τις μεταλλουργικές φάσεις που παράγονται στο λουτρό της συγκόλλησης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone-HAZ) και από τις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου υλικού, εξαρτάται από την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης [42]. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν την ένταση και την τάση του ρεύματος, την επιλογή ηλεκτροδίου συγκεκριμένου υλικού και κατάλληλης διαμέτρου, την ταχύτητα συγκόλλησης και τον τύπο της σκόνης βόρακα που θα χρησιμοποιηθεί [42]. Προκειμένου να ενισχυθεί η παραγωγικότητα αυτής της μεθόδου συγκόλλησης, μια επιλογή είναι η αύξηση της έντασης του ρεύματος και της ταχύτητας

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

συγκόλλησης, ωστόσο μερικές φορές υψηλότερη ένταση ρεύματος οδηγεί σε ατέλειες στην περιοχή της συγκόλλησης [42]. Αντιστοίχως, μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ατελειών, όπως ρηγματώσεων και μη ολοκληρωμένης διείσδυσης του πληρωτικού υλικού [42]. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται, όπως προαναφέρθηκε, χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων, γεγονός όμως που καθιστά τον καθορισμό των παραμέτρων της συγκόλλησης ακόμα πιο δύσκολο [42].



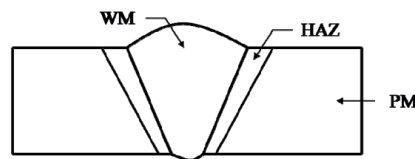
Εικόνα 1.15 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου SAW [45].



Εικόνα 1.16 Κύρια συγκόλληση LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding) στην εσωτερική (άνω μέρος) και στην εξωτερική πλευρά (κάτω μέρος) του σωλήνα [43].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

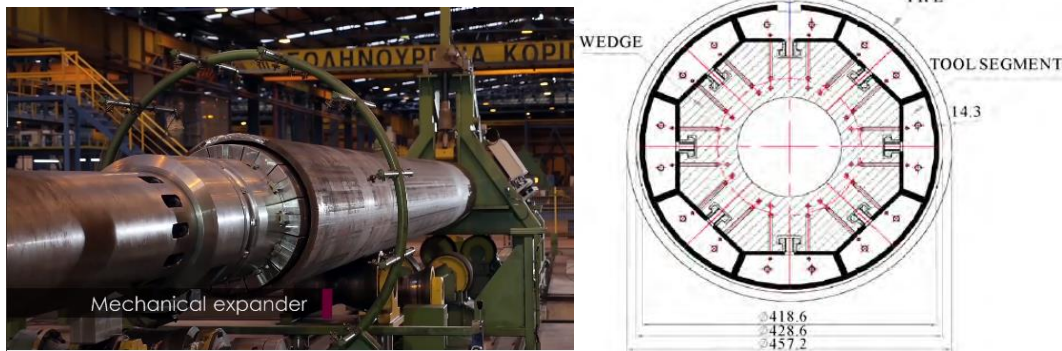
Μια τυπική ζώνη συγκόλλησης αποτελείται από τρεις επιμέρους ζώνες (**Εικόνα 1.17**), το μέταλλο βάσης ή μητρικό υλικό (Base Metal-BM ή Parent Metal-PM), τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone-HAZ) και το μέταλλο συγκόλλησης ή αλλιώς ζώνη τήξης (Weld Metal-WM ή Fusion Zone-FZ), που αποτελεί μίξη του μετάλλου προσθήκης, της προστατευτικής σκόνης βόρακα και του μετάλλου βάσης που έχουν λιώσει τελείως κατά τη διαδικασία της τήξης [46].



Εικόνα 1.17 Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής ζώνης συγκόλλησης [46].

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι γειτονική με τη ζώνη τήξης και το μέταλλο στην περιοχή αυτή φθάνει σε θερμοκρασίες κατώτερες μεν από το σημείο τήξης του, αλλά αρκετά υψηλές ώστε να επιφέρουν αλλαγή στη μικροδομή του, με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται και οι ιδιότητες του στην περιοχή αυτή [46].
Μηχανική διαστολή (Expansion): Η διαδικασία της μηχανικής διαστολής (**Εικόνα 1.18**) στην κατασκευή αγωγών είναι ιδιαίτερα σημαντική, σε ό,τι αφορά τις τελικές διαστάσεις του αγωγού μετά την κύρια συγκόλληση LSAW, τόσο περιμετρικά, όσο και κατά μήκος της ραφή της συγκόλλησης [41]. Ο κύριος λόγος, λοιπόν, της μηχανικής διαστολής είναι η διόρθωση των διαστάσεων του σωλήνα, αλλά δεν πρέπει να αγνοηθεί και η συμβολή του μηχανικού διαστολέα στην ομογενοποίηση και ελάττωση των παραμενουσών τάσεων [79]. Κατά τη μηχανική διαστολή είναι απαραίτητο η εσωτερική ραφή της συγκόλλησης να μην έρχεται σε επαφή με την πρέσα του διαστολέα, καθώς όπως διακρίνεται στο δεξιό μέρος της **Εικόνα 1.18**, δεν είναι αποδεκτό στις προδιαγραφές κατασκευής των σωλήνων, γι' αυτό και υπάρχει ένα κενό στη θέση 12 του σωλήνα που βρίσκεται η ραφή της συγκόλλησης [41].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.18 Μηχανικός διαστολέας [41], [43].

7. Μηχανική διαμόρφωση άκρων σωλήνα: Μετά τη μηχανική διαστολή του σωλήνα τα άκρα του υποβάλλονται σε μηχανική κατεργασία, έτσι ώστε να αποκτήσουν κατάλληλη μορφή, η οποία θα επιτρέψει την ένωση των αγωγών κατά την εγκατάστασή τους.
8. Επικάλυψη (coating): Οι περισσότεροι σωλήνες επικαλύπτονται με μια εποξειδική επικάλυψη (fusion bond epoxy-FBE), προκειμένου να προστατευτούν από τη διάβρωση που προκαλείται από το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο εγκαθίστανται οι αγωγοί, αλλά και από το διαβρωτικό μέσο που πιθανώς να μεταφέρουν (π.χ φυσικό αέριο, πετρέλαιο).

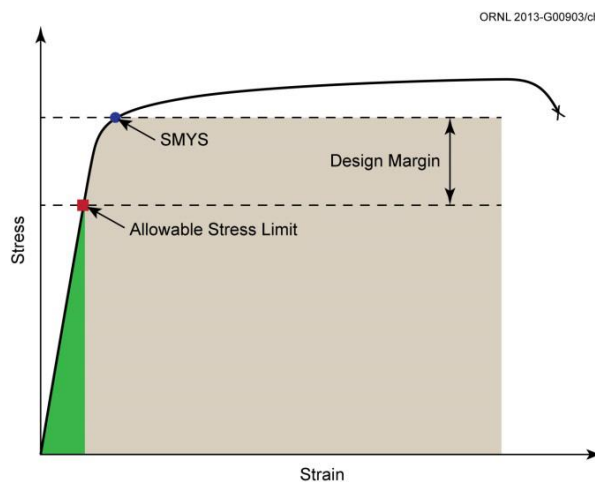
Όσον αφορά τις δοκιμές και τους ελέγχους που γίνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας JCOE, πραγματοποιούνται: 1) Έλεγχος της πλάκας με υπερήχους αμέσως μετά τη συγκόλληση των tabs, 2) Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι υπερήχων και ακτίνων X, μετά τη διαδικασία της κύριας συγκόλλησης, 3) Υδραυλικός έλεγχος του σωλήνα μετά τη μηχανική διαστολή, ακολουθούμενος από τον τελικό μη καταστρεπτικό έλεγχο.

1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΓΩΓΟΥ (ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ-COMPRESSIVE STRAIN CAPACITY)

Η χρήση των σωλήνων σε υποθαλάσσιους αγωγούς σε όλο και μεγαλύτερα βάθη έχει καταστήσει αναγκαία την υψηλή αντοχή τους στην εξωτερική πίεση και πιο συγκεκριμένα στην υδροστατική. Η αντοχή, λοιπόν, των αγωγών αυτών, ώστε να μην καταρρεύσουν εξαρτάται κυρίως από την οβαλότητα τους και από την αντοχή τους σε συμπίεση (compressive strength) [55]. Ο σχεδιασμός των αγωγών τα τελευταία χρόνια γίνεται με τρόπο τέτοιο, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα όρια τους σε

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

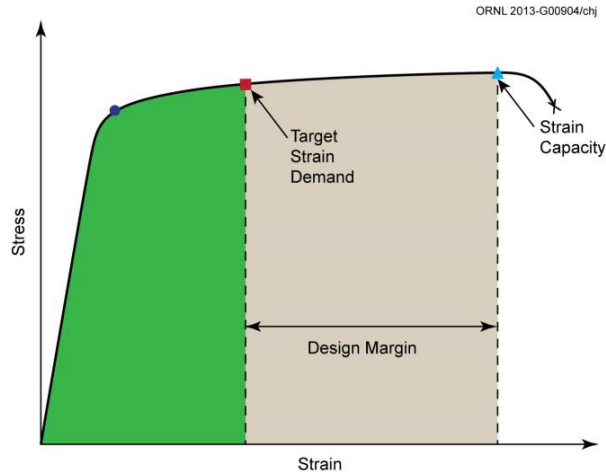
παραμόρφωση σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα όρια τους σε επιβολή τάσης (strain-based design), σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους σχεδιασμού, στις οποίες λαμβάνεται υπόψη μόνο η επιβολή τάσης (stress-based design). Πιο αναλυτικά, στο συμβατικό σχεδιασμό, όπως διακρίνεται και στην **Εικόνα 1.19**, δίνεται προσοχή σε γεγονότα όπου επιβάλλονται φορτία και τάσεις στον αγωγό, με στόχο να διασφαλιστεί ότι θα αποφευχθεί η διαρροή του υλικού και η πλαστική του παραμόρφωση, με αποτέλεσμα κατά το σχεδιασμό να γίνεται προσπάθεια μείωσης της εσωτερικής πίεσης του αγωγού, σε βαθμό τέτοιο που να μη ξεπερνά το ελάχιστο όριο διαρροής του αγωγού (SMYS-Specified Minimum Yield Strength). Δηλαδή, γίνεται η υπόθεση ότι το υλικό συμπεριφέρεται πλήρως ελαστικά, ακολουθώντας το νόμο του Hooke, όπου $\sigma = E\epsilon$, ενώ το περιθώριο σχεδιασμού του σωλήνα εντοπίζεται μεταξύ του ορίου επιτρεπτής τάσης (Allowable Stress Limit) και του ελάχιστου ορίου διαρροής (SMYS).



Εικόνα 1.19 Συμβατική μέθοδος σχεδιασμού αγωγού που βασίζεται στην επιβολή τάσης (stress-based design) [49].

Ωστόσο, η σύγχρονη μέθοδος σχεδιασμού δεν αρκείται στην υπόθεση ότι ο σωλήνας συμπεριφέρεται πλήρως ελαστικά, αλλά εστιάζει στη συμπεριφορά του υλικού και στην περίπτωση ανελαστικής-πλαστικής παραμόρφωσης, όπου όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1.20** το περιθώριο σχεδιασμού εντοπίζεται μεταξύ της επιθυμητής αντοχής σε παραμόρφωση (Target Strain Demand) και της μέγιστης ικανότητας του αγωγού να παραμορφωθεί πλαστικά (Strain Capacity) [49].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

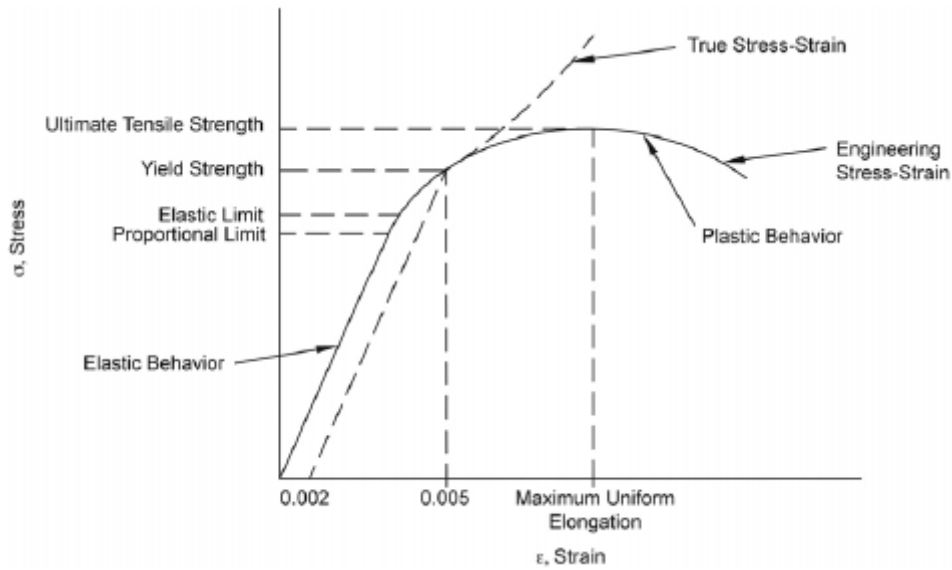


Εικόνα 1.20 Σύγχρονη μέθοδος σχεδιασμού αγωγού που βασίζεται στην ικανότητά του να παραμορφώνεται πλαστικά (strain-based design) [49].

1.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (STRESS-STRAIN CURVE)

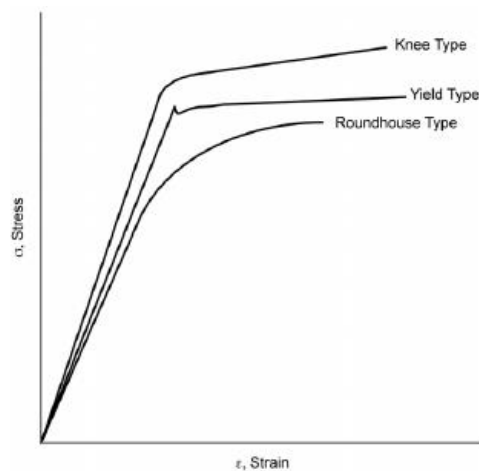
Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης είναι εξέχουσας σημασίας, διότι μέσω αυτού εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του σωλήνα, είτε πρόκειται για εφελκυσμό, είτε για συμπίεση. Οι ιδιότητες, λοιπόν, που μπορούν να καθοριστούν μέσω αυτού του διαγράμματος, όπως διακρίνεται και στην **Εικόνα 1.21** είναι: 1) Το όριο αναλογίας (Proportional limit), το οποίο αποτελεί το σημείο πέραν του οποίου η τάση παύει να είναι ανάλογη της παραμόρφωσης (2) Το όριο ελαστικότητας (Elastic limit), δηλαδή το σημείο στο οποίο η παραμόρφωση γίνεται μόνιμη, 3) Το όριο διαρροής (Yield strength), όπου το υλικό από την ελαστική περιοχή μεταβαίνει στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης και αρχίζει να διαρρέει, 4) Η μέγιστη αντοχή (Ultimate strength), 5) Η μέγιστη ομοιόμορφη επιμήκυνση (Uniform elongation), 6) Η ολική επιμήκυνση (Total elongation) και 7) Το όριο θραύσης (Fracture strength).

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.21 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και οι επιμέρους ιδιότητες που προσδιορίζονται μέσω αυτού [49].

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορετική μορφή (**Εικόνα 1.22**), η οποία είναι είτε τύπου «roundhouse», όπου παρατηρείται μια ομαλή και συνεχής διαρροή του υλικού, είτε τύπου «knee», όπου υπάρχει μια απότομη μετάβαση από το όριο ελαστικότητας, όταν το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά και τέλος τύπου «yield», όπου η καμπύλη του υλικού χαρακτηρίζεται από ασυνεχή διαρροή και τελικά σταθεροποιείται σε σημείο χαμηλότερο από το όριο διαρροής [49].



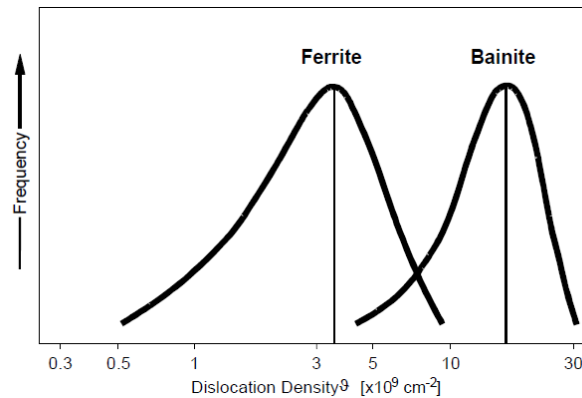
Εικόνα 1.22 Διαφορετικές μορφές καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης [49].

1.4.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΑΓΩΓΟΥ

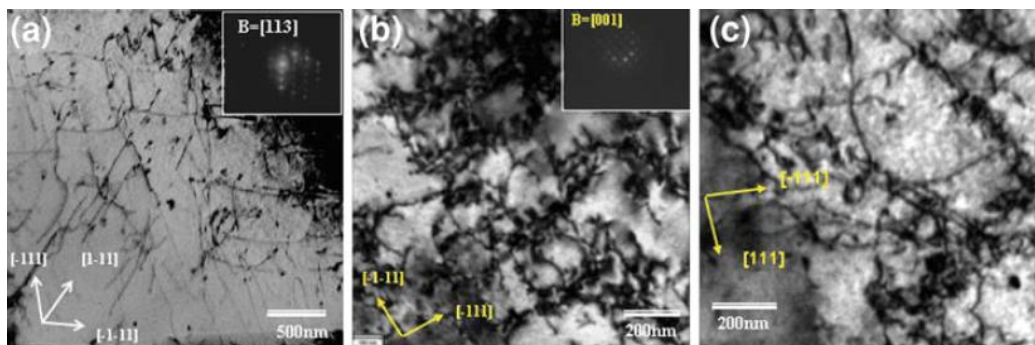
Πυκνότητα διαταραχών (Dislocation density)

Η πυκνότητα των διαταραχών στη μικροδομή του αγωγού συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο της εργογήρανσης, το οποίο επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, εργογήρανση προκαλείται τόσο κατά τις θερμομηχανικές κατεργασίες όπου παράγεται η χαλύβδινη πλάκα, όσο και στη συνέχεια που η πλάκα υφίσταται διαμόρφωση JCOE (ή UOE-παρεμφερής διαδικασία διαμόρφωσης κατά την οποία η πλάκα που πρεσάρεται αρχικά λαμβάνει σχήμα “U”, στη συνέχεια “O” και τέλος ο σωλήνας που προκύπτει διαστέλλεται μηχανικά) προκειμένου να σχηματιστεί ο σωλήνας, λόγω των παραμορφώσεων και της θερμότητας που επιβάλλονται. Έτσι, λοιπόν, κατά τη διάρκεια του φαινομένου της εργογήρανσης άτομα παρεμβολής, όπως άνθρακας και άζωτο ενδέχεται να διαφοριστούν σημαντικά στις διαταραχές ακμής, επειδή εκείνες έχουν μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης από τις αντίστοιχες διαταραχές κοχλία, κάτι που είναι πιθανό να συμβεί κατά τη διαμόρφωση του σωλήνα. Σε έναν μικροκραματωμένο χάλυβα, του οποίου η μικροδομή αποτελείται από φερρίτη και μπαινίτη, η δομή των διαταραχών και η κατανομή του άνθρακα στο φερρίτη είναι μεγαλύτερη απ’ ό,τι στο μπαινίτη, καθώς ο μπαινίτης έχει μεγαλύτερη πυκνότητα διαταραχών (**Εικόνα 1.23**) κι έτσι είναι λιγότερο ευαίσθητος στην εργογήρανση. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.24** σε μικροκραματωμένο χάλυβα του οποίου η μικροδομή περιέχει χονδρομερή φερρίτη, η δομή των διαταραχών αποτελείται από ευθείες γραμμές στην πλάκα που προέρχεται από θερμομηχανική κατεργασία, οι οποίες όμως καμπυλώνονται μετά τη διαμόρφωση UOE (ή JCOE) του σωλήνα, ενώ οι διαταραχές παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες ύστερα από τη διεργασία της επικάλυψης [47].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.23 Πυκνότητα διαταραχών φερρίτη και μπαϊνίτη [3].



Εικόνα 1.24 Μικρογραφίες φερρίτη από TEM, οι οποίες δείχνουν τη δομή των διαταραχών: α) στην πλάκα, β) στο σωλήνα μετά από διαμόρφωση UOE και γ) στον επικαλυμμένο σωλήνα [47].

Φαινόμενο Bauschinger

Το όριο διαρροής σε θλίψη (compressive yield strength) περιμετρικά του σωλήνα είναι συνήθως μικρότερο από το αντίστοιχο σε εφελκυσμό (tensile yield strength), εξαιτίας του φαινομένου Bauschinger, το οποίο εκδηλώνεται λόγω της μηχανικής διαστολής του σωλήνα στο τελευταίο στάδιο της διαμόρφωσης του (UOE ή JCOE). Ένας τρόπος, λοιπόν, για να ελαττώσουμε την επίδραση του φαινομένου Bauschinger είναι να μειώσουμε το ρυθμό διαστολής στο μηχανικό διαστολέα, χωρίς ωστόσο να τον μειώσουμε υπερβολικά, καθώς απαιτείται ένας συγκεκριμένος ρυθμός διαστολής έτσι ώστε να βελτιωθεί η οβαλότητα του σωλήνα. Ένας ακόμη τρόπος προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή σε θλίψη του αγωγού είναι μέσω της θέρμανσής του σε θερμοκρασία περίπου έως 200°C κατά τη διεργασία της επικάλυψης, όπου εγείρεται εργογήρανση (strain aging). Τέλος, σκληρές φάσεις στους μικροκρατωμένους χάλυβες, όπως ο σεμεντίτης ή ο μαρτενσίτης αυξάνουν την backstress, η οποία είναι η τάση που προκαλείται από τη συσσώρευση των

διαταραχών κι επομένως είναι γεγονός ότι εμπόδια ενάντια στην κίνηση των διαταραχών αυτών είναι πιθανό να ενισχύσουν την έναρξη του φαινομένου Bauschinger [19].

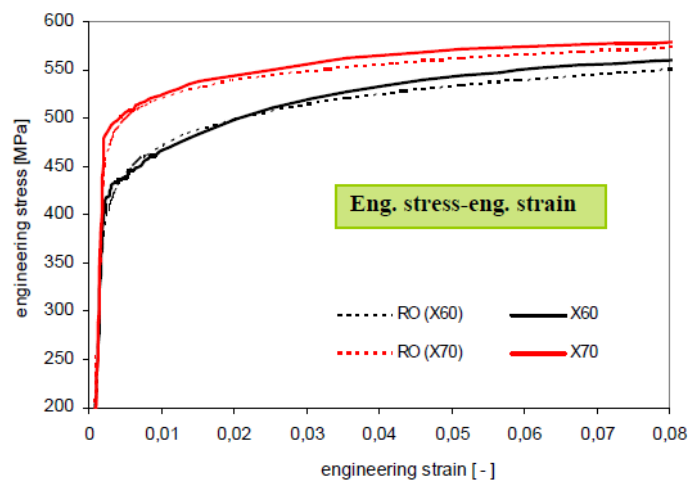
1.4.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Εργοσκλήρυνση (strain-work hardening)

Η αντοχή των μεταλλικών υλικών εξαρτάται από την ευκολία με την οποία οι διαταραχές κινούνται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Η τάση που απαιτείται προκειμένου να κινηθούν οι διαταραχές επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, όπως το μέγεθος των κόκκων, τον αριθμό, το μέγεθος και το σχήμα των διαταραχών. Καθώς το υλικό παραμορφώνεται υπό την επιβολή τάσης ο αριθμός των διαταραχών αυξάνεται, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη τάση για να επιτευχθεί παραμόρφωση. Έτσι, λοιπόν, με τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής οι διαταραχές αρχίζουν να κινούνται και ο αριθμός τους όλο και αυξάνεται καθώς η παραμόρφωση μεγαλώνει, με συνέπεια να χρειάζεται όλο και μεγαλύτερη επιβολή τάσης προκειμένου να διαρρεύσει ή να παραμορφωθεί το υλικό, φαινόμενο που είναι γνωστό ως εργοσκλήρυνση (strain-work hardening) [49].

Η εργοσκλήρυνση των σωλήνων είναι συνέπεια ενός συνδυασμού ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης, που οδηγεί μεν στην αύξηση του ορίου διαρροής, αλλά και σε παράλληλη μείωση της ολκιμότητας. Είναι ιδιαίτερα σημαντική η κατανόηση του φαινομένου της εργοσκλήρυνσης, διότι είναι αυτό το οποίο μεταβάλλει κατά κύριο λόγο το όριο διαρροής και την αντοχή, κατά τη διαμόρφωση της πλάκας σε σωλήνα. Έτσι, λοιπόν, ένας μεγαλύτερος ρυθμός εργοσκλήρυνσης προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή στη συσσώρευση παραμορφώσεων, αλλά οδηγεί επίσης σε ανισοτροπία του υλικού και σε παραμένουσες τάσεις. Η ικανότητα του υλικού του σωλήνα να υποστεί εργοσκλήρυνση ελέγχεται μέσω του καθορισμού της ελάχιστης απαιτούμενης επιμήκυνσης (elongation) του υλικού του σωλήνα και του προστιθέμενου μετάλλου της συγκόλλησης και της ελάχιστης διαφοράς μεταξύ ορίου διαρροής και μέγιστης αντοχής του σωλήνα [49].

Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης Ramberg-Osgood: Προκειμένου να αναπαρασταθεί η ικανότητα του υλικού να υποστεί εργοσκλήρυνση και γενικά η συμπεριφορά του υλικού κατά την επιβολή παραμορφώσεων, χρησιμοποιούνται διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, μία από τις οποίες είναι η Ramberg-Osgood, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η ελαστική περιοχή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Αυτό γίνεται διότι σύμφωνα με την έννοια του «σχεδιασμού σύμφωνα με την παραμόρφωση» (Strain Based Design) οι παραμορφώσεις δε ξεπερνούν το 2% κι επομένως σε αυτό το εύρος ενδέχεται η συμβολή των ελαστικών παραμορφώσεων να είναι ιδιαίτερως σημαντική στη συνολική παραμόρφωση που δέχεται ο αγωγός. Ο τύπος, λοιπόν, της εν λόγω εξίσωσης είναι $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p * \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^{n_{RO}}$, όπου ε είναι η παραμόρφωση, σ η τάση, ε_p η πλαστική παραμόρφωση (είτε ως $R_{p0.1}$, $R_{p0.2}$ ή $R_{t0.5}$), σ_p το όριο διαρροής (είτε ως $R_{p0.1}$, $R_{p0.2}$ ή $R_{t0.5}$) και n_{RO} είναι ο συντελεστής εργοσκλήρυνσης, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον τύπο $n_{RO} = \frac{\ln\left[\frac{1}{\varepsilon_y} \left(\varepsilon_{UTS} - \frac{\sigma_{UTS}}{E}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\sigma_{UTS}}{\sigma_p}\right)}$, όπου ε_y και σ_p είναι παραμόρφωση και η τάση διαρροής αντίστοιχα και ε_{UTS} και σ_{UTS} είναι η παραμόρφωση στη μέγιστη αντοχή και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή αντίστοιχα [75].



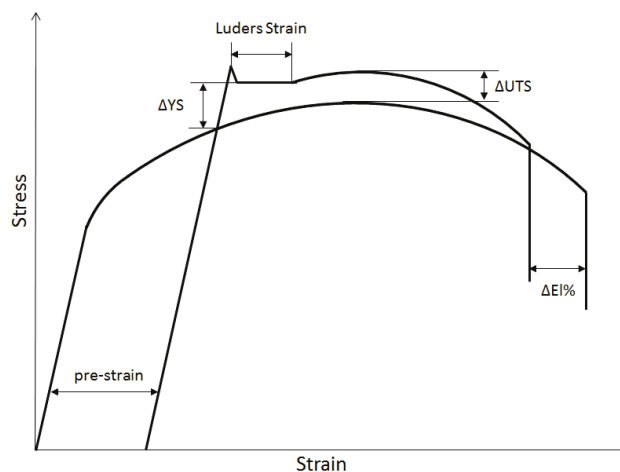
Εικόνα 1.25 Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης Ramberg-Osgood για τη συμπεριφορά σωλήνα X60 και X70 στον εγκάρσιο άξονα [75].

Εργογήρανση (Strain aging)

Η εργογήρανση οδηγεί σε μείωση της δυσθραυστότητας και της αντοχής μετά από επιβολή πλαστικής παραμόρφωσης στο χάλυβα, σε θερμοκρασίες 200°C έως και

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

350°C [49], [50]. Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο καλείται δυναμική εργογήρανση όταν άτομα αντικατάστασης και διαταραχές αλληλεπιδρούν κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ χαρακτηρίζεται ως στατική όταν αλληλεπιδρούν πριν από την παραμόρφωση [50]. Ως φαινόμενο η εργογήρανση παρατηρείται συγκεκριμένα σε χάλυβες που επιδεικνύουν ασυνεχή διαρροή στο διάγραμμα παραμόρφωσης, δηλαδή ένα ανώτερο σημείο-όριο διαρροής και ένα κατώτερο και με ένα πλατό διαρροής πριν ξεκινήσει η εργοσκληρυνση (strain hardening) [49], [51]. Σύμφωνα με το μηχανισμό της εργογήρανσης, τα ελεύθερα άτομα άνθρακα (ή/και αζώτου) διαχέονται κατά μήκος των διαταραχών και σχηματίζουν ατμόσφαιρες Cottrell. Όταν, λοιπόν, διαταραχές περικυκλώνονται από ατμόσφαιρες Cottrell κλειδώνονται από ελεύθερα άτομα C κι έτσι οι διαταραχές δεν είναι δυνατό να ξεφύγουν από αυτές τις ατμόσφαιρες αν η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι μικρή. Αυτό έχει ως συνέπεια το όριο διαρροής να αυξάνεται, ωστόσο εάν η εφαρμοζόμενη τάση που ασκείται στο υλικό είναι αρκετά μεγάλη, οι διαταραχές ενδέχεται να διαχωριστούν από τις ατμόσφαιρες αυτές και να γίνουν ιδιαίτερα κινητικές, δημιουργώντας γρήγορη πλαστική διαρροή του υλικού υπό μικρότερη επιβολή τάσης, γι' αυτό και στο διάγραμμα παραμόρφωσης εμφανίζεται ένα ανώτερο όριο διαρροής ακολουθούμενο από πλατό διαρροής σε χαμηλότερο όριο διαρροής (Luders Plateau) (**Εικόνα 1.26**) [51]. Η περιεκτικότητα ελεύθερων ατόμων άνθρακα ή/και αζώτου που απαιτείται για εργογήρανση είναι συνήθως μικρότερη από 0,01 % κατά βάρος [10].



Εικόνα 1.26 Σχηματική αναπαράσταση της επίδρασης της εργογήρανσης (strain aging) στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβων HSLA [51].

Η επίδραση, λοιπόν, του strain aging σε ό,τι αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του σωλήνα είναι η εξής: 1) μεταβάλλει τη συμπεριφορά της διαρροής του υλικού από

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

συνεχή σε ασυνεχή, 2) αυξάνει το όριο διαρροής, 3) αυξάνει το λόγο Y/T , 4) αυξάνει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή (Ultimate Tensile Strength-UTS), 5) μειώνει την ολκιμότητα και 6) μειώνει την αντοχή [49].

Y/T : Ο λόγος του ορίου διαρροής προς τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή είναι ιδιαίτερος σημαντικός στο σχεδιασμό των αγωγών, διότι αντανακλά το απόθεμα πλαστικότητας του αγωγού και την ικανότητά του να αντέξει κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσής του και της χρήσης του, δείχνοντας ουσιαστικά την ικανότητα εργοσκλήρυνσης. Ένας μικρός λόγος Y/T συνεπάγεται ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ ορίου διαρροής και μέγιστης αντοχής (μεγαλύτερη δυναμική εργοσκλήρυνσης), με αποτέλεσμα όταν η επιβαλλόμενη τάση στο υλικό του αγωγού φθάσει την τιμή του ορίου διαρροής του, η πλαστική παραμόρφωση του υλικού θα αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό πριν η τάση προσεγγίσει τη μέγιστη αντοχή. Συνεπώς όσο μικρότερος είναι ο λόγος Y/T , τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα του υλικού του αγωγού να παραμορφωθεί από το σημείο εκκίνησης της πλαστικής παραμόρφωσης έως το σημείο θραύσης [75].

Ομοιόμορφη επιμήκυνση (Uniform elongation-UEL): Η ομοιόμορφη επιμήκυνση, όπως και λόγος Y/T είναι τιμές ενδεικτικές της ολκιμότητας των υλικών. Η πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται από τη συμπεριφορά του υλικού κατά την εργοσκλήρυνση. Σωλήνες υψηλότερης αντοχής (μεγαλύτερης κατηγορίας-grade) συνήθως εμφανίζουν μικρότερη ομοιόμορφη επιμήκυνση, γεγονός που σημαίνει ότι χαρακτηρίζονται από μικρότερη παραμορφωσιμότητα πριν την αστοχία. Επιπλέον, αναμένεται μείωση της ολκιμότητας κατά τη διάρκεια διαμόρφωσης του σωλήνα, εξαιτίας της εργοσκλήρυνσης. Παρόλο που και η ομοιόμορφη επιμήκυνση, αλλά και ο λόγος Y/T χρησιμοποιούνται προκειμένου να χαρακτηρίσουν την ολκιμότητα του υλικού, δε συμπεριφέρονται ομοιόμορφα κατά τη ψυχρή διαμόρφωση. Η παρουσία πλατό διαρροής Luders οδηγεί σε αύξηση της ομοιόμορφης επιμήκυνσης, ενώ για σωλήνες κατηγορίας X56 έως X70 έρευνες έχουν δείξει ότι αύξηση του λόγου Y/T και του ορίου διαρροής έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ομοιόμορφης επιμήκυνσης [49].

Ολική επιμήκυνση (Total elongation-TEL): Πρόκειται για τη συνολική επιμήκυνση του υλικού κατά την πλαστική παραμόρφωση και προκύπτει από το άθροισμα της ομοιόμορφης επιμήκυνσης και της ανομοιόμορφης επιμήκυνσης. Η ομοιόμορφη επιμήκυνση όπως έχει ήδη επισημανθεί αναφέρεται στην επιμήκυνση έως τη μέγιστη αντοχή και συσχετίζεται με μονοαξονικές τάσεις, ενώ η ανομοιόμορφη επιμήκυνση υπολογίζει την επιμήκυνση μετά τη μέγιστη αντοχή του υλικού έως το σχηματισμό

λαιμού και τελικώς τη θραύση του υλικού και συσχετίζεται με τάσεις και στους τρεις άξονες [49].

UEL/TEL: Ο λόγος της ομοιόμορφης προς την ολική επιμήκυνση καθορίζει την αντοχή του υλικού από τη στιγμή που θα φθάσει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του έως στιγμή της θραύσης, όπου για μικρότερους λόγους UEL/TEL η αντοχή αυτή είναι μεγαλύτερη [49].

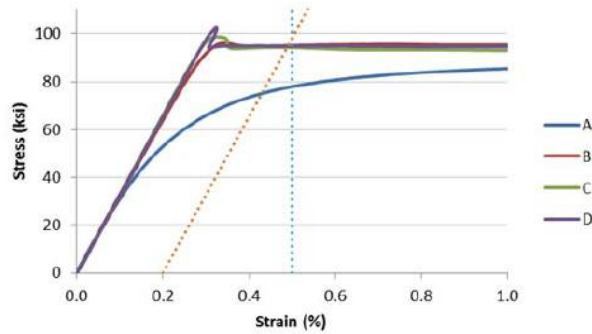
Όριο διαρροής (yield strength-YS)

Το όριο διαρροής είναι μια ιδιότητα εξέχουσας σημασίας στους σωλήνες που διαμορφώνονται μέσω της διαδικασίας UOE (ή JCOE), διότι επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την τελική ικανότητα του σωλήνα να αντέχει την επιβολή εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι σωλήνες χρησιμοποιούνται ως υποθαλάσσιοι αγωγοί για τη μεταφορά υγρών ή αερίων, δεχόμενοι υψηλές εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Όπως είναι γνωστό, το όριο διαρροής καθορίζεται από την τάση στην οποία το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά [51]. Το όριο διαρροής ενός σωλήνα που έχει διαμορφωθεί μέσω της διαδικασίας UOE ή JCOE εξαρτάται όχι μόνο από τις μηχανικές ιδιότητες της πλάκας, αλλά και από την πλαστική παραμόρφωση η οποία επιβάλλεται σε αυτήν καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας διαμόρφωσης [52]. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικές ιδιότητες της πλάκας επηρεάζουν το όριο διαρροής μέσω της εκλέπτυνσης των κόκκων, του στερεού διαλύματος και των κατακρημνισμάτων, οι οποίοι κι αποτελούν μηχανισμούς σκλήρωσης, αλλά και λόγω της ύπαρξης διαταραχών, ενώ η διαδικασία διαμόρφωσης του σωλήνα επηρεάζει το όριο διαρροής, αυξάνοντάς το μέσω της εργοσκλήρυνσης (work hardening) ή μειώνοντάς το μέσω του μαλακώματος (work softening) που προκαλείται από το φαινόμενο Bauschinger, ανάλογα με ιστορικό επιβολής των παραμορφώσεων [52]. Αυτή η διαφορά στο όριο διαρροής μεταξύ της πλάκας και του σωλήνα καθιστά αναγκαία την κατάλληλη επιλογή κατηγορίας χάλυβα (X) και των κατάλληλων παραμέτρων στη διαδικασία διαμόρφωσης [52]. Το τελικό όριο διαρροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο του πάχους του τοιχώματος του σωλήνα προς τη διάμετρό του (t/D), όπου για μικρούς λόγους t/D το φαινόμενο Bauschinger κυριαρχεί οδηγώντας σε μείωση του ορίου διαρροής, ενώ για μεγαλύτερους λόγους t/D η εργοσκλήρυνση κυριαρχεί, οδηγώντας σε αυξημένο όριο διαρροής [52]. Στην **Εικόνα 1.28** διακρίνεται το ιστορικό και το είδος των παραμορφώσεων που έχουν επιβληθεί στις διάφορες

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

ζώνες της πλάκας, μέχρι εκείνη να διαμορφωθεί σε σωλήνα (όπου C=Compression-Συμπίεση και T=Tension-Εφελκυσμός) [4], [52].

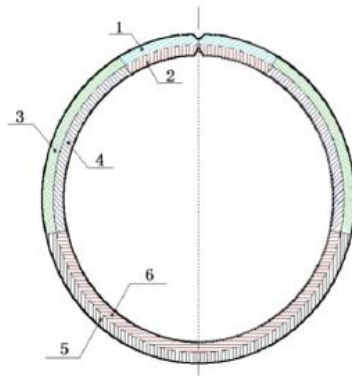
Σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό του ορίου διαρροής από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε φέροντας παράλληλη από το σημείο 0.2% της παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή, είτε όπως ορίζουν διεθνή πρότυπα, φέροντας κάθετη στο 0,5% της παραμόρφωσης (**Εικόνα 1.27**) [49], [69].



Εικόνα 1.27 Προσδιορισμός ορίου διαρροής από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης με βάση το 0.2% και το 0.5% της παραμόρφωσης [49].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

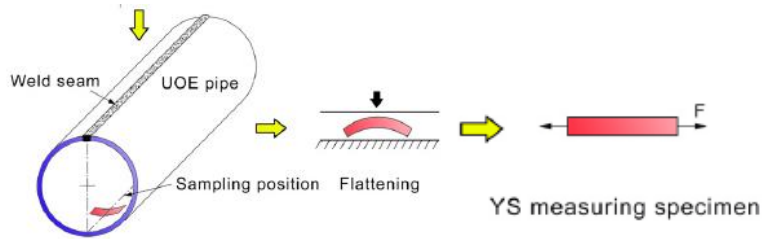
| Ζώνη | Πρεσάρισμα άκρων | J διαμόρφωση | C διαμόρφωση | O διαμόρφωση | | Μηχανική διαστολή (E) | Επιπέδωση |
|------|------------------|--------------|--------------|--------------|----------|-----------------------|-----------|
| | | | | Λυγισμός | Συμπίεση | | |
| | Λυγισμός | Λυγισμός | Λυγισμός | Λυγισμός | Συμπίεση | Εφελκυσμός | Λυγισμός |
| 1 | T | T | T | - | C | T | - |
| 2 | C | C | C | - | C | T | - |
| 3 | - | T | T | T | C | T | - |
| 4 | - | C | C | C | C | T | - |
| 5 | - | T | T | C | C | T | - |
| 6 | - | C | C | T | C | T | - |



Εικόνα 1.28 Ιστορικό και είδος παραμορφώσεων που επιβάλλονται στις διάφορες ζώνες της πλάκας κατά τη διαμόρφωσή της σε σωλήνα μέσω της διαδικασίας JCOE [4], [52].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που πρέπει να επισημανθεί είναι το γεγονός ότι τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ορίου διαρροής, αφότου κοπούν επιπεδώνονται προκειμένου να αποκτήσουν την κατάλληλη μορφή (**Εικόνα 1.29**), με αποτέλεσμα το όριο διαρροής να μειώνεται, γεγονός που πρέπει να συνυπολογίζεται στην αξιολόγηση του ορίου διαρροής [52].

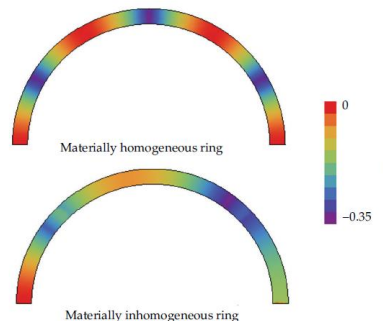
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.29 Διαδικασία κοπής και επιπέδωσης δοκιμίου για μέτρηση του ορίου διαρροής στον εγκάρσιο άξονα [52].

1.4.4 ΑΝΟΜΟΙΟΓΕΝΕΙΑ ΥΛΙΚΟΥ

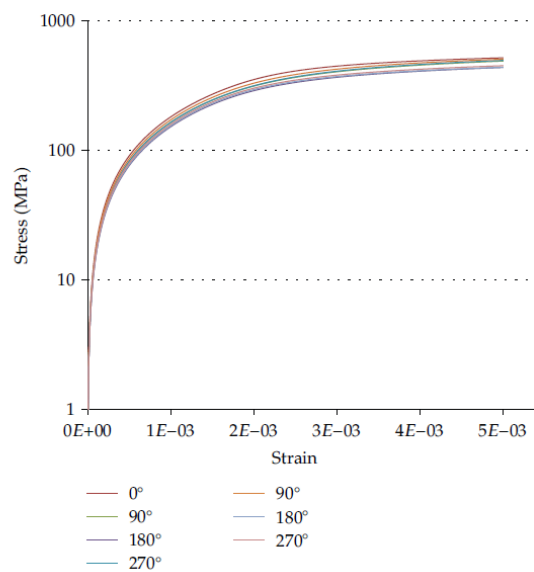
Στους υποθαλάσσιους αγωγούς η κατάρρευση που προέρχεται από την υδροστατική πίεση είναι ένα ασταθές φαινόμενο, το οποίο επηρεάζεται από τη γεωμετρία του αγωγού, αλλά και από τις ιδιότητες του υλικού. Εξαιτίας, λοιπόν, της διαδικασίας JCOE ή UOE που υφίσταται ο αγωγός, ενδέχεται οι ιδιότητές του και πιο συγκεκριμένα το όριο διαρροής του κατά τη συμπίεση να διαφέρει στις διάφορες θέσεις περιμετρικά του σωλήνα (**Εικόνα 1.30**), ακόμα και σε ποσοστά της τάξης του 35% [13].



Εικόνα 1.30 Οι τιμές ορίου διαρροής (f) περιμετρικά του δακτυλιδιού ενός ομοιογενούς (άνω μέρος) και ενός ανομοιογενούς αγωγού, όπως υπολογίστηκαν σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων [13].

Ενδεικτικά, παρατίθεται διάγραμμα με τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση, από δοκίμια που προέρχονται από διαφορετικές θέσεις περιφερειακά του σωλήνα, όπου είναι εμφανής η μεταξύ τους απόκλιση στις τιμές του ορίου διαρροής (**Εικόνα 1.31**) [13].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.31 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης κατά συμπίεση σε δοκίμια από διαφορετικές θέσεις περιμετρικά του σωλήνα [13].

Αυτή η διαφοροποίηση των τιμών του ορίου διαρροής περιφερειακά του σωλήνα έχει αρνητική επίδραση σε ό,τι αφορά την πίεση κατάρρευσης του αγωγού, καθώς ο ανομοιογενής αγωγός καταρρέει σε μικρότερη πίεση συγκριτικά με τον ομοιογενή. Για παράδειγμα, σε δακτυλίδι αγωγού που παρουσιάζει ομοιογένεια ορίου διαρροής περιμετρικά, η πίεση κατάρρευσης είναι 34,59 MPa, ενώ για δακτυλίδι με τα ίδια ακριβώς γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά με ανομοιογένεια ορίου διαρροής είναι 28,07 MPa [13].

1.4.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ JCOE

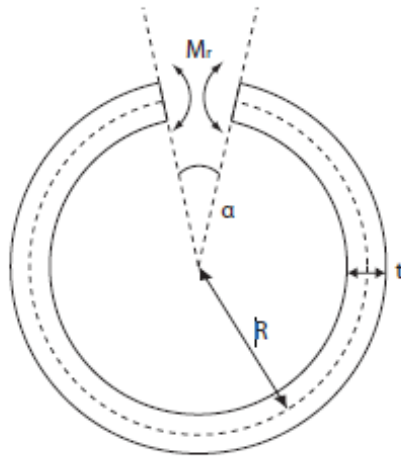
Παραμένουσες τάσεις (Residual Stresses)

Ένα σύνθηρες πρόβλημα κατά τη διαμόρφωση των σωλήνων είναι η παρουσία παραμενουσών τάσεων. Για παράδειγμα κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης UOE ή JCOE ο συνδυασμός των τάσεων που επιβάλλονται αρχικά κατά το πρεσάρισμα της πλάκας, αλλά και των τάσεων που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης βυθιζόμενου τόξου, είναι δυνατό να προκαλέσουν μεγάλες παραμένουσες τάσεις κατά το διαμήκη άξονα του σωλήνα, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε παραμόρφωση κάμψης. Ειδικά στην περίπτωση που μελετάται η πίεση στην οποία θα καταρρεύσει ο

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

αγωγός, αφότου εγκατασταθεί στον πυθμένα της θάλασσας, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις παραμένουσες τάσεις περιμετρικά του σωλήνα [56].

Προκειμένου να μετρηθούν οι παραμένουσες τάσεις περιμετρικά του σωλήνα χρησιμοποιείται η μέθοδος «διαχωρισμού δακτυλιδιού» (ring splitting method), κατά την οποία ένα μέρος-δακτυλίδι του σωλήνα αφαιρείται και στη συνέχεια διαχωρίζεται αξονικά, με αποτέλεσμα το δακτυλίδι να μπορεί είτε να ανοίξει, είτε να κλείσει. Το κατά πόσο έχει ανοίξει ή κλείσει το δακτυλίδι, χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστούν οι παραμένουσες τάσεις περιμετρικά του σωλήνα, όπου πιο συγκεκριμένα, εάν το δακτυλίδι ανοίξει, είναι μια ένδειξη ότι η εσωτερική επιφάνεια βρίσκεται υπό συμπίεση και η εξωτερική υπό εφελκυσμό, ενώ εάν αντιθέτως το δακτυλίδι κλείσει, η εξωτερική επιφάνεια θα βρίσκεται υπό συμπίεση και η εσωτερική υπό εφελκυσμό. Όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 1.32**, όπου και αποτυπώνεται η δοκιμή «διαχωρισμού δακτυλιδιού», η σχέση που χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστούν οι παραμένουσες τάσεις περιμετρικά του σωλήνα είναι η $\sigma_{res} = \frac{Et}{4\pi R} a$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του σωλήνα [11].



Εικόνα 1.32 Καθορισμός παραμενουσών τάσεων, περιμετρικά του σωλήνα, με τη μέθοδο «διαχωρισμού δακτυλιδιού» (ring splitting method) [11].

Φαινόμενο Springback (Springback effect)

Στους χάλυβες υψηλής αντοχής η μικρή επιμήκυνση λόγω της υψηλής αντοχής οδηγεί σε προβλήματα κατά τη διαμόρφωση, με αποτέλεσμα το χαλυβδόφυλλο όταν δέχεται υψηλές τάσεις κατά την επεξεργασία του, να κινδυνεύει να σπάσει και να εμφανίζει διαστασιακές ατέλειες, που είναι γνωστές ως «φαινόμενο springback» [91]. Αναλυτικότερα, όταν η χαλύβδινη πλάκα εξέρχεται από το καλούπι της πρέσας κατά τη διαμόρφωση του σωλήνα, ο περιορισμός της σταματά και οι παραμένουσες τάσεις που υπάρχουν σε αυτήν προκαλούν μια ελαστική παραμόρφωση, η οποία επιφέρει μια νέα μορφή ισορροπίας, με αποτέλεσμα η ελαστική επαναφορά της πλάκας-ημιτελούς σωλήνα να είναι μεγάλη και να καθιστά πολλές φορές δύσκολη την επιθυμητή ακρίβεια στις διαστάσεις του σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα το εν λόγω φαινόμενο εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό στους σωλήνες με μικρό πάχος και με μεγάλο λόγο διαμέτρου/πάχος (D/t), εξαιτίας της μεγαλύτερης ελαστικής περιοχής και της υψηλής τάσης διαρροής που τους χαρακτηρίζει [41], [63]. Ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος διαμόρφωσης σωλήνα UOE, στο πρώτο στάδιο «U» ο σωλήνας επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το φαινόμενο springback, με αποτέλεσμα να αποκτά σχήμα που ενδέχεται να εμφανίζει δυσκολία στην εισαγωγή στο επόμενο στάδιο διαμόρφωσης «O» [41]. Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης είτε είναι UOE, είτε είναι JOE, ο σωλήνας υφίσταται ποικίλους κύκλους παραμόρφωσης εφελκυσμού, αλλά και συμπίεσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί και αποτυπώνεται στην **Εικόνα 1.33**, οι οποίοι τελικώς επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού του σωλήνα σε συμπίεση, φαινόμενο που είναι γνωστό ως «φαινόμενο Bauschinger» [41].



Εικόνα 1.33 Απελευθέρωση φορτίου πρέσας και φαινόμενο «springback» στο στάδιο «O» της διαμόρφωσης του σωλήνα [63].

Κατά τη διαδικασία του πρεσαρίσματος των άκρων (crimping) επηρεάζεται σημαντικά το άνω μέρος του σωλήνα είτε πραγματοποιείται διαδικασία διαμόρφωσης

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

UOE, είτε JCOE. Πιο συγκεκριμένα, το πρεσάρισμα των άκρων επηρεάζει το σχήμα και την οβαλότητα του σωλήνα, ενώ έχει βρεθεί ότι όταν οι ακτίνες των πρεσών είναι μικρότερες από την αντίστοιχη εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του σωλήνα οδηγεί σε μεγαλύτερες πιέσεις πριν από το στάδιο της μηχανικής διαστολής κι επιπλέον έχει διαπιστωθεί ότι όταν η διάμετρος του αγωγού διασταλεί μηχανικά κατά περίπου 1% και οι θετικές, αλλά και οι αρνητικές επιδράσεις του πρεσαρίσματος των άκρων συνήθως απαλείφονται [41]. Οι κύριες παράμετροι που επιδρούν στο σχήμα του σωλήνα είναι η εξωτερική και η εσωτερική ακτίνα της πρέσας και το μήκος της πλάκας που πρεσάρεται κι έτσι μικρότερη εσωτερική ακτίνα του καλουπιού της πρέσας οδηγεί σε έναν αγωγό καλύτερου σχήματος [41]. Σε ό,τι αφορά τη διαδικασία διαμόρφωσης JCOE, η διαμόρφωση του σωλήνα επιτυγχάνεται μέσω ενός αριθμού αυξανόμενων κτυπημάτων-πιέσεων με μικρότερη απαιτούμενη δύναμη και λιγότερο εξοπλισμό. Έτσι, λοιπόν, το «φαινόμενο springback» μπορεί να ελεγχθεί έως ένα βαθμό μέσω του ελέγχου του βάθους των κτυπημάτων κατά τη διαμόρφωση JCOE [41].

Συντελεστής διαμόρφωσης (Fabrication factor)

Σύμφωνα με το πρότυπο DNV-OS-F101, σε διεργασίες διαμόρφωσης όπου εισάγονται ψυχρές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα να οδηγούν το σωλήνα σε διαφορετικό όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό και τη συμπίεση, ένας συντελεστής α_{fab} θα πρέπει να καθορίζεται. Ανάλογα, λοιπόν, με τη διαδικασία διαμόρφωσης του σωλήνα οι τιμές που παίρνει αυτός ο συντελεστής παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα [69]. Εναλλακτικά, η τιμή του συντελεστή υπάρχει δυνατότητα να υπολογιστεί διαιρώντας το μέσο όρο των τιμών του ορίου διαρροής περιμετρικά του σωλήνα κατά τη συμπίεση προς τον αντίστοιχο μέσο όρο κατά τον εφελκυσμό [69], [70]. Η τιμή του συντελεστή ενδέχεται να είναι και μεγαλύτερη από ένα, αν για παράδειγμα ο σωλήνας έχει υποστεί θερμική γήρανση κι επομένως το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση γίνει μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κατά τον εφελκυσμό [69], [70].

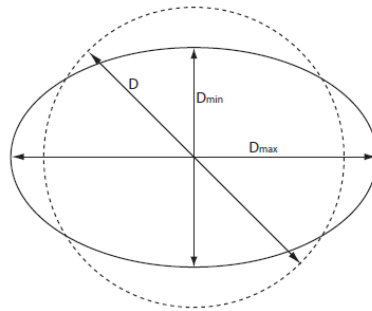
| <i>Pipe</i> | <i>Seamless</i> | <i>UO & TRB & ERW</i> | <i>UOE</i> |
|----------------|-----------------|-------------------------------|------------|
| α_{fab} | 1.00 | 0.93 | 0.85 |

Εικόνα 1.34 Πίνακας τιμών συντελεστή α_{fab} ανάλογα με τη διαδικασία διαμόρφωσης [69].

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγού

Λόγος D/t: Ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος του σωλήνα είναι πολύ σημαντικός παράγοντας και είναι ανάλογος της ικανότητας του σωλήνα να αντέξει την επιβολή εξωτερικής πίεσης για μικρότερους λόγους D/t, όπου πρόκειται για πιο παχύ και ανθεκτικότερο σωλήνα, που όμως απαιτεί περισσότερο υλικό και επίσης είναι ακριβότερος και πιο δύσκολος στο χειρισμό, εξαιτίας του βάρους του [56]. Ο λόγος D/t είναι εξέχουσας σημασίας, διότι καθορίζει ουσιαστικά αν ο αγωγός θα καταρρεύσει πλαστικά ή ελαστικά, σύμφωνα με τον τύπο $D/t_{tr} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\sigma_y}}$, όπου E είναι το όριο ελαστικότητας του Young, ν λόγος Poisson και σ_y η τάση διαρροής του υλικού του σωλήνα. Σύμφωνα με αυτό τον τύπο γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι σωλήνες με μικρότερο λόγο D/t θα καταρρεύσουν πλαστικά, ενώ σωλήνες με μεγαλύτερο λόγο D/t θα καταρρεύσουν ελαστικά [11].

Οβαλότητα (Ovality): Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας σε ό,τι αφορά την αντοχή του σωλήνα στην επιβολή εξωτερικής πίεσης είναι η οβαλότητά του (**Εικόνα 1.35**), η οποία υπολογίζεται από τον τύπο $f_o = \frac{D_{max}-D_{min}}{D_n}$, όπου D_{max} είναι η μέγιστη εξωτερική διάμετρος, D_{min} είναι η ελάχιστη εξωτερική διάμετρος και D_n είναι η ονομαστική διάμετρος του σωλήνα και μπορεί επίσης να εκφραστεί κι ως επί τοις εκατό ποσοστό, απλώς πολλαπλασιάζοντας με 100 [11], [69]. Σύμφωνα με το πρότυπο DNV η οβαλότητα θα πρέπει να έχει ελάχιστη τιμή 0.005 [69].

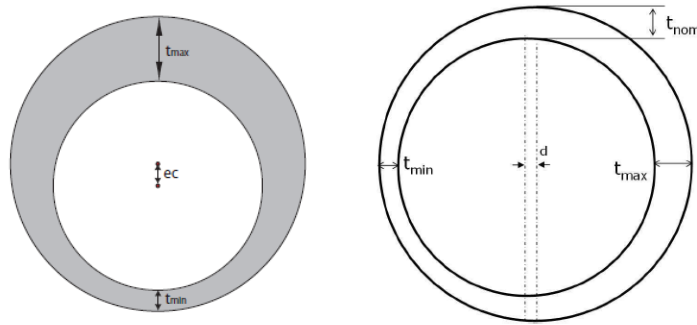


Εικόνα 1.35 Εγκάρσια διατομή σωλήνα στην οποία καθορίζεται η οβαλότητα [11].

Εκκεντρότητα (Eccentricity): Στους σωλήνες που διαμορφώνονται με τη μέθοδο UOE ή JCOE και συγκολλούνται κατά το διαμήκη άξονα, η εκκεντρότητα δηλαδή η διαφορά στο πάχος περιφερειακά του σωλήνα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.36**, είναι αμελητέα, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη πλακών με ομοιόμορφο πάχος και προέρχονται από θερμομηχανική έλαση [7]. Η όποια μεταβολή υπάρχει

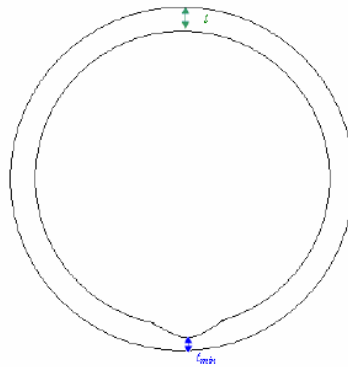
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

στους σωλήνες τέτοιου τύπου οφείλεται σε αποτυχία κεντραρίσματος με την ονομαστική εξωτερική διάμετρο [7]. Η εκκενρότητα υπολογίζεται από τον τύπο $e_c = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{nom}}$, όπου t_{max} είναι το μέγιστο πάχος, t_{min} είναι το ελάχιστο πάχος και t_{nom} είναι η ονομαστικό πάχος του σωλήνα και μπορεί επίσης να εκφραστεί κι ως επί τοις εκατό ποσοστό, απλώς πολλαπλασιάζοντας με 100 [69].



Εικόνα 1.36 Διαφορά πάχους στην εγκάρσια διατομή σωλήνα, Αριστερά: Στον κάθετο άξονα [11], Δεξιά: Στον οριζόντιο άξονα [71].

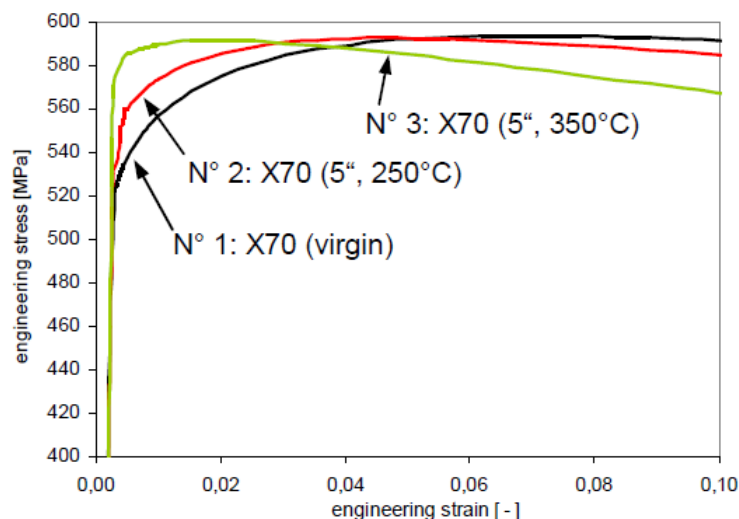
Τοπική μεταβολή του πάχους: Αποτελεί τοπική ατέλεια του σωλήνα που προκαλείται μεταξύ των μηχανικών διαστολέων στη διαδικασία διαμόρφωσης UOE ή JCOE και υπολογίζεται από τον τύπο $w = 1 - \frac{t_{min}}{t}$, όπου t_{min} είναι το τοπικά μειωμένο πάχος και t το μέσο πάχος του σωλήνα (**Εικόνα 1.37**) [56].



Εικόνα 1.37 Τοπική μεταβολή του πάχους του σωλήνα [56].

Θερμική γήρανση (Thermal aging)

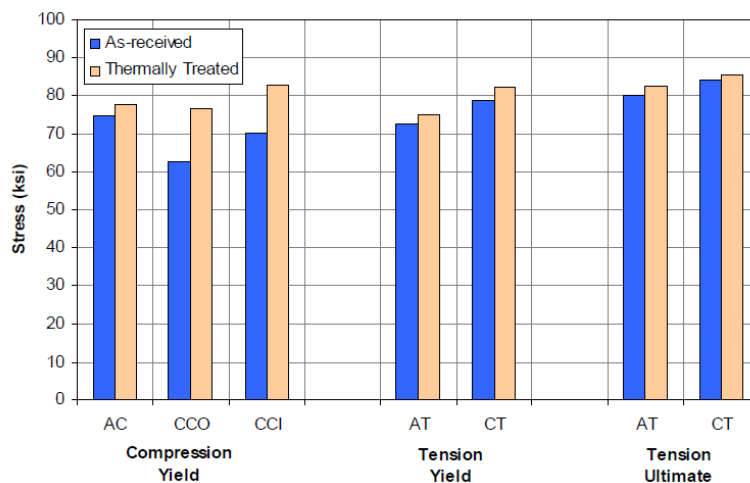
Μετά από τη μηχανική διαστολή του σωλήνα ακολουθεί η επικάλυψη του, ως αντιδιαβρωτική προστασία, διαδικασία που περιλαμβάνει θέρμανση του σωλήνα σε θερμοκρασίες μεταξύ των 200 και 250°C περίπου για πέντε λεπτά, προκειμένου να ψεκαστεί στη συνέχεια η εποξειδική ουσία (FBE) σε μορφή σκόνης στη θερμομασμένη επιφάνεια του σωλήνα και να προσκολληθεί σε αυτήν [49]. Η θέρμανση πραγματοποιείται μέσω επαγωγικών πηνίων κι από υπολογισμούς έχει προκύψει ότι η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία στην επιφάνεια του σωλήνα, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια καλή επικάλυψη, είναι 260°C [64]. Επειδή σπάνια δεν πραγματοποιείται επικάλυψη στους σωλήνες, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις του φαινομένου της θερμικής γήρανσης στις ιδιότητες του σωλήνα, προκειμένου οι ιδιότητές του να παραμείνουν αποδεκτές και μετά το πέρας της επικάλυψης [49]. Πιο συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί από σχετικές έρευνες ότι θερμική γήρανση σε θερμοκρασίες των 200°C και άνω οδηγούν σε μείωση της ομοιόμορφης επιμήκυνσης του υλικού του σωλήνα, ενώ έχει επίσης παρατηρηθεί ότι σε θερμοκρασίες των 160°C και άνω οδηγεί σε εμφάνιση πλατό διαρροής Luders περιφερειακά του σωλήνα [49]. Στην **Εικόνα 1.38** που ακολουθεί διακρίνεται η αλλαγή που επιφέρει η θερμική γήρανση στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στον εγκάρσιο άξονα, όπου σε σύγκριση με την αρχική καμπύλη 1, στις καμπύλες 2 και 3 μετά από θερμική γήρανση η ομοιόμορφη επιμήκυνση μειώνεται, ενώ ο λόγος Y/T αυξάνεται [65].



Εικόνα 1.38 Επίδραση της θερμικής γήρανσης στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στον εγκάρσιο άξονα [65].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Ωστόσο, η θερμική γήρανση έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει το όριο διαρροής του υλικού του σωλήνα κατά τη συμπίεση (compressive yield strength), αντισταθμίζοντας έτσι τη μείωση που έχει υποστεί αυτό κατά τη διαδικασία ψυχρής διαμόρφωσης [66], [67], [68]. Αυτή η αύξηση του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση αποδίδεται στο γεγονός ότι κατά τη θερμική γήρανση αναμένεται να κατακρημνιστούν καρβίδια και νιτρίδια που βρίσκονται σε στερεό διάλυμα, προς τις διαταραχές και κατά αυτό τον τρόπο να εμποδίσουν τη διάδοσή τους και να καθυστερήσουν τη διαρροή του υλικού του σωλήνα [68]. Γενικά, η θερμική γήρανση οδηγεί σε αύξηση του ορίου διαρροής του σωλήνα σε όλες τις κατευθύνσεις, με τη μεγαλύτερη όμως αύξηση να παρατηρείται στο όριο διαρροής περιμετρικά του σωλήνα κατά τη συμπίεση, όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 1.39** [64].



Εικόνα 1.39 Το όριο διαρροής σε εφελκυσμό και σε συμπίεση και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή στη θέση 180° (απέναντι από τη ραφή της συγκόλλησης), όπου με μπλε χρώμα είναι το δακτυλίδι του σωλήνα που δεν έχει υποστεί θερμική γήρανση και με μπεζ χρώμα είναι το αντίστοιχο δακτυλίδι που έχει υποστεί θερμική γήρανση (AC: συμπίεση κατά τον άξονα, CCO: συμπίεση περιμετρικά του σωλήνα στο άκρο της εξωτερικής διαμέτρου, CCI: συμπίεση περιμετρικά του σωλήνα στο άκρο της εσωτερικής διαμέτρου, AT: αξονικός εφελκυσμός, CT: εφελκυσμός περιμετρικά του σωλήνα) [64].

1.4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

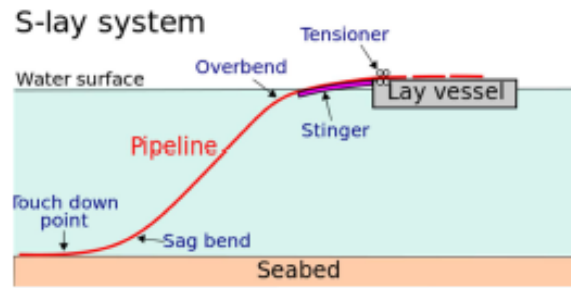
Η διαδικασία εγκατάστασης των υποθαλάσσιων αγωγών πραγματοποιείται με ποικίλους τρόπους, οι οποίοι είναι:

1. S-εναπόθεση (S-lay)
2. J-εναπόθεση (J-lay)
3. Με εναπόθεση μέσω ξετυλίγματος (Reeled-lay)
4. Με εναπόθεση μέσω ρυμούλκησης (Towed-lay)

Η επιλογή μεθόδου εγκατάστασης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους είναι το βάθος εγκατάστασης και τα χαρακτηριστικά του σωλήνα, όπως το μήκος, το βάρος και η διάμετρος, αλλά και η τοπογραφία του πυθμένα της θάλασσας [5].

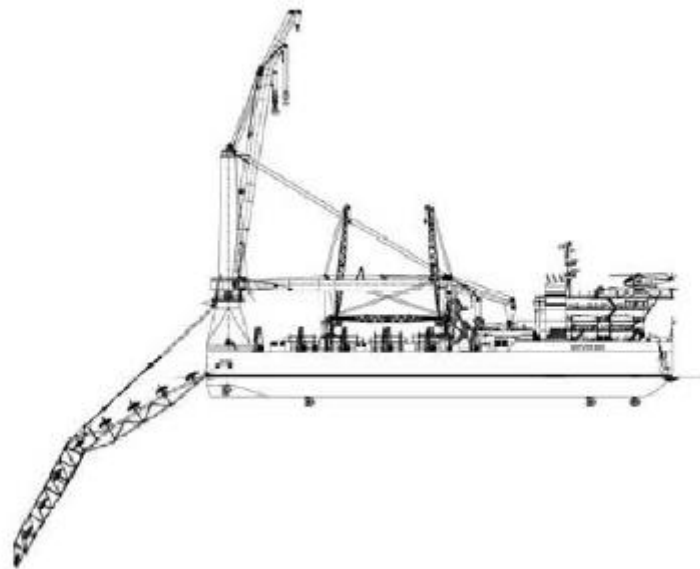
Η μέθοδος εναπόθεσης σωλήνα S είναι η πιο συνήθης στις υποθαλάσσιες εφαρμογές, ειδικά για σχετικά μεγάλης διαμέτρου αγωγούς ($d > 16''$) και χρησιμοποιείται και σε μικρά, αλλά και σε μεγάλα βάθη. Η τεχνική εγκατάστασης είναι χαρακτηριστική, με τη μορφή «S» του σωλήνα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, η οποία είναι αποτέλεσμα του οδηγού (stinger) και του εντατήρα (tensioner) πάνω στο σκάφος μεταφοράς (**Εικόνα 1.40**). Αφότου ο σωλήνας περάσει έναν αριθμό από σταθμούς συγκόλλησης, αλλά και από φάσεις ελέγχων και εντατήρων, ανυψώνεται από τον οδηγό (stinger), ο οποίος συνήθως βρίσκεται στην άκρη του σκάφους. Ο οδηγός (stinger) είναι αυτός που θα ορίσει την καμπυλότητα ανώτερου άκρου του σωλήνα, το γνωστό ως «overbend», ενώ κύλινδροι εξασφαλίζουν υποστήριξη στον αγωγό, από τη στιγμή που συνεχίζει να βυθίζεται ανυποστήρικτος, μέχρις ότου ακουμπήσει στον πυθμένα της θάλασσας. Εκεί στο χαμηλότερο σημείο ο αγωγός αποκτά μια καμπυλότητα αντίθετη με την αντίστοιχη overbend, που είναι γνωστή ως «sag bend» και είναι αποτέλεσμα των εντατήρων και του βάρους του αγωγού, ενώ μπορεί να ελεγχθεί με την άσκηση εφελκυστικής τάσης στο σωλήνα από το εντατικό σύστημα του σκάφους [5].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.40 Μέθοδος εναπόθεσης αγωγού S [60].

Επίσης, υπάρχει μια παραλλαγή της συμβατικής μεθόδου S, η οποία είναι η «απότομη εναπόθεση S» (**Εικόνα 1.41**) και αποτελεί μια πιο εφαρμόσιμη μέθοδο για μεγάλα βάθη, τροποποιώντας τον οδηγό (stinger) και αυξάνοντας τη δομική αξιοποίηση του αγωγού. Η μέθοδος αυτή, λοιπόν, περιλαμβάνει την εγκατάσταση του οδηγού (stinger) με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε το σημείο ανύψωσης του αγωγού να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετο στην επιφάνεια της θάλασσας, γεγονός που ελαττώνει την εφελκυστική τάση που δέχεται που ο αγωγός σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο S. Η απότομη γωνία ανύψωσης υποδηλώνει ότι η καμπυλότητα πρέπει να αυξηθεί, προκειμένου να διατηρήσει τον οδηγό (stinger) σε ένα λογικό μέγεθος, με άμεση συνέπεια της αύξηση των παραμορφώσεων στο «overbend».

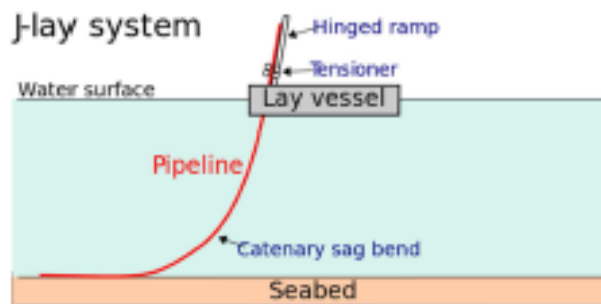


Εικόνα 1.41 Μέθοδος απότομης εναπόθεσης αγωγού S [5].

Η μέθοδος εναπόθεσης αγωγού J είναι μια μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλα βάθη, συνήθως σε σωλήνες διαμέτρου μέχρι 32 ίντσες. Το σχήμα J

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

του αγωγού κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης έχει διαπιστωθεί ότι εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα σε μεγάλα βάθη, καθώς δεν υπάρχει καθόλου «overbend» και μικρότερη εφελκυστική τάση απαιτείται απ' ότι στη μέθοδο εναπόθεσης S [5]. Πιο αναλυτικά, στη μέθοδο εναπόθεσης J, ο αγωγός εισάγεται στη θάλασσα από το σκάφος σχεδόν κάθετα (**Εικόνα 1.42**), μέσω ενός πύργου που είναι εγκατεστημένος στο σκάφος με αποτέλεσμα όπως έχει προαναφερθεί να μην υπάρχει overbend, παρά μόνο καμπυλότητα sagbend στο χαμηλότερο σημείο, η οποία και επηρεάζει την απαιτούμενη εφελκυστική τάση από τους εντατήρες. Λόγω της σχεδόν κάθετης εγκατάστασης μόνο ένας ή δύο σταθμοί απαιτούνται για συγκόλληση και για έλεγχο. Στελέχη από σωλήνες, από 2 μέχρι 5 αρθρώσεων συγκολλούνται μεταξύ τους, ανυψώνονται στο άνω άκρο του πύργου και συγκολλούνται με το ήδη υπάρχον μέρος του αγωγού. Συγκολλώντας πολλά στελέχη μαζί πριν την ανύψωση από τον πύργο αυξάνει την ταχύτητα εναπόθεσης, ωστόσο παραμένει σχετικά πιο αργή μέθοδος από την S [5].



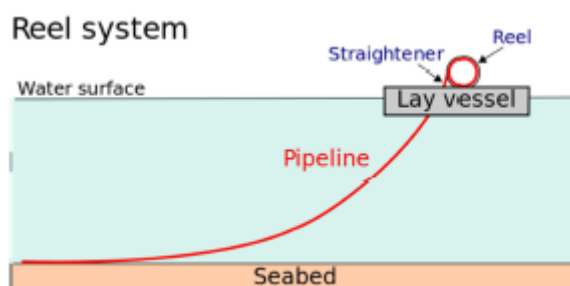
Εικόνα 1.42 Μέθοδος εναπόθεσης αγωγού J [60].

Η μέθοδος ξετυλίγματος αγωγού (reeling method) χρησιμοποιείται για σχετικά μικρής διαμέτρου σωλήνες, περίπου μέχρι 16 ίντσες, όπου ο αγωγός ξετυλίγεται από το σκάφος μεταφοράς στον πυθμένα της θάλασσας (**Εικόνα 1.43**). Πιο συγκεκριμένα, αρχικά ο αγωγός τυλίγεται στο τύμπανο στη στεριά, όπου λαμβάνει χώρα η κατασκευή και στη συνέχεια το τύμπανο εγκαθίσταται σε ένα σκάφος μεταφοράς, με το οποίο και κατευθύνεται προς υποθαλάσσια εγκατάσταση, είτε με τη μέθοδο S, είτε με τη μέθοδο J, ανάλογα με το βάθος εγκατάστασης και το σχεδιασμό του σκάφους. Δηλαδή, οριζόντια σκάφη με τύμπανα χρησιμοποιούν έναν οδηγό (stinger) και τη μέθοδο εναπόθεσης S για εγκατάσταση σε μικρά έως μεσαία μεγέθη, ενώ κάθετα σκάφη με

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

τύμπανα χρησιμοποιούν έναν πύργο και τη μέθοδο J για εγκατάσταση σε μεγαλύτερα βάθη.

Ο αγωγός, συνήθως, ανυψώνεται με μία σχετικά απότομη κλίση, προκαλώντας ελάχιστη ή και μηδαμινή overbend, με τις παραμορφώσεις στο sagbend να ελέγχονται από την εφελκυστική τάση του ίδιου του τυμπάνου. Υψηλές παραμορφώσεις επιβάλλονται στον αγωγό κατά τη διάρκεια του τυλίγματος στο τύμπανο, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τη διάμετρο του τυμπάνου. Με την επιβολή πλαστικής παραμόρφωσης η ολκιμότητα, αλλά και η αντοχή του σωλήνα ενδέχεται να επηρεαστούν, γι' αυτό και απαιτείται ευθυγράμμιση του αγωγού κατά την προσεδάφισή του στον πυθμένα [5]. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη συμβατότητα της διαδικασίας του τυλίγματος (reeling) με τον τύπο του χάλυβα του αγωγού, διότι η διαδικασία της συγκόλλησης υπάρχει περίπτωση να προκαλέσει ανεπιθύμητη εργοσκήρυνση στους μεγαλύτερους τύπους χαλύβων [60]. Ανάλογα με τη διάμετρο του αγωγού και του τυμπάνου η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να είναι μέχρι και δέκα φορές ταχύτερη από τις υπόλοιπες συμβατικές μεθόδους [5].

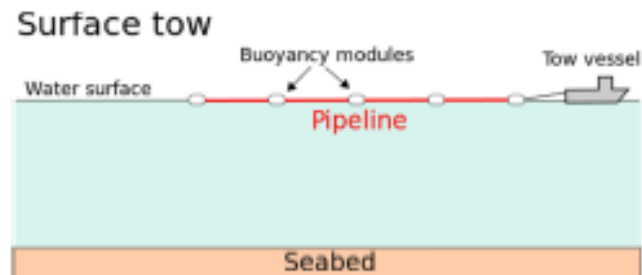


Εικόνα 1.43 Μέθοδος ξετυλίγματος αγωγού (reeling) [60].

Στη μέθοδο εναπόθεσης αγωγού μέσω ρυμούλκησης, ο αγωγός συναρμολογείται στην ακτή και στη συνέχεια ρυμουλκείται στην τοποθεσία εγκατάστασης μέσω σκάφους μεταφοράς. Η συναρμολόγηση πραγματοποιείται είτε παράλληλα, είτε κάθετα στην ακτογραμμή, όπου στην πρώτη περίπτωση ο πλήρης αγωγός μπορεί να συναρμολογηθεί πριν από τη ρυμούλκηση και την εγκατάσταση. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο προ-έλεγχος και η επιθεώρηση του αγωγού πραγματοποιούνται στην ακτή και όχι στη θάλασσα κι έτσι είναι δυνατό να διαχειριστούν αγωγοί κάθε μεγέθους και πολυπλοκότητας. Όσον αφορά τη διαδικασία ρυμούλκησης υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τρόποι-τεχνικές: 1) Η ρυμούλκηση στην επιφάνεια (surface tow) (**Εικόνα 1.44**), όπου ο αγωγός παραμένει στην επιφάνεια της θάλασσας κατά τη διάρκεια της ρυμούλκησης, με τη βοήθεια

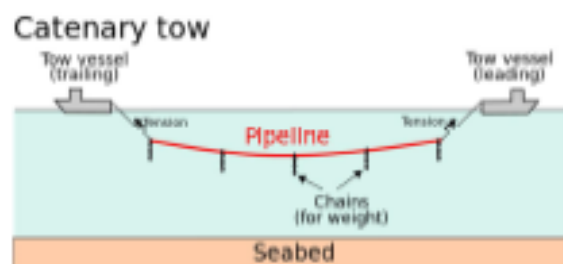
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

κάποιων μονάδων επίπλευσης και στη συνέχεια βυθίζεται στο σημείο της εγκατάστασης. Η τεχνική αυτή δεν συνίσταται για παραχώδεις θάλασσες με πλευρικά ρεύματα. 2) Επίσης παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η ρυμούλκηση κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (near-surface tow), όπου ο αγωγός παραμένει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, αλλά κοντά σε αυτήν, μετριάζοντας με αυτό τον τρόπο τη δράση των κυμάτων [60].



Εικόνα 1.44 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού στην επιφάνεια της θάλασσας [60].

3) Μια επιπλέον παρεμφερής τεχνική είναι η μεσαίου βάθους ρυμούλκηση (mid-depth tow), όπου ο αγωγός δεν είναι επιπλεύσιμος, είτε λόγω του βάρους του, είτε επειδή πιέζεται προς τα κάτω από αλυσίδες. Σε αυτή τη μέθοδο, ο αγωγός συγκρατείται μέσω αλυσίδων από δύο σκάφη μεταφοράς, όπως διακρίνεται και στην **Εικόνα 1.45**. Η καμπυλότητα του αγωγού εξαρτάται από το βάρος του, από την εφελκυστική τάση που ασκείται σε αυτόν από τα δύο σκάφη και από την άνωση των αλυσίδων, ενώ το ποια είναι η επιτρεπόμενη καμπυλότητα περιορίζεται από την απόσταση από τον πυθμένα [60].

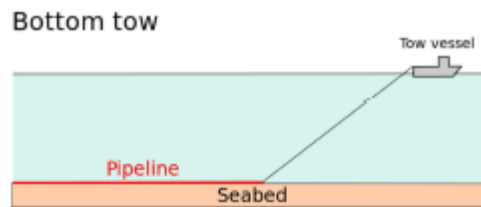


Εικόνα 1.45 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού μεσαίου βάθους [60].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

4) Μια διαφορετική τεχνική ρυμούλκησης είναι αυτή όπου αγωγού συγκρατείται περίπου ένα με δύο μέτρα μακριά από τον πυθμένα της θάλασσας (off-bottom tow), μέσω αλυσίδων που σύρονται στον πυθμένα [60].

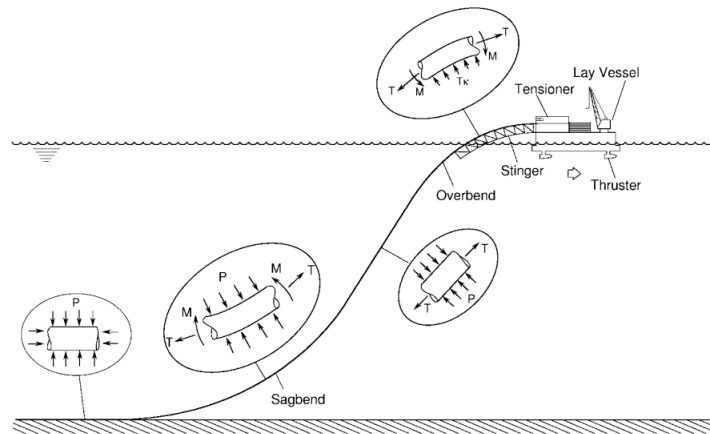
5) Τέλος, υπάρχει η τεχνική ρυμούλκησης στον πυθμένα (bottom tow), όπου ο αγωγός σύρεται στον πυθμένα (**Εικόνα 1.46**) και δεν επηρεάζεται από κύματα και ρεύματα, ενώ εάν τα νερά γίνουν ξαφνικά ταραχώδη για το σκάφος μεταφοράς, υπάρχει η δυνατότητα απλώς να εγκαταλειφθεί ο αγωγός και να ανακτηθεί αργότερα. Προκλήσεις που αντιμετωπίζονται είναι η ύπαρξη επικάλυψης ανθεκτικής στην τριβή, αλλά και η αλληλεπίδραση με άλλους υποθαλάσσιους αγωγούς και με πιθανά εμπόδια. Η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε διασταυρώσεις ποταμών και ακτών [60].



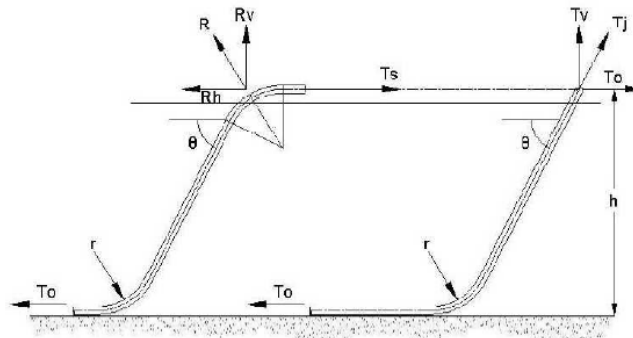
Εικόνα 1.46 Μέθοδος ρυμούλκησης αγωγού στον πυθμένα [60].

Ο σχεδιασμός του υποθαλάσσιου αγωγού περιλαμβάνει περιορισμούς όσον αφορά την αντοχή του σωλήνα τόσο εξωτερικά, όσο και εσωτερικά. Ωστόσο, κατά την εγκατάστασή του ο αγωγός είναι κενός εσωτερικά, επομένως η εσωτερική πίεση είναι μηδενική. Καθώς ο αγωγός μετακινείται σε μεγαλύτερο βάθος η εξωτερική υδροστατική πίεση γίνεται όλο και μεγαλύτερη και είναι πιθανό ο αγωγός να καταρρεύσει (pipe collapse). Παρ' όλα αυτά η επίδραση της εξωτερικής πίεσης (υδροστατικής) δεν είναι η μοναδική που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, διότι κατά την εγκατάσταση, ο αγωγός επιδέχεται αξονικό εφελκυσμό που προκαλείται από το σφιγκτήρα του σκάφους που μεταφέρει τον αγωγό προκειμένου να διατηρήσει την αλυσιδωτή του μορφή, ενώ υπάρχει μια στιγμή κατά την οποία ο αγωγός, εξαιτίας της αλυσιδωτής του μορφής, καθώς πλησιάζει τον πυθμένα υπόκειται σε λυγισμό (**Εικόνα 1.47**) [5], [6]. Όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 1.48** οι εφελκυστικές τάσεις τις οποίες δέχεται ο αγωγός διαφέρουν ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης που ακολουθείται [5].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.47 Φορτίσεις που δέχεται ο αγωγός κατά την εγκατάστασή του μέσω της μεθόδου S-lay [5].



Εικόνα 1.48 Εφελκυστικές τάσεις που δέχεται ο αγωγός κατά την εγκατάσταση με τη μέθοδο S-lay (αριστερά) και J-lay (δεξιά) [5].

1.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΑΓΩΓΟΥ

Ικανότητα αγωγού να παραμορφωθεί κατά τη συμπίεση (compressive strain capacity)

Με την ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας σωλήνων για αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου, χρησιμοποιούνται σωλήνες με μεγαλύτερη διάμετρο, που λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις και καλύπτουν ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις. Ο τοπικός λυγισμός (local buckling-wrinkling) εξαιτίας της υπερβολικής παραμόρφωσης συμπίεσης προκαλείται από λυγισμό ή συμπίεση στο διαμήκη άξονα ή και από συνδυασμό των δύο. Ο σχεδιασμός των σωλήνων δεν αρκεί να γίνεται με βάση την οριακή τάση που μπορεί να επιβληθεί στον αγωγό (stress-based design), διότι η τάση στους αγωγούς ενδέχεται να ξεπεράσει αυτή την τιμή υπό την επιβολή

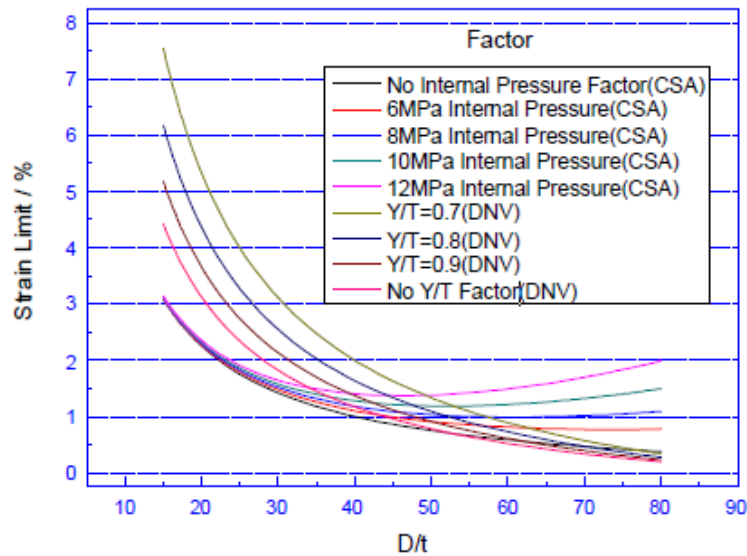
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

φορτίων, όπως σεισμοί, κατολισθήσεις και κατά την εναπόθεση στον πυθμένα της θάλασσας στην περίπτωση των υποθαλάσσιων αγωγών. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η οριακή κατάσταση παραμόρφωσης του σωλήνα (strain-based design), με αποτέλεσμα, εφόσον έχει διασφαλιστεί η κατάλληλη εγκατάστασή του, να μπορεί να δεχτεί παραμορφώσεις μεγαλύτερες και από την παραμόρφωσή του στο όριο διαρροής [86], [87]. Υπάρχουν πολλές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση (ϵ_c), όπως η εξίσωση Murphey-Langner, η Gresnigt, η CSA Z662-11, η C-FER, η DNV-OS-F101, η Dorey, API RP 1111, ενώ επίσης έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις από το Πανεπιστήμιο της Alberta, από τη JFE και από τη CRES [87], [88].

Σύμφωνα, λοιπόν, με το πρότυπο DNV-OS-F101 η εξίσωση για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής παραμόρφωσης κατά για αγωγό ο οποίος υφίσταται λυγισμό, αξονική δύναμη και υπερβολική εσωτερική πίεση είναι η εξής: $\epsilon_c = 0.78 \left(\frac{t}{D} - 0.01 \right) \left(1 + 5.75 \frac{P - P_e}{P_b} \right) a_h^{-1.5} a_{gw}$, όπου P και P_e είναι η εσωτερική και εξωτερική πίεση αντίστοιχα $a_h = \frac{Y}{T}$ (στο διαμήκη άξονα), $P_b = \frac{2t}{D-t} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}}$ είναι η πίεση διάσπασης (burst pressure), $f_{cb} = \min(f_y, \frac{f_u}{1.15})$ όπου f_y και f_u είναι το όριο διαρροής και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή στην περιφέρεια του σωλήνα αντίστοιχα και $a_{gw} = 1.2 - 0.01 \frac{D}{t}$ είναι ο συντελεστής μείωσης της αντοχής λόγω της πλευρικής συγκόλλησης για σωλήνες με $D/t > 20$ (κατά την εγκατάσταση οι σωλήνες ενώνονται μεταξύ τους με συγκόλληση) [69].

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 1.49** που ακολουθεί παρατίθενται οι κρίσιμες τιμές παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση (ϵ_c) για ένα εύρος λόγων D/t σύμφωνα με τα πρότυπα DNV και CSA, όπου διακρίνεται ότι χωρίς εσωτερική πίεση η τιμή ϵ_c μειώνεται με την αύξηση του λόγου Y/T [86].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.49 Σύγκριση τιμών παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση σύμφωνα με τα πρότυπα DNV και CSA [86].

Πίεση κατάρρευσης αγωγού (pipe collapse pressure)

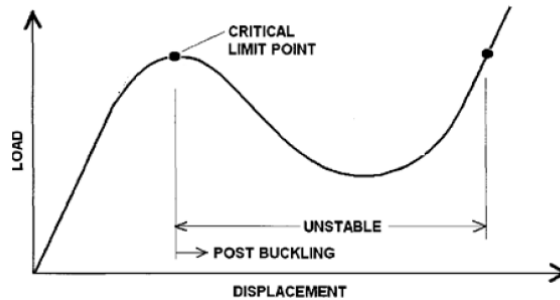
Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι σύνηθες να εγκαθίστανται άδειοι προκειμένου να ελαττωθεί όσο είναι δυνατό η εφελκυστική τάση που δέχεται ο αγωγός που βρίσκεται στον πυθμένα, λόγω του βάρους του κρεμάμενου μέρους του αγωγού που πρόκειται να εγκατασταθεί (**Εικόνα 1.48**). Επιπλέον, σε διεργασίες συντήρησης των αγωγών, αυτοί σταδιακά αποσυμπίεζονται εσωτερικά. Σε κάθε περίπτωση, λοιπόν, η αντοχή του αγωγού στην εξωτερική πίεση και πιο συγκεκριμένα στην υδροστατική πίεση αποτελεί παράμετρο σχεδίασης εξέχουσας σημασίας [73].

Το φαινόμενο που σχετίζεται με την αντοχή του αγωγού στην υδροστατική πίεση είναι ο τοπικός λυγισμός (local buckling) και η κατάρρευση του αγωγού, όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 1.50** [73]. Προκειμένου να αστοχήσει τοπικά ο αγωγός θα πρέπει το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση να ξεπεραστεί κι ο αγωγός λόγω της πίεσης να αποκτήσει πιο οβάλ σχήμα, με τη διαρροή του υλικού να εξαπλώνεται περαιτέρω [74]. Το φαινόμενο του λυγισμού, λοιπόν, αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία μια κατασκευή, όπου στην περίπτωση μας είναι αγωγός, δε μπορεί να δεχθεί φορτίο (υδροστατική πίεση στην περίπτωση του αγωγού που εξετάζεται) μεγαλύτερο από μια κρίσιμη τιμή (**Εικόνα 1.51**) κι επομένως μεταβάλλει το σχήμα του, προκειμένου να βρει μια νέα ισορροπία [89].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



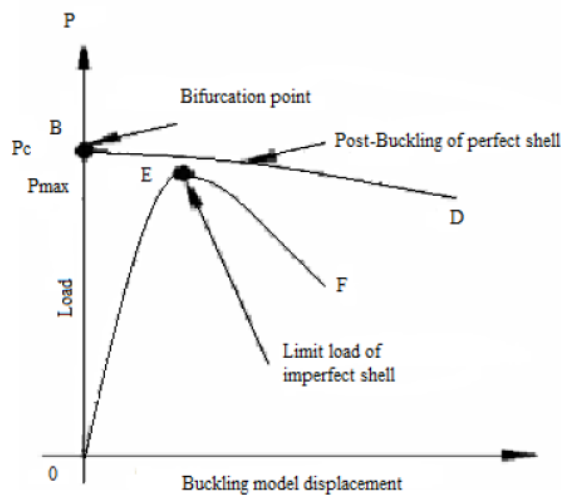
Εικόνα 1.50 Αγωγός X80 που έχει καταρρεύσει τοπικά [73].



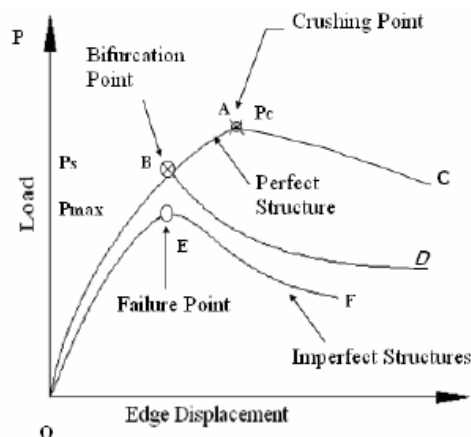
Εικόνα 1.51 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης του φαινομένου του λυγισμού (buckling) [89].

Υπάρχουν δύο τύποι του συγκεκριμένου φαινομένου, η μη γραμμική κατάρρευση (nonlinear collapse) και ο λυγισμός διακλάδωσης (bifurcation buckling). Στην πρώτη περίπτωση, ο αγωγός θα αρχίσει να παραμορφώνεται αργά και η ακαμψία του, η οποία ορίζεται από την κλίση του διαγράμματος φορτίο-παραμόρφωση (**Εικόνα 1.52**), θα μειώνεται καθώς αυξάνει το φορτίο. Στην κρίσιμη τιμή του φορτίου, η κλίση του διαγράμματος φορτίο-παραμόρφωση είναι μηδενική, επομένως η ακαμψία του αγωγού είναι μηδέν και η αστοχία και κατάρρευση του αγωγού είναι άμεση [89]. Στη δεύτερη περίπτωση, στο κρίσιμο σημείο φορτίου-σημείο διακλάδωσης (bifurcation point-σημείο B στην **Εικόνα 1.53**), υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι για να επέλθει ισορροπία στον αγωγό. Στην πρώτη περίπτωση ο αγωγός μετά το κρίσιμο φορτίο βρίσκεται πλέον στη μετά-λυγισμού κατάσταση του, ενώ στη δεύτερη περίπτωση στο σημείο διακλάδωσης η κλίση που έχει η ευθεία φορτίου-παραμόρφωσης καθορίζει εάν ο αγωγός διατηρεί έστω μερική αντοχή μετά το λυγισμό (θετική κλίση ευθείας) ή αν απλώς θα καταρρεύσει αμέσως μετά το σημείο διακλάδωσης (αρνητική κλίση ευθείας) [89].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.52 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για το φαινόμενο του μη γραμμικού λυγισμού [89].



Εικόνα 1.53 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για το φαινόμενο του λυγισμού διακλάδωσης [89].

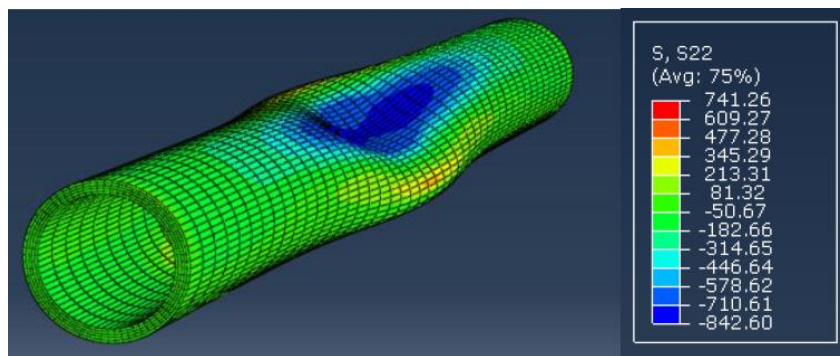
Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού ή κατάρρευσης λόγω εξωτερικής πίεσης είναι ένα ζήτημα εξέχουσας σημασίας για το σχεδιασμό αγωγών για μεγάλα βάθη. Η πίεση κατάρρευσης επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες όπως είναι ο λόγος D/t , οι ιδιότητες του υλικού, αρχικές γεωμετρικές ατέλειες όπως η οβαλότητα και η εκκεντρότητα [11], [56], [71], η ανισοτροπία του ορίου διαρροής [12], [13] και οι παραμένουσες τάσεις λόγω της διαδικασίας διαμόρφωσης του σωλήνα [14].

Υπάρχουν διάφορα πρότυπα που ορίζουν εξισώσεις για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης των σωλήνων κι ένα από τα πιο γνωστά είναι το DNV-OS-F101 (Det Norske Veritas Offshore Standard). Η εξίσωση, λοιπόν, για τον προσδιορισμό της

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

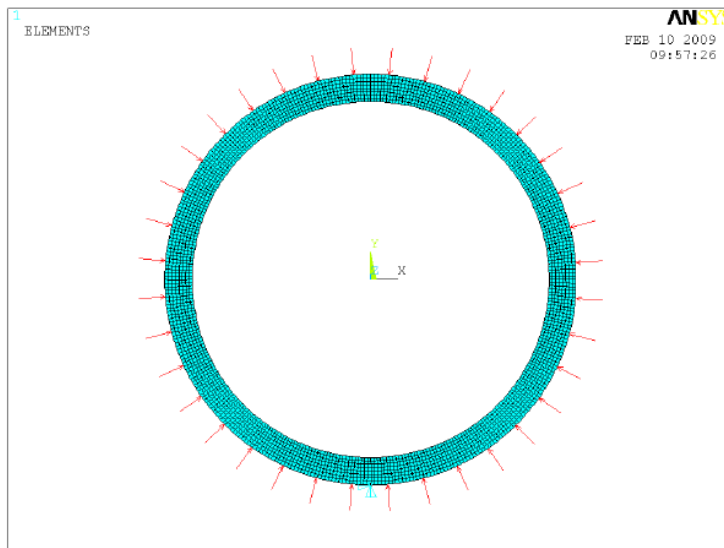
πίεσης κατάρρευσης σύμφωνα με πρότυπο DNV είναι $(p_c(t) - p_{el}(t)) * (p_c^2(t) - p_p^2(t)) = p_c(t) * p_{el}(t) * p_p(t) * f_0 * \frac{D}{t}$, όπου $p_c(t)$ είναι η πίεση κατάρρευσης, f_0 είναι η οβαλότητα του σωλήνα και $\frac{D}{t}$ ο λόγος της εξωτερικής διαμέτρου προς το πάχος του. Η χρήση του τύπου αυτού είναι αξιόπιστη για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης για αγωγούς όπου ισχύει ότι $15 < D/t < 60$ [69]. Όσον αφορά τους όρους $p_{el}(t)$ και $p_p(t)$, όπου $p_{el}(t) = \frac{2E(\frac{t}{D})^3}{1-\nu^2}$ και $p_p(t) = f_y * \alpha_{fab} * \frac{2t}{D}$ (f_y είναι το ελάχιστο όριο διαρροής ανάλογα με τον τύπο (grade) σωλήνα π.χ. X70 $\rightarrow 70\text{ksi} = 70 * 6.89 = 483\text{MPa}$) [69]. Ο τύπος του $p_{el}(t)$ υπονοεί ότι ο σωλήνας είναι ικανός να υπομείνει παραμορφώσεις μέχρι την αρχή της κατάρρευσης, όπου το υλικό του αγωγού υφίσταται μόνο ελαστικές παραμορφώσεις, ενώ ο τύπος $p_p(t)$ υπονοεί ότι πρέπει να προκληθούν πλαστικές παραμορφώσεις προκειμένου να καταρρεύσει ο σωλήνας [11].

Ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης σε υποθαλάσσιους αγωγούς, εκτός από τις αναλυτικές επιλύσεις εξισώσεων όπως αυτής του προτύπου DNV που προαναφέρθηκε, είναι η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μοντελοποίηση, λοιπόν, με αυτή τη μέθοδο μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε τρισδιάστατα (3D) είτε σε διδιάστατα (2D) μοντέλα, όπως αυτά της **Εικόνας 1.54** και **Εικόνας 1.55** αντίστοιχα.



Εικόνα 1.54 Τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης [90].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



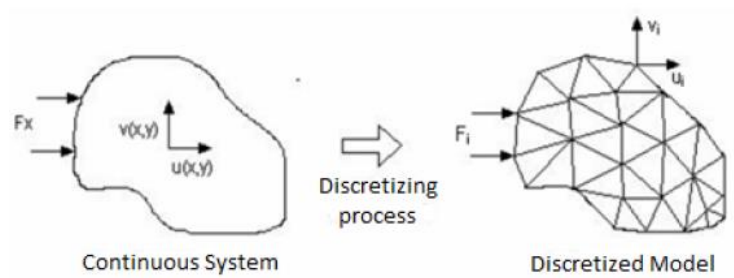
Εικόνα 1.55 Διδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης [8].

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχετικά καινούρια μέθοδος, αν και η λειτουργία και η δομή της είναι γνωστές εδώ και αρκετά χρόνια, με την τεχνολογική ανάπτυξη των υπολογιστών να ενισχύει την εξέλιξη της, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατό μέσω πλήθους προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων να οπτικοποιηθούν ο λυγισμός και άλλα φαινόμενα που υποδεικνύουν την κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων. Η γενική ιδέα, λοιπόν, της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο διαχωρισμός ενός συνεχούς συστήματος σε ένα σύνολο από μικρά στοιχεία (elements), τα οποία αλληλοσυνδέονται από ένα σύνολο σημείων (nodes), όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 1.56** [89]. Οι εξισώσεις που καθορίζουν τη συμπεριφορά του συνόλου, καθορίζουν επίσης και τη συμπεριφορά των στοιχείων. Σε κάθε σύστημα που αναλύεται τα εξής μέρη πρέπει να διακριθούν:

- Η γεωμετρία του συστήματος.
- Οι οριακές συνθήκες, δηλαδή γνωστές μεταβλητές, οι οποίες καθορίζουν τις αλλαγές στο σύστημα, όπως η μετατόπιση και η θερμοκρασία.
- Ο άγνωστος παράγοντας, δηλαδή μεταβλητές του συστήματος που γίνονται γνωστές μετά τον ορισμό των οριακών συνθηκών και την επίλυση του συστήματος, όπως μετατοπίσεις, τάσεις και θερμοκρασίες [89].

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 1.56 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων [89].

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται τόσο τρισδιάστατα, όσο και διδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα σε ό,τι αφορά τα διδιάστατα μοντέλα, ο Marco A. P. Rosas κ.ά. [82] μελέτησαν τη σχέση μεταξύ πίεσης κατάρρευσης και της αντιδιαμετρικά αντίθετης ακτινικής δύναμης συμπίεσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ακτινική δύναμη είναι τετραγωνική συνάρτηση της πίεσης κατάρρευσης, ενώ οι Adilson C. Benjamin και Divino J. S. Cunha [83] πρότειναν μια νέα βελτιστοποιημένη μέθοδο, η οποία αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου του προτύπου DNV. Επίσης, οι F. Guarracino και M. Fraldi χρησιμοποιώντας μια σειρά από πειραματικά δεδομένα και μοντέλα προσομοίωσης έχουν δημιουργήσει μια αναλυτική έκφραση για την πίεση κατάρρευσης [12].

Όσον αφορά τα τρισδιάστατα μοντέλα ο Bjørn Fallqvist [56] πραγματοποίησε μελέτη για το πως επηρεάζεται η πίεση κατάρρευσης από το λόγο D/t , τις τοπικές μεταβολές του πάχους και την εκκεντρότητα, αλλά και από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού και την παρουσία παραμενουσών τάσεων. Επιπλέον, ο Jean Gilbert Louis [11] εξέτασε τις αντίστοιχες παραμέτρους, αλλά σε επικαλυμμένους αγωγούς με σκοπό την αποφυγή διαβρώσεων. Επίσης, ο Ajit Bastola κ.ά. [90] παρατήρησαν ότι το πρότυπο DNV υπολογίζει συντηρητικές τιμές για σωλήνες με μικρότερους λόγους D/t σε σχέση με τις τιμές της προσομοίωσής τους, γι' αυτό και υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του πάχους στην οριακή κατάσταση της κατάρρευσης για αγωγούς με μικρούς λόγους D/t .

Θερμική γήρανση

Η ψυχρή διαμόρφωση που λαμβάνει χώρα κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης του σωλήνα UOE ή JCOE και συγκεκριμένα το στάδιο της μηχανικής διαστολής οδηγεί σε μείωση του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση, εξαιτίας του φαινομένου Bauschinger, το οποίο ενισχύει τη μείωση του ορίου διαρροής, όποτε υπάρχει αντίστροφη επιβολή φορτίου μετά από μια πλαστική παραμόρφωση [4], [41]. Ωστόσο, η διαδικασία της επικάλυψης που ακολουθεί έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση, λόγω της θερμικής γήρανσης που επιβάλλεται για να εφαρμοστεί η επικάλυψη, με άμεση συνέπεια την αύξηση της πίεσης κατάρρευσης. Η

μεγαλύτερη αύξηση του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση παρατηρείται συνήθως περιμετρικά του σωλήνα (hoop strength) [4], [64] ενώ σχετικά με τις άλλες δύο διευθύνσεις στον εγκάρσιο άξονα η αύξηση του ορίου διαρροής είναι εμφανέστερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο διαμήκη άξονα [84]. Σύμφωνα με τον A.M. Al-Sharif κ.ά [15], δεν έχει σημασία η πρακτική θέρμανσης, δηλαδή επαγωγική ή αγωγιμότητας καθιστώντας τη θερμική γήρανση οικονομικά επιτεύξιμη στη γραμμή παραγωγής των σωλήνων. Ωστόσο στη γραμμή παραγωγής της επικάλυψης των σωλήνων χρησιμοποιούνται συνήθως δύο συνεχόμενα μεγάλα επαγωγικά πηνία για τη θερμική γήρανση [67], [68], αλλά στο πλαίσιο έρευνας του φαινομένου χρησιμοποιούνται φούρνοι αλάτων [6] και απλοί φούρνοι αγωγιμότητας [15].

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΩΛΗΝΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο πρώτο μέρος της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δοκίμια που χορηγήθηκαν από την εταιρεία «Σωληνουργία Κορίνθου Α.Ε.». Τα εν λόγω δοκίμια προέρχονται από έναν σωλήνα κατηγορίας χάλυβα X70 που παράγεται στη μονάδα LSAW, με τα στοιχεία του να παρατίθενται στον **Πίνακα 3.1** που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1 Διαστάσεις και χημική ανάλυση του σωλήνα από τον οποίο παραλήφθηκαν τα δοκίμια.

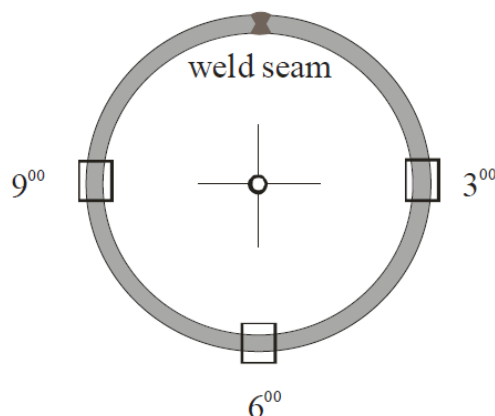
| Διαστάσεις | | |
|-----------------------------|----------|-------|
| Εξωτερική Διάμετρος (D) | 457.2 mm | |
| Πάχος (t) | 31.75 mm | |
| Οβαλότητα (f _o) | Άκρων | 0.44% |
| | Σώματος | 0.48% |

| Χημική σύσταση | | | | | | | | | |
|----------------|--------|----------|--------|--------|-------------------|------------------|---------|-------------|--------|
| C% | Mn% | P% | Nb% | Si% | Cr% | Ni% | Mo% | Cu% | Ti% |
| 0.034 | 1.683 | 0.00615 | 0.037 | 0.272 | 0.1625 | 0.016 | 0.1095 | 0.0145 | 0.0109 |
| V% | Al% | Ca% | N% | B% | P _{CM} % | I _W % | Nb+V+Ti | Cr+Mo+Ni+Cu | Al/N |
| 0.002 | 0.0314 | 0.001575 | 0.0053 | 0.0001 | 0.1435 | 0.3705 | 0.0499 | 0.3025 | 5.9 |

3.1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Η δοκιμή της συμπίεσης πραγματοποιήθηκε σε 24 δοκίμια, δηλαδή σε 2 από κάθε μία από τις 12 θέσεις περιμετρικά του σωλήνα στο διαμήκη άξονα (longitudinal), τα οποία έχουν ληφθεί από το σωλήνα μετά το στάδιο της μηχανικής διαστολής και πριν τη διαδικασία της επικάλυψης. Ως προς την ονοματολογία των δοκιμίων ανάλογα με τη θέση του σωλήνα από την οποία προέρχονται έχουν ονόματα από 1 έως 12 και i ή ii, για τα δοκίμια που προέρχονται από την ίδια θέση περιμετρικά του σωλήνα (**Εικόνα 3.1**). Η δοκιμή συμπίεσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E9, με τα δοκίμια να έχουν κυλινδρική μορφή, όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 3.2**, ενώ σε ό,τι αφορά τις διαστάσεις τους, έχουν πάχος 20 mm και ύψος 30 mm, με τις όποιες αποκλίσεις να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων σύμφωνα με το πρότυπο [76].



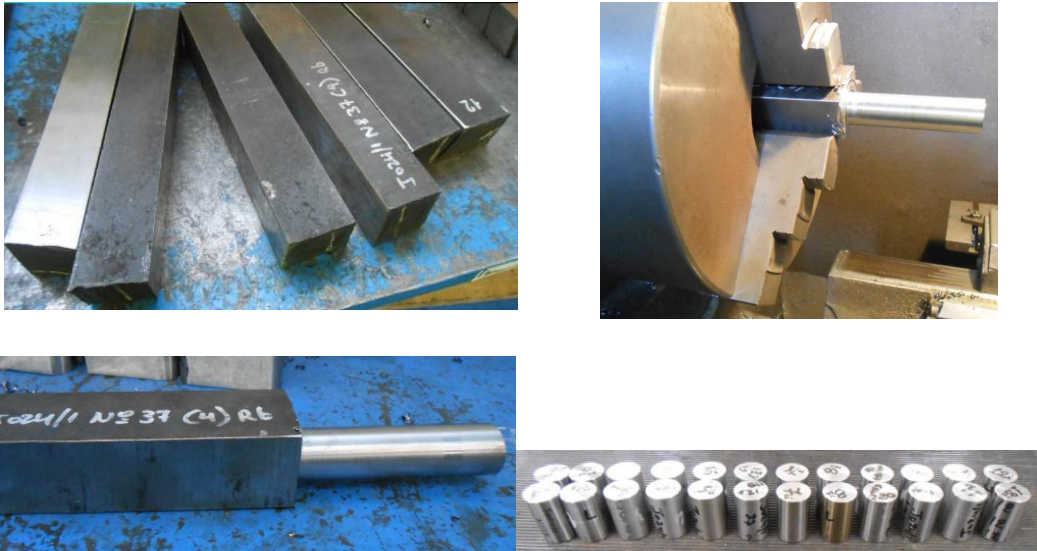
Εικόνα 3.1 Θέσεις του σωλήνα από τις οποίες προέρχονται τα δείγματα (η θέση 1 και η θέση 12 βρίσκονται λίγο πιο δίπλα από τη ραφή της συγκόλλησης) [10].



Εικόνα 3.2 Δοκίμια συμπίεσης κυλινδρικής μορφής σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E9.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Όσον αφορά την προετοιμασία των συγκεκριμένων δοκιμών, αρχικά παραλήφθηκαν μεγάλα κομμάτια της περιφέρειας του σωλήνα, τα οποία εισήχθησαν στον τόρνο και για καθένα από αυτά προέκυψε κυλινδρικό δοκίμιο, που στη συνέχεια κόπηκε σε δύο μικρότερα, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.3**.



Εικόνα 3.3 Διαδικασία κοπής δοκιμών συμπίεσης.

Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή συμπίεσης είναι το σερβουδραυλικό INSTRON 8802, χωρίς τη χρήση επιμηκυνσιομέτρου (**Εικόνα 3.4**), με τη δοκιμή να πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου και ταχύτητα 0.25 mm/min, όπου το δοκίμιο συμπιέζεται μεταξύ δύο πλάκων μέχρι να φθάσει σε παραμόρφωση 5%.



Εικόνα 3.4 Σερβουδραυλικό μηχάνημα INSTRON 8802, Αριστερά: γενική άποψη, Δεξιά: εστίαση στις πλάκες σύνθλιψης.

Από τα 24 δοκίμια συμπίεσης τα 16 απλώς συμπιέστηκαν, ενώ τα υπόλοιπα οκτώ θερμάνθηκαν σε φούρνο (**Εικόνα 3.5**) πριν συμπιεστούν, σε θερμοκρασίες 250 και 280°C για 1 h με ακόλουθη απόψυξη στον αέρα, προκειμένου να παρατηρηθεί η

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

επίδραση της θερμικής γήρανσης στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Οι συνθήκες θερμικής γήρανσης επιλέχθηκαν βάσει των ερευνών [15], [95]. Στον **Πίνακα 3.2** που ακολουθεί αναφέρονται συγκεκριμένα ποια δοκίμια υπεβλήθησαν σε θερμική γήρανση και υπό ποιες συνθήκες.

Πίνακας 3.2 Συνθήκες θερμικής γήρανσης των δοκιμίων που θερμάνθηκαν πριν συμπιεστούν.

| Δοκίμιο | Συνθήκες θερμικής γήρανσης |
|--------------------|----------------------------|
| 7ii,10ii,11ii,12ii | 250°C,1h |
| 4ii,5ii,8ii,9ii | 280°C,1h |



Εικόνα 3.5 Φούρνος που χρησιμοποιήθηκε για τη γήρανση των δοκιμίων συμπίεσης.

ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε 12 δοκίμια τύπου «roundbar» (**Εικόνα 3.6**), τα οποία προέρχονται από δώδεκα θέσεις περιμετρικά του σωλήνα στο διαμήκη άξονα (longitudinal), σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6892 και έχουν ληφθεί από το σωλήνα μετά το στάδιο της μηχανικής διαστολής και πριν τη διαδικασία της επικάλυψης [77]. Το πάχος των δοκιμίων (εκτός των δύο σπειρωμάτων) είναι 6 mm, και το μήκος (μεταξύ των σπειρωμάτων) είναι 50 mm. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε και πάλι στο σερβουδραυλικό μηχάνημα INSTRON 8802, μόνο που αντί για τις πλάκες σύνθλιψης χρησιμοποιήθηκαν οι αρπάγες που φαίνονται στην **Εικόνα 3.7**, προκειμένου να συγκρατούν τα δύο σπειρώματα του δοκιμίου, ενώ αυτή τη φορά έγινε χρήση και επιμηκυσιομέτρου. Όσον αφορά τις συνθήκες της δοκιμής, η θερμοκρασία

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

ήταν 21°C και η υγρασία 53%, ενώ η ταχύτητα κατά τον εφελκυσμό ορίστηκε ως 1 mm/min.



Εικόνα 3.6 Δοκίμιο εφελκυσμού τύπου «groundbar».



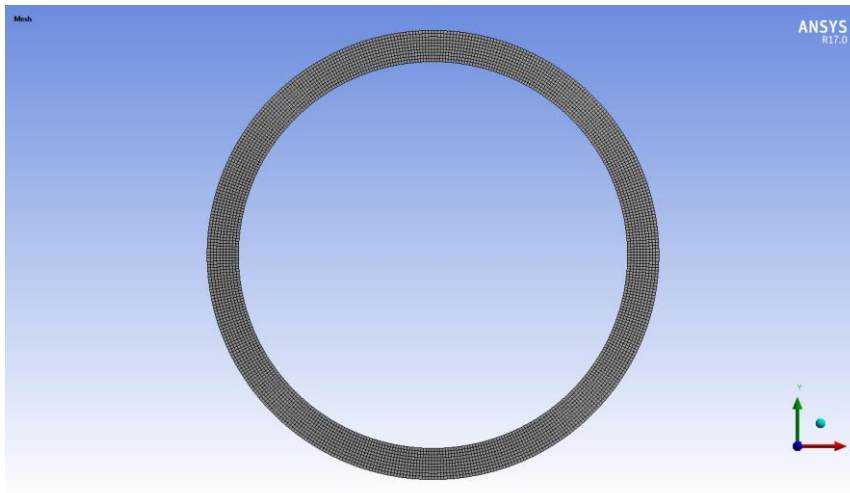
Εικόνα 3.7 Αρπάγες εφελκυσμού με εγκατεστημένο το επιμηκυσιόμετρο.

3.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ

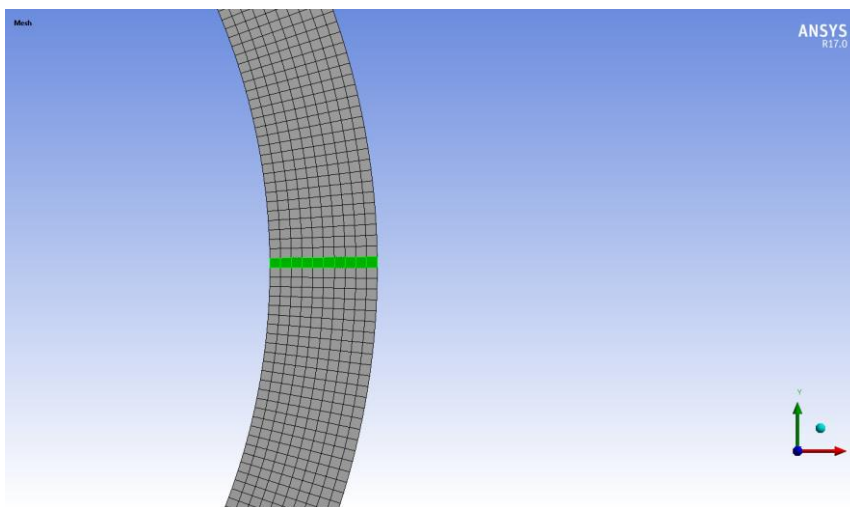
Στο δεύτερο μέρος της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method-FEM) και συγκεκριμένα το ANSYS Workbench 17.0, προκειμένου να προσδιοριστεί η κρίσιμη τιμή πίεσης στην οποία θα καταρρεύσει ο αγωγός υπό την επιβολή της υδροστατικής πίεσης. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία σχεδιασμού του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εξάγεται το αποτέλεσμα, δηλαδή η κρίσιμη τιμή πίεσης.

3.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα διδιάστατο (2D) δακτυλίδι αγωγού (pipe ring), όπως αυτό της **Εικόνας 3.8**, ενώ όσον αφορά τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν (meshing) ήταν κατά μέσο 14500 στοιχεία (elements), διότι ανάλογα με το πάχος του δακτυλιδιού ο αριθμός των στοιχείων μεταβάλλεται. Στην **Εικόνα 3.9** διακρίνεται το δακτυλίδι του αγωγού, το οποίο σε όλα τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν αποτελείται από 10 στρώματα στοιχείων κατά το πάχος, με το μέγεθος του κάθε στοιχείου να είναι 3mm.



Εικόνα 3.8 Διδιάστατο μοντέλο δακτυλιδιού σωλήνα



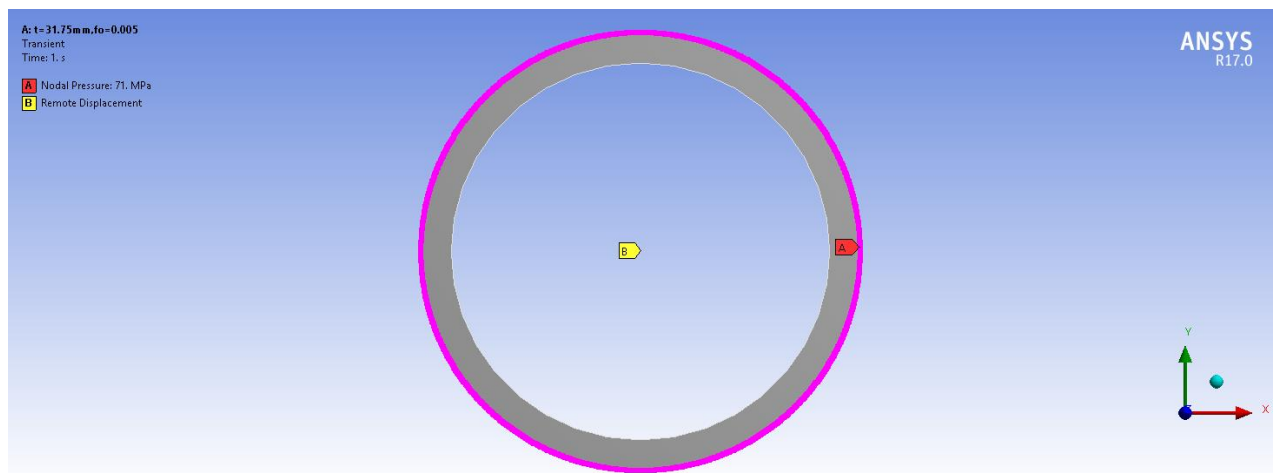
Εικόνα 3.9 Τα δέκα στρώματα στοιχείων με μέγεθος στοιχείου 3mm.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό των δακτυλιδιών των διαφόρων αγωγών, ανάλογα με την περίπτωση που εξεταζόταν έπρεπε να οριστεί κάθε φορά η οβαλότητα που έχει το κάθε δακτυλίδι, γι αυτό και χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας από το Excel με τις απαραίτητες διαστάσεις, ο οποίος παρατίθεται στο **Παράρτημα**.

3.2.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (BOUNDARY CONDITIONS)

Προκειμένου να επιλυθεί το μοντέλο του δακτυλιδιού θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Έτσι, λοιπόν εφαρμόστηκε πίεση (nodal pressure) στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, ενώ για να επιτευχθεί η παραμόρφωση του δακτυλιδιού και να αποφευχθεί η μετατόπισή του στο χώρο, τα nodes της εξωτερικής περιμέτρου δεσμεύονται, έτσι ώστε να έχουν μηδενική μετατόπιση ($remote\ displacement=0 \rightarrow$ μετατόπιση στους άξονες $x, y=0\text{ mm}$ και περιστροφή στον άξονα $z=0^\circ$). Στην **Εικόνα 3.10** που ακολουθεί διακρίνονται οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν.



Εικόνα 3.10 Οριακές συνθήκες μοντέλου.

Η επίλυση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε με δύο λειτουργίες-οριακές συνθήκες που αφορούν στη διδιάστατη συμπεριφορά του υλικού. Η μια είναι «*παραμόρφωση επιπέδου-plane strain*» και η άλλη «*τάση επιπέδου-plane stress*». Στην πρώτη περίπτωση, πρόκειται για μια κατάσταση παραμόρφωσης στην οποία υποτίθεται ότι η παραμόρφωση στον άξονα z είναι μηδενική. Στη δεύτερη περίπτωση, πρόκειται για μια κατάσταση παραμόρφωσης στην οποία η τάση στον άξονα z θεωρείται μηδενική, αλλά η παραμόρφωση σε αυτό το άξονα λαμβάνεται ως μη

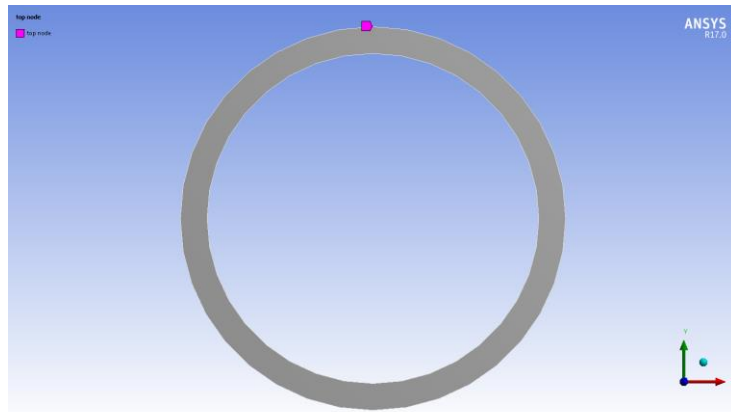
μηδενική. Δηλαδή, η περίπτωση της παραμόρφωσης επιπέδου εφαρμόζεται σε κατασκευές που έχουν μεγάλο μήκος στον άξονα z με σταθερή διατομή, όπου τα φορτία που ασκούνται επιδρούν μόνο στους άξονες x και y και δε μεταβάλλονται στον z. Αντιθέτως, η περίπτωση της τάσης επιπέδου εφαρμόζεται σε κατασκευές που είναι λεπτές, δηλαδή η διάσταση στον z είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις διαστάσεις στον x και y [61], [81].

3.2.3 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (ANALYSIS SETTINGS)

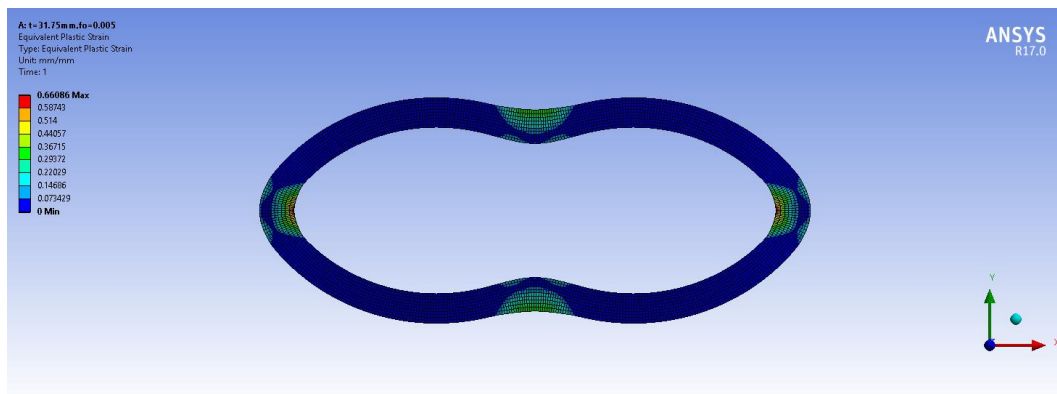
Επειδή το φαινόμενο της κατάρρευσης του αγωγού ή του δακτυλιδιού του αγωγού είναι ιδιαίτερος απότομο και μια μικρή αύξηση στην τιμή της πίεσης ενδέχεται να επιφέρει πλαστική παραμόρφωση και την τελική κατάρρευση, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ανάλυση του ANSYS για μεταβατικά φαινόμενα (*transient structural analysis*), μέσω της οποίας καθορίζεται η απόκριση μιας κατασκευής σε δυναμικά φαινόμενα [13]. Επιπλέον, επειδή το φαινόμενο που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι φαινόμενο λυγισμού (*buckling*) είναι απαραίτητο να γίνει ενεργοποίηση της επιλογής «*Large Deflection*», διότι στο δακτυλίδι προκαλούνται μεγάλες παραμορφώσεις, οι οποίες οδηγούν σε μεταβολή της ακαμψίας του [61], [85]. Το γεγονός ότι το φαινόμενο είναι μη γραμμικό, διότι το υλικό του σωλήνα από την ελαστική περιοχή στην οποία συμπεριφέρεται γραμμικά, όπως μαρτυράται και από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μεταβαίνει στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, όπου παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά. Γι' αυτό το λόγο, λοιπόν, σε μη γραμμικά προτείνεται η χρήση της επιλογής «*Full Newton-Raphson*», όπου η ακαμψία του δακτυλιδιού ανανεώνεται σε κάθε βήμα. Τέλος, καθίσταται αναγκαίο η επιβολή της πίεσης να γίνεται σταδιακά, διότι όπως έχει προαναφερθεί μια μικρή μεταβολή της πίεσης μπορεί να είναι καθοριστική για την ακεραιότητα του δακτυλιδιού, γι' αυτό και η εφαρμογή της πίεσης έγινε μεν σε ένα βήμα (*load step*), αλλά με την επιλογή «*Auto Time Stepping*» δόθηκε η ελευθερία στο πρόγραμμα να επιβάλλει την πίεση σε έως και 10^6 μικρότερα βήματα (*Substeps*) σε περίπτωση που υπάρχει δυσκολία στην επίλυση (*non-convergence*) [61], [85].

3.2.4 ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για να προσδιοριστεί η τιμή της πίεσης κατάρρευσης επιλέχθηκε ένα node που ανήκει στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.11** και στη συνέχεια από την επίλυση προέκυψε ένα διάγραμμα που συσχετίζει την τιμή της πίεσης που επιβάλλεται σε αυτό το node, με τη μετατόπισή του στον άξονα x και στο άξονα y. Το **Διάγραμμα 3.1** είναι αυτό που εξάγει το ANSYS κατά την επίλυση, ενώ το **Διάγραμμα 3.2** είναι ουσιαστικά το ίδιο με το προηγούμενο, αλλά με μεγαλύτερη εστίαση, προκειμένου να γίνει καλύτερα αντιληπτή η κρίσιμη τιμή στην οποία καταρρέει το δακτυλίδι του αγωγού.

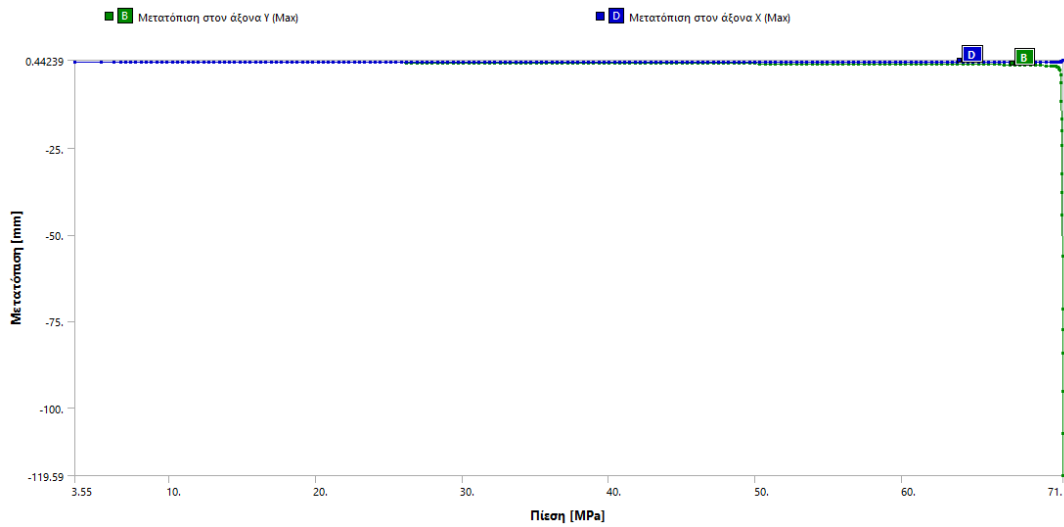


Εικόνα 3.11 Node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού για τον προσδιορισμό της πίεσης κατάρρευσης.

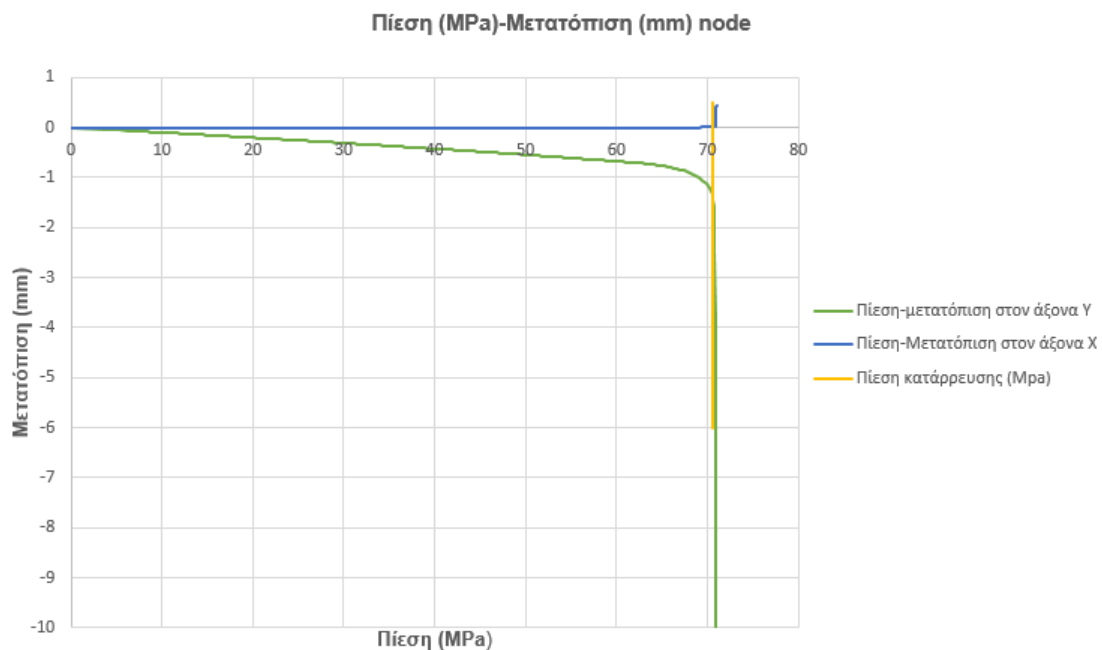


Εικόνα 3.12 Ζώνες πλαστικής παραμόρφωσης σε μοντέλο δακτυλιδιού αγωγού.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 3.1 Η Μετατόπιση σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, όπως αυτό προκύπτει από το ANSYS.

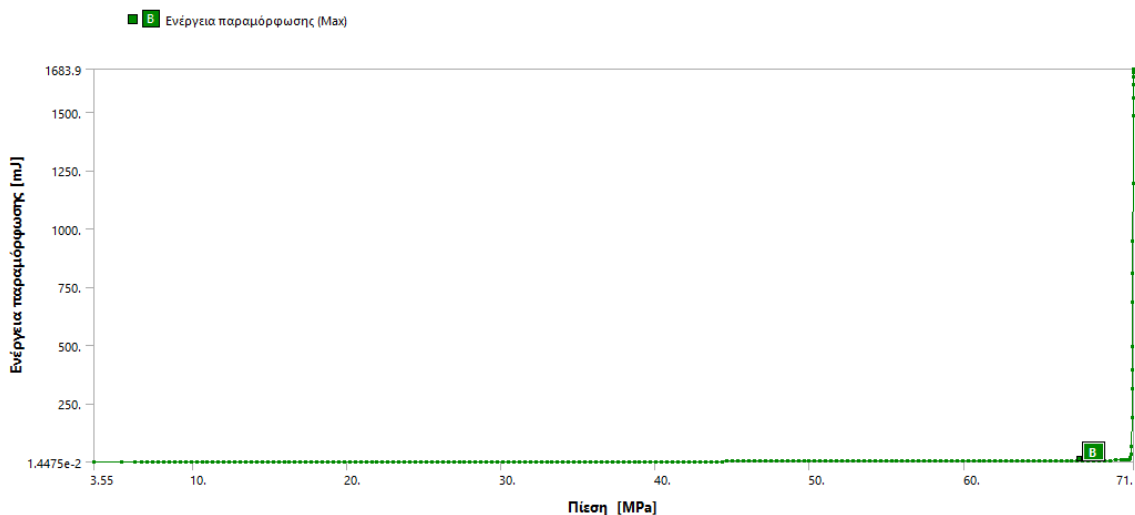


Διάγραμμα 3.2 Η Μετατόπιση σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού, με μεγαλύτερη εστίαση.

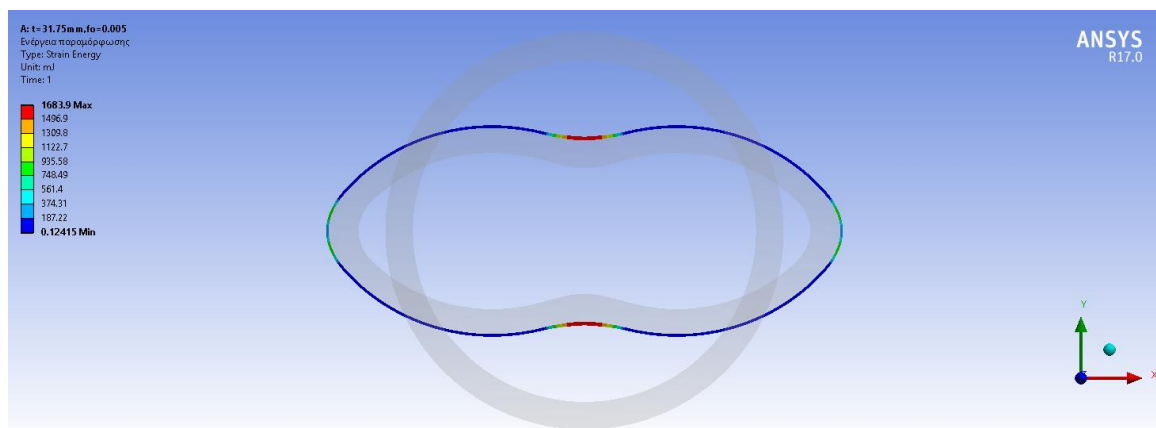
Και στα δύο διαγράμματα, λοιπόν, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η μετατόπιση του node και στον άξονα x και στον άξονα y αυξάνεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με τη μετατόπισή του μέχρι εκείνο το σημείο.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Η τιμή της πίεσης σε αυτό το σημείο είναι η κρίσιμη τιμή της πίεσης κατάρρευσης [7]. Ένας ακόμη τρόπος προκειμένου να επιβεβαιωθεί το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι να παρατηρηθεί η τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Στη συνέχεια, λοιπόν, ακολουθεί το **Διάγραμμα 3.3**, στο οποίο διακρίνεται η ενέργεια παραμόρφωσης στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού σε συνάρτηση με την πίεση, όπου είναι και πάλι εύκολα αντιληπτό το σημείο στο οποίο επέρχεται η κρίσιμη τιμή πίεσης και η ενέργεια παραμόρφωσης αυξάνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό.



Διάγραμμα 3.3 Η Ενέργεια Παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την Πίεση για το node στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού.



Εικόνα 3.13 Ενέργεια παραμόρφωσης (mJ) στην εξωτερική περίμετρο του δακτυλιδιού που έχει καταρρεύσει, με το μη παραμορφωμένο δακτυλίδι να φαίνεται από πίσω.

3.2.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ

Η πίεση κατάρρευσης του αγωγού, όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό επηρεάζεται από ένα πλήθος παραμέτρων, οι οποίες και εξετάστηκαν μέσω του μοντέλου προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά μελετήθηκε η πίεση κατάρρευσης δακτυλιδιών με διαφορετικό λόγο D/t και με διαφορετική οβαλότητα (f_0) και στη συνέχεια οι τιμές που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV-OS-F101. Οι λόγοι D/t που εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης αφορούν σωλήνες από την παραγωγή LSAW της «Σωληνουργείας Κορίνθου Α.Ε.». Πιο συγκεκριμένα οι λόγοι D/t που μελετήθηκαν είναι 14.4, 16, 18, 20.57, 24 και 28.79 με την εξωτερική διάμετρο D να είναι ίση με 457.2 mm σε όλες τις περιπτώσεις και το πάχος t να μεταβάλλεται ($t=31.75, 28.58, 25.4, 22.23, 19.05$ και 15.88 mm αντίστοιχα). Η αναλυτική λύση της εξίσωσης του προτύπου πραγματοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python, ενώ ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο **Παράρτημα**. Στην αναλυτική λύση της εξίσωσης το όριο ελαστικότητας ορίστηκε ως $E=210000$ MPa, το $\nu=0.3$, το $f_y=485$ MPa (σωλήνας X70) και $\alpha_{fab}=1$. Ο συντελεστής διαμόρφωσης α_{fab} ορίστηκε ίσος με 1, διότι σκοπός της επίλυσης της εξίσωσης είναι η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων στην πίεση κατάρρευσης και όχι της διαδικασίας διαμόρφωσης.

Γενικά, μέσω του μοντέλου προσομοίωσης μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις δακτυλιδιών αγωγών με σκοπό να προσδιοριστεί η επίδραση των εξής παραμέτρων:

- Του λόγου D/t
- Της οβαλότητας (f_0)
- Της εκκεντρότητας (e_c)
- Του συντελεστή εργοσκλήρυνσης (H-Hardening Modulus)
- Του τύπου του σωλήνα (grade-X70, X80, X100)

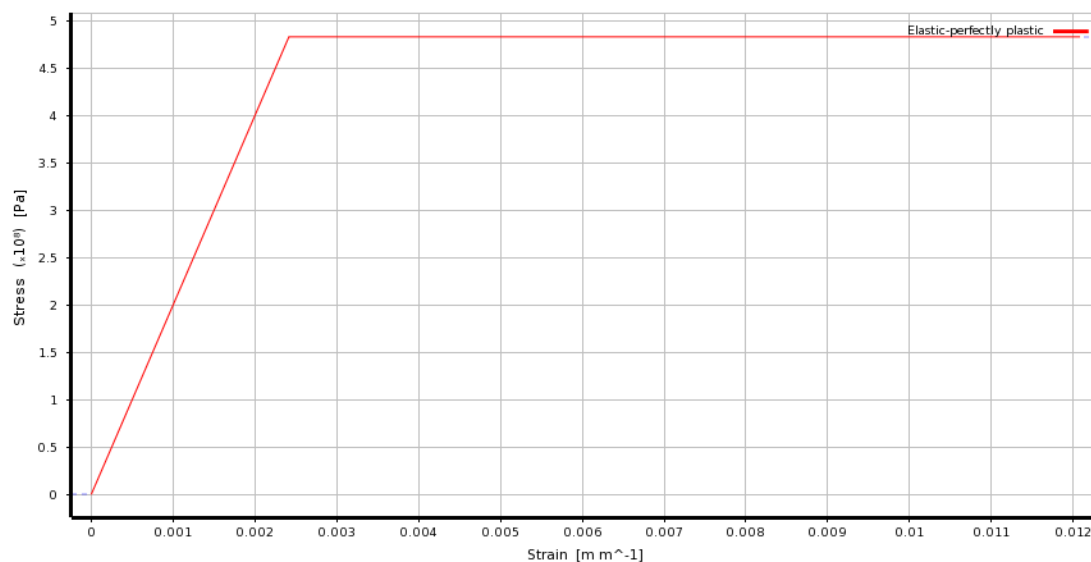
3.2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Το υλικό που επιλέχθηκε στο ANSYS έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Πυκνότητα $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$
- Όριο Ελαστικότητας (Young's Modulus) $E=210000 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson $\nu=0.3$

Σε ό,τι αφορά τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα προσομοίωσης, αυτές ήταν δύο ειδών:

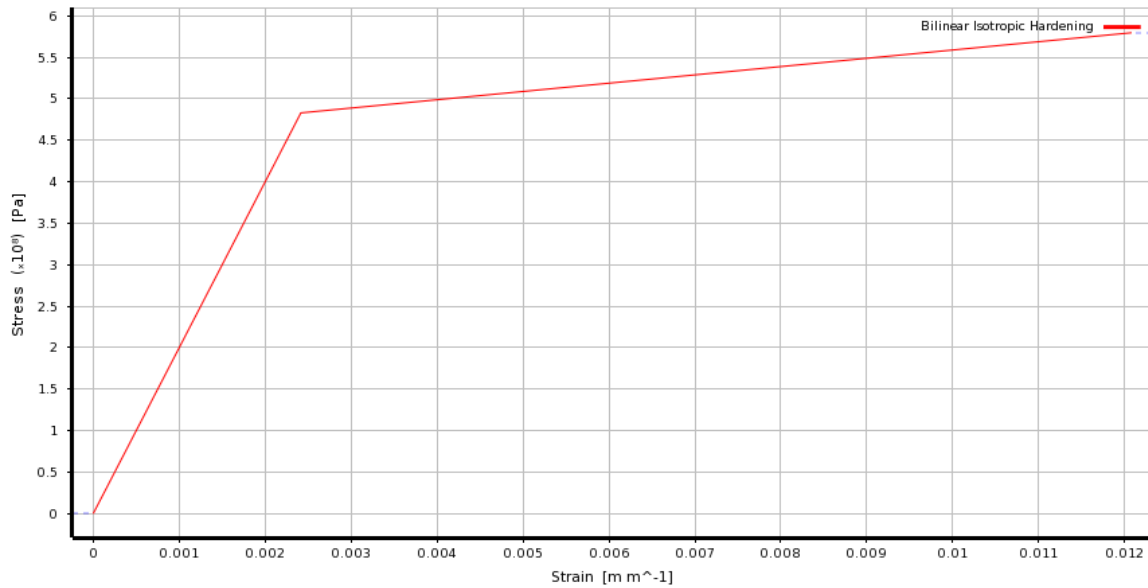
- Ελαστικό-Πλήρως Πλαστικό Υλικό (Elastic-Perfectly Plastic)



Διάγραμμα 3.4 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ελαστικού-πλήρως πλαστικού υλικού, όπως εισάγεται στο ANSYS.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

- Υλικό που υφίσταται εργοσκλήρυνση (Bilinear Isotropic Hardening)



Διάγραμμα 3.5 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υλικού που υφίσταται εργοσκλήρυνση, όπως εισάγεται στο ANSYS.

3.2.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (FEM VERIFICATION)

Προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα του μοντέλου έγινε σύγκριση των τιμών που προκύπτουν από μοντέλα προσομοίωσης σε άλλα επιστημονικά άρθρα, με τις τιμές που προκύπτουν να παρατίθενται στον ακόλουθο **Πίνακα 3.3**.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας 3.3 Σύγκριση τιμών πίεσης κατάρρευσης που προκύπτουν από επιστημονικά άρθρα με αυτές που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV και με αυτές που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

| Επιστημονικό άρθρο | D (mm) | t (mm) | D/t | f ₀ (%) | FEM Άρθρου (MPa) | DNV (MPa) | FEM Εργασίας (MPa) |
|----------------------------|-----------|-----------|-------|--------------------|------------------------|--------------|--------------------------|
| 1. OMAE2014- 24081 [69] | | | | | | | |
| EP-15 | 219.08 | 14.27 | 15.35 | 1 | 48.5 | 51.28 | 48.48 |
| EP-19 | 219.08 | 11.13 | 19.68 | 1 | 32 | 35.45 | 32.01 |
| 2. OMAE2012- 83833 [70] | | | | | | | |
| LT25 | 457 | 18.3 | 25 | 0.5 | 24.55 | 23.95 | 24.67 |
| LT30 | 457 | 15.2 | 30.1 | 2 | 11.56 | 11.65 | 11.66 |

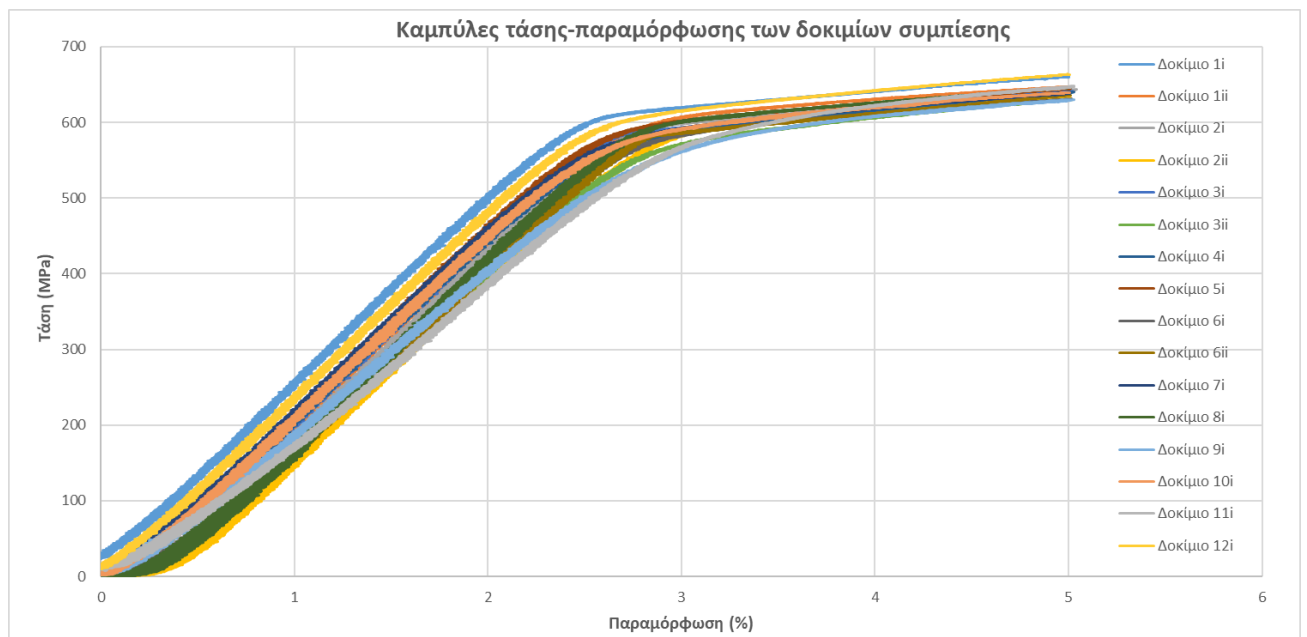
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

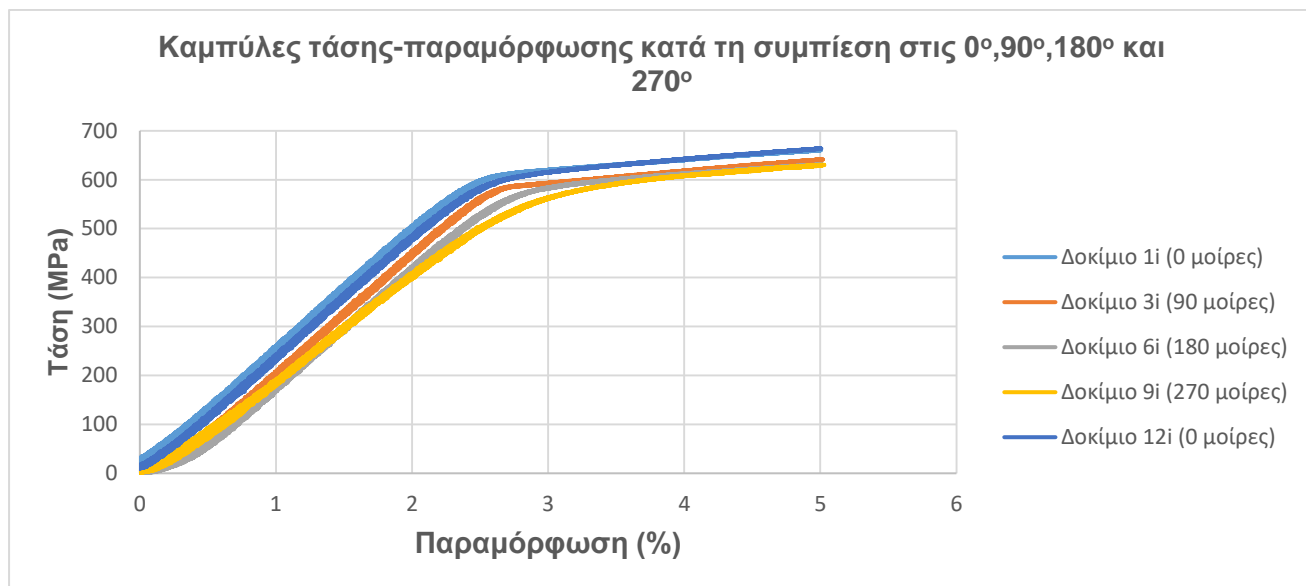
4.1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν από τη δοκιμή της συμπίεσης στο διαμήκη άξονα για τα 16 δοκίμια που απλώς συμπίεστηκαν παρατίθενται στο **Διάγραμμα 4.1**, ενώ μετά ακολουθεί το **Διάγραμμα 4.2**, στο οποίο παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης στις θέσεις 1, 3, 6, 9 και 12 του σωλήνα. Πρέπει να επισημανθεί ότι παρόλο που στον **Πίνακα 4.1** έχουν καταγραφεί οι τιμές της αντοχής σε παραμόρφωση 5%, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του λόγου Y/C (όριο διαρροής/μέγιστη αντοχή κατά τη συμπίεση), διότι θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί η μέγιστη αντοχή ως παρονομαστής.



Διάγραμμα 4.1 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα 16 δοκίμια που υπέστησαν απλή συμπίεση.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 4.2 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια που βρίσκονται στις θέσεις 1, 3,6 και 9.

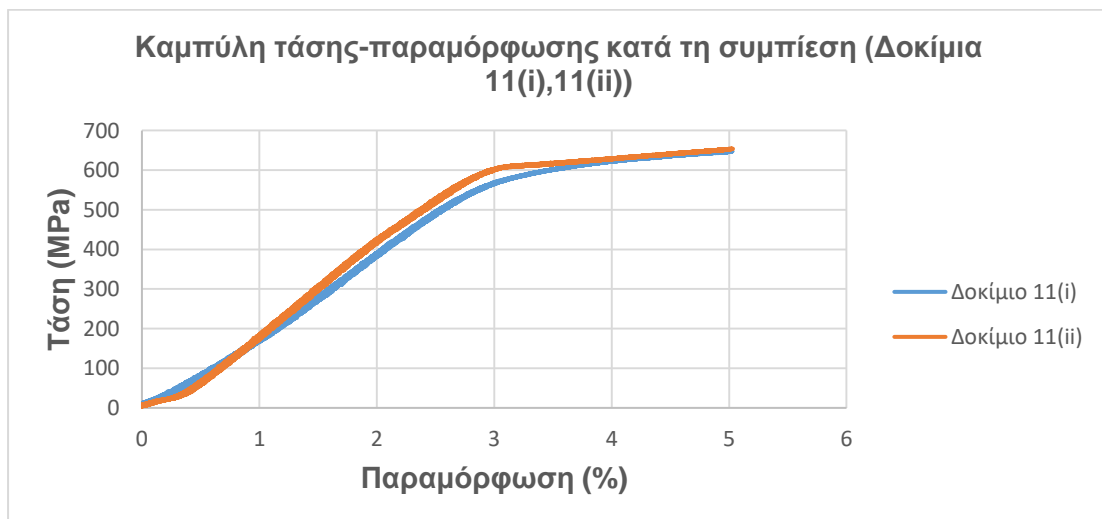
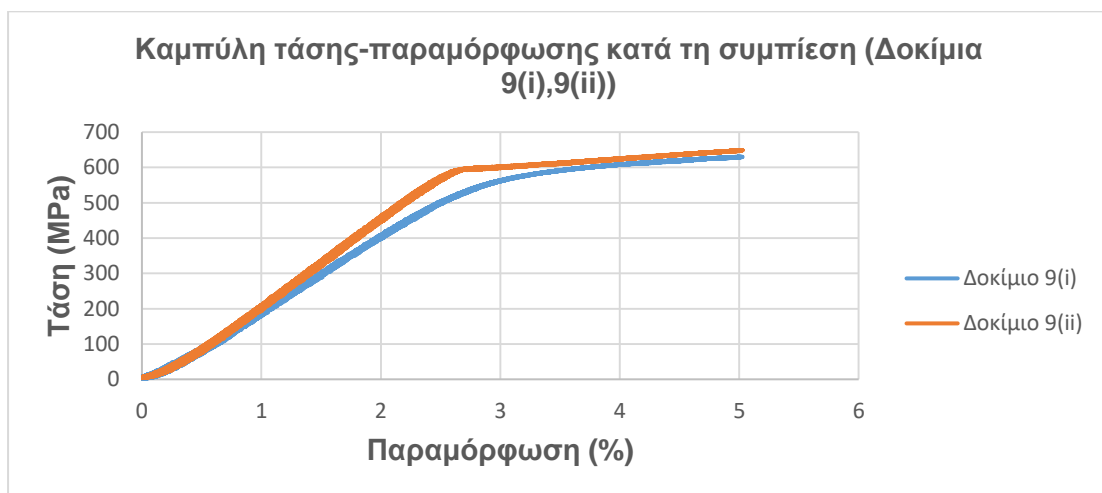
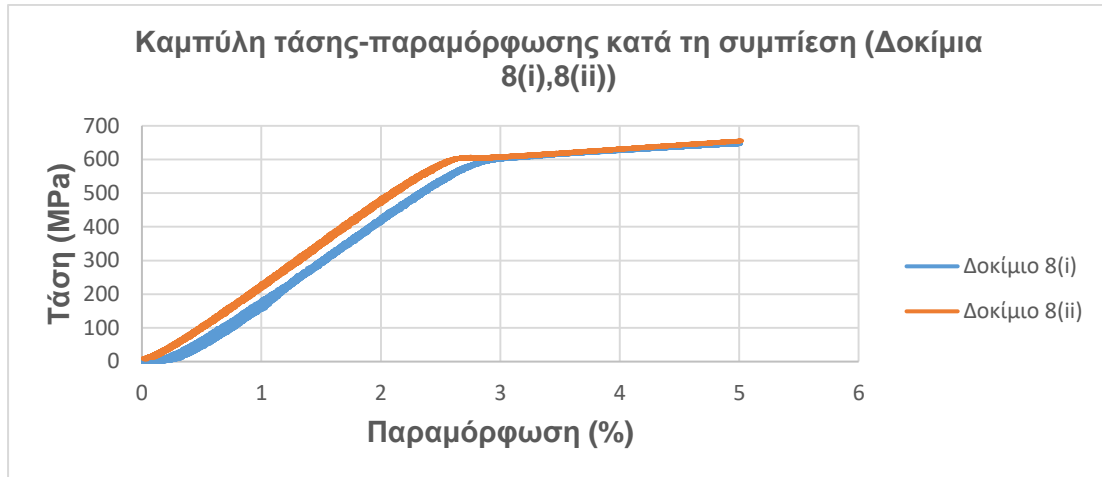
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας 4.1 Τιμές ορίου διαρροής και αντοχής σε παραμόρφωση 5% για τα 16 δοκίμια που συμπίεστηκαν.

| Δοκίμιο | $R_{p0.2\%}$ (Mpa) | Αντοχή σε παραμόρφωση 5% (Mpa) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1i | 605 | 660 |
| 1ii | 591 | 647 |
| 2i | 592 | 644 |
| 2ii | 577 | 632 |
| 3i | 588 | 641 |
| 3ii | 559 | 630 |
| 4i | 566 | 640 |
| 5i | 586 | 645 |
| 6i | 569 | 631 |
| 6ii | 587 | 636 |
| 7i | 570 | 639 |
| 8i | 595 | 646 |
| 9i | 538 | 630 |
| 10i | 569 | 639 |
| 11i | 572 | 648 |
| 12i | 597 | 664 |
| Μέση τιμή | 578.81 | 642 |

Στη συνέχεια στο **Διάγραμμα 4.3** παρατίθενται κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων που υπέστησαν θερμική γήρανση πριν από τη συμπίεση (πορτοκαλί χρώμα), μαζί με τις καμπύλες των δοκιμίων που έχουν απλώς συμπίεστεί και προέρχονται από την ίδια θέση του σωλήνα (μπλε χρώμα). Και στις τρεις αυτές περιπτώσεις είναι διακριτή η αύξηση του ορίου διαρροής.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 4.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν από τη συμπίεση, με τα αντίστοιχα απλώς συμπιεσμένα δοκίμια στην ίδια θέση του σωλήνα.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Στο σημείο αυτό θα ήταν χρήσιμο να αξιολογηθεί αυτή η αύξηση του ορίου διαρροής, η οποία αποδίδεται στο φαινόμενο της θερμικής γήρανσης. Για το λόγο αυτό στον **Πίνακα 4.2** που ακολουθεί υπολογίζεται η τυπική απόκλιση μεταξύ των τιμών του ορίου διαρροής για τα 16 δοκίμια που έχουν απλώς συμπιεστεί.

Πίνακας 4.2 Τιμές ορίου διαρροής των 16 δοκιμών που έχουν υποστεί απλή συμπίεση, με την τυπική απόκλιση μεταξύ των τιμών να αναγράφεται στο τέλος του πίνακα.

| Δοκίμιο | $R_{p0.2\%}$ | $(R_{p0.2\%}-\text{Μέση τιμή})^2$ |
|-----------|--------------|-----------------------------------|
| 1i | 605 | 685.79 |
| 1ii | 591 | 148.54 |
| 2i | 592 | 173.91 |
| 2ii | 577 | 3.29 |
| 3i | 588 | 84.41 |
| 3ii | 559 | 392.54 |
| 4i | 566 | 164.16 |
| 5i | 586 | 51.66 |
| 6i | 569 | 96.29 |
| 6ii | 587 | 67.04 |
| 7i | 570 | 77.66 |
| 8i | 595 | 262.04 |
| 9i | 538 | 1665.66 |
| 10i | 569 | 96.29 |
| 11i | 572 | 46.41 |
| 12i | 597 | 330.79 |
| Μέση τιμή | 578.81 | Τυπική απόκλιση (Mpa) |
| | | 17.02 |

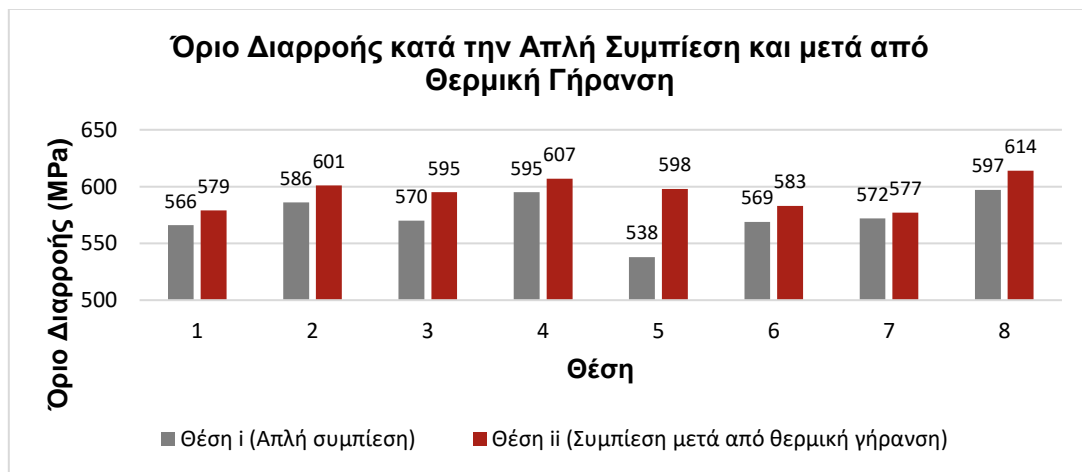
Στον επόμενο **Πίνακα 4.3** υπολογίζεται αντιστοίχως η μέση αύξηση του ορίου διαρροής των δοκιμών που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν συμπιεστούν σε σχέση με το όριο διαρροής των δοκιμών που έχουν απλώς συμπιεστεί .

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας 4.3 Μέση αύξηση του ορίου διαρροής των δοκιμών που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν συμπιεστούν σε σχέση με το όριο διαρροής των δοκιμών που έχουν απλώς συμπιεστεί.

| Θέση | Δοκίμιο i (Απλή συμπίεση) | Δοκίμιο ii (Συμπίεση μετά από θερμική γήρανση) | Αύξηση $R_{p0.2\%}$ (%) | Αύξηση $R_{p0.2\%}$ (MPa) |
|------|---------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|
| 4 | 566 | 579 | 2.30 | 13 |
| 5 | 586 | 601 | 2.56 | 15 |
| 7 | 570 | 595 | 4.39 | 25 |
| 8 | 595 | 607 | 2.02 | 12 |
| 9 | 538 | 598 | 11.15 | 60 |
| 10 | 569 | 583 | 2.46 | 14 |
| 11 | 572 | 577 | 0.87 | 5 |
| 12 | 597 | 614 | 2.85 | 17 |
| | | Μέση αύξηση | 3.57 | 20.13 |

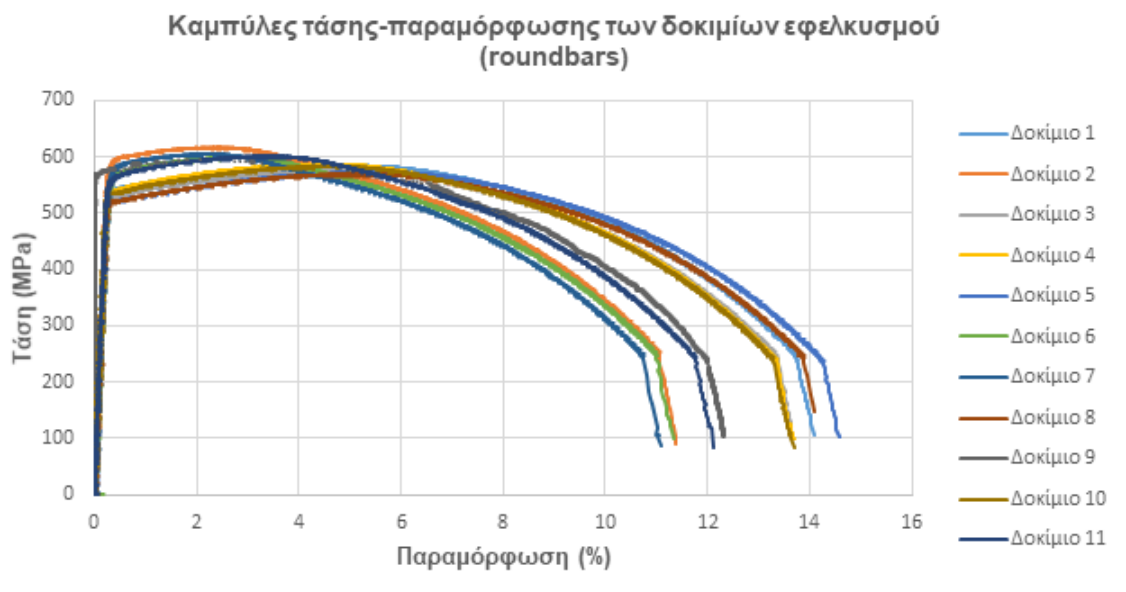
Στο **Διάγραμμα 4.4** που ακολουθεί παρατίθεται μια σχηματική αναπαράσταση της αύξησης του ορίου διαρροής στα θερμικώς γηρασμένα δοκίμια σε σχέση με τα απλώς συμπιεσμένα, που προέρχονται από την ίδια θέση.



Διάγραμμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση του ορίου διαρροής μεταξύ των δοκιμών που έχουν υποστεί θερμική γήρανση πριν από τη συμπίεση και αυτών που έχουν απλώς συμπιεστεί.

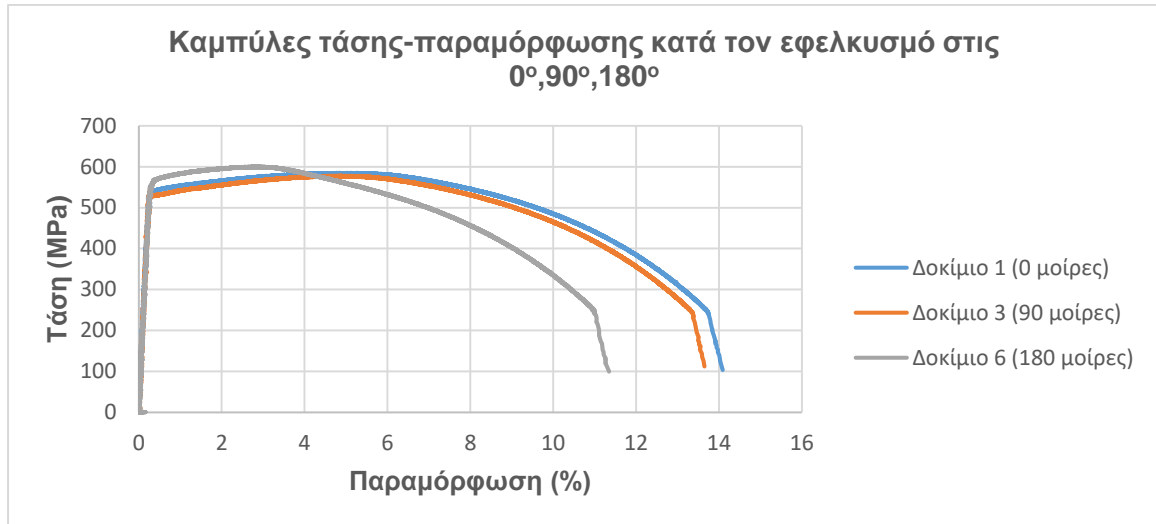
4.1.2 ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Το **Διάγραμμα 4.5** που ακολουθεί αφορά τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια του εφελκυσμού στο διαμήκη άξονα στις 12 θέσεις περιμετρικά του σωλήνα. Όπως στη συμπίεση έτσι και στον εφελκυσμό στο **Διάγραμμα 4.6** εξετάζονται ξεχωριστά οι καμπύλες των δοκιμών από τις θέσεις 1, 3 και 6. Στον **Πίνακα 4.4** που έπεται των διαγραμμάτων καταγράφονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού και για τα 12 δοκίμια. Οι τιμές του Ορίου Ελαστικότητας προέκυψαν από τη μέτρηση της κλίσης της ευθείας της ελαστικής περιοχής. Πρέπει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο 12 έσπασε κατά τη δοκιμή κοντά στο σπείρωμα κι εκτός του μετρήσιμου μήκους των 50 mm λόγω αστοχίας του δοκιμίου, γι' αυτό και παρόλο που προκύπτουν τιμές για το όριο διαρροής τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή και την ομοιόμορφη και τελική επιμήκυνση από το μηχάνημα δεν κρίνονται ικανές αξιολόγησης.



Διάγραμμα 4.5 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμών εφελκυσμού.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 4.6 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό στις θέσεις 1,3 και 6.

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού.

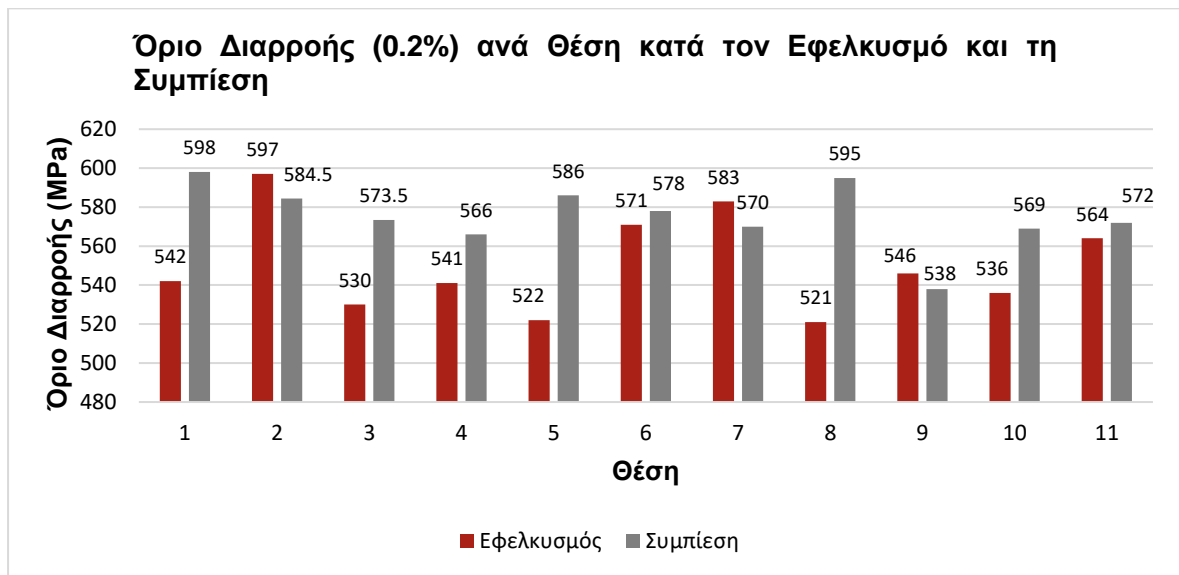
| Δοκίμιο | $R_{p0.2\%}$ | $R_{t0.5\%}$ | R_m | $R_{p0.2\%}/R_m$ | $R_{t0.5\%}/R_m$ | UEL (Ομοιόμορφη επιμήκυνση- Uniform Elongation) | TEL (Ολική επιμήκυνση- Total Elongation) | E(Mpa) |
|-----------|--------------|--------------|--------|------------------|------------------|---|--|-----------|
| 1 | 542 | 544 | 585 | 0.93 | 0.93 | 5.3 | 14 | 207886.6 |
| 2 | 597 | 598 | 617 | 0.97 | 0.97 | 2.4 | 11.4 | 209718.8 |
| 3 | 530 | 531 | 578 | 0.92 | 0.92 | 4.9 | 13.6 | 205762.4 |
| 4 | 541 | 542 | 588 | 0.92 | 0.92 | 4.4 | 17.3 | 214778.9 |
| 5 | 522 | 523 | 574 | 0.91 | 0.91 | 5.2 | 14.5 | 207479.2 |
| 6 | 571 | 572 | 600 | 0.95 | 0.95 | 2.9 | 11.3 | 201130 |
| 7 | 583 | 584 | 606 | 0.96 | 0.96 | 2.2 | 11.1 | 207101 |
| 8 | 521 | 521 | 571 | 0.91 | 0.91 | 5.1 | 14 | 214852.6 |
| 9 | 546 | 547 | 587 | 0.93 | 0.93 | 5 | 13 | 209800 |
| 10 | 536 | 536 | 584 | 0.92 | 0.92 | 4.6 | 13.6 | 212511.1 |
| 11 | 564 | 566 | 602 | 0.94 | 0.94 | 3.6 | 12 | 214888.9 |
| 12 | 613 | - | 633 | - | - | 3.1 | 3.8 | - |
| Μέση τιμή | 550.27 | 551.27 | 590.18 | 0.93 | 0.93 | 4.15 | 13.25 | 209628.13 |

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Σύμφωνα με το πρότυπο DNV για χάλυβα X70 η μέση τιμή των 551.27 MPa για το $R_{10.5\%}$ είναι μέσα στο αποδεκτό εύρος τιμών (485-605 MPa), καθώς και ο λόγος $R_{10.5\%}/R_m$ που έχει τιμή 0.93 ταυτίζεται ακριβώς με τη μέγιστη επιτρεπτή του προτύπου [56].

Όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό και κατά τη συμπίεση

Στο **Διάγραμμα 4.9** που ακολουθεί αποτυπώνεται σχηματικά το όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό και κατά τη συμπίεση. Η θέση 12 δεν περιλαμβάνεται στο διάγραμμα, λόγω της αστοχίας του δοκιμίου 12 κατά τον εφελκυσμό.



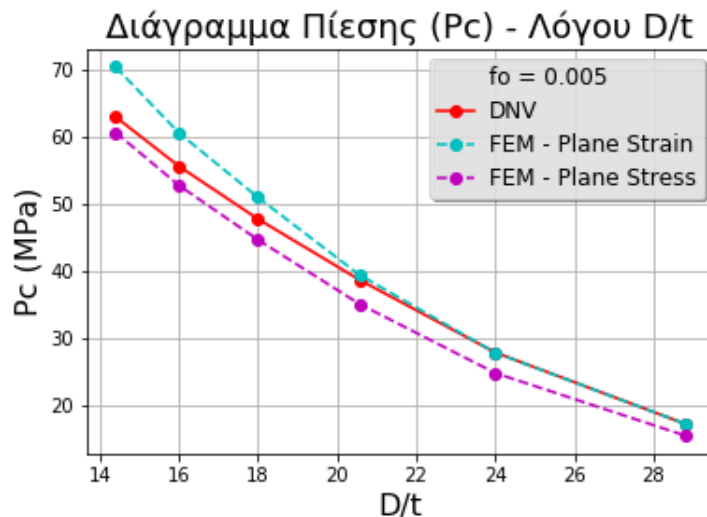
Διάγραμμα 4.7 Σχηματική αναπαράσταση του ορίου διαρροής ανά Θέση κατά τον Εφελκυσμό και τη Συμπίεση.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ-ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ DNV ΜΕ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

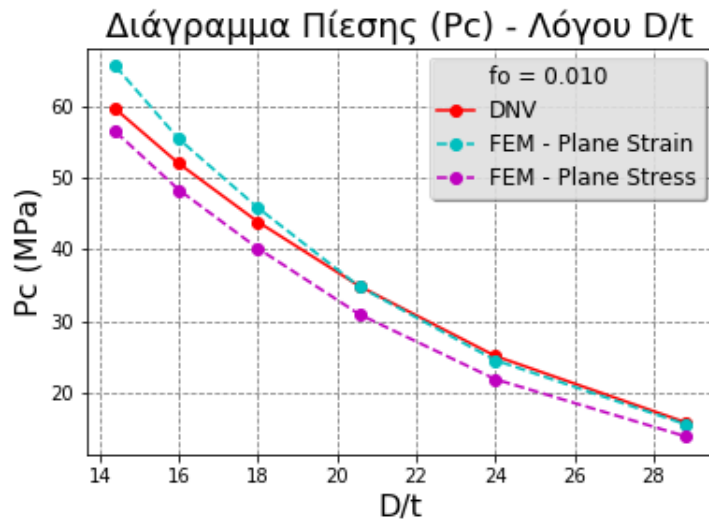
Πίεση κατάρρευσης (P_c) σε συνάρτηση με το λόγο D/t

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης DNV, τα οποία αναδεικνύουν τη σχέση της πίεσης κατάρρευσης με το λόγο D/t για οβαλότητα από 0.5 έως 5%, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο προσομοίωσης και με τις δύο συμπεριφορές υλικού, plane strain και plane stress.

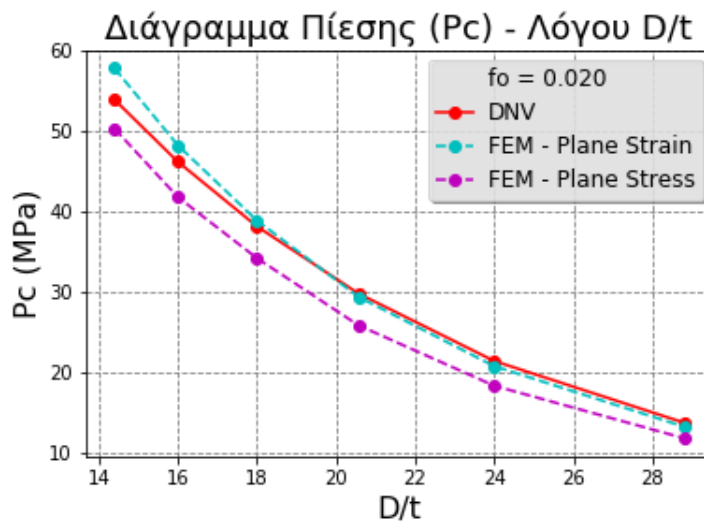


Διάγραμμα 4.8 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 0.5%.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

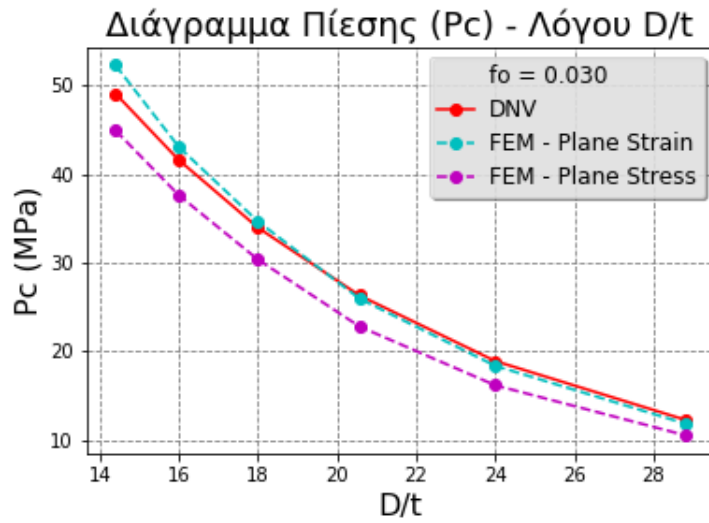


Διάγραμμα 4.9 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 1%.

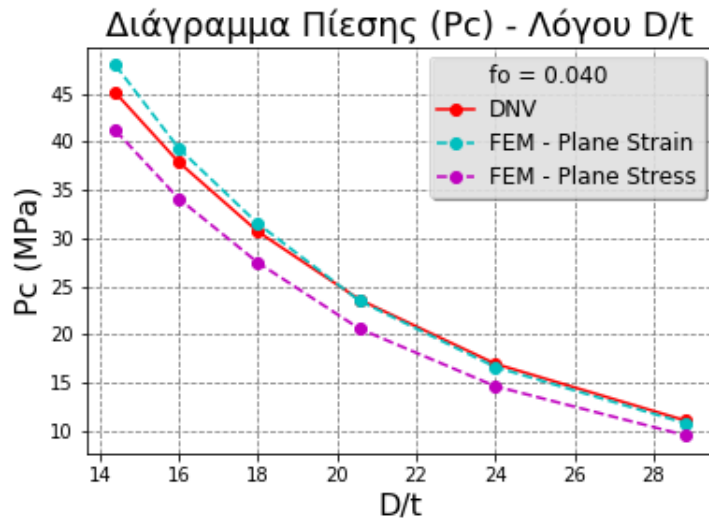


Διάγραμμα 4.10 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 2%.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

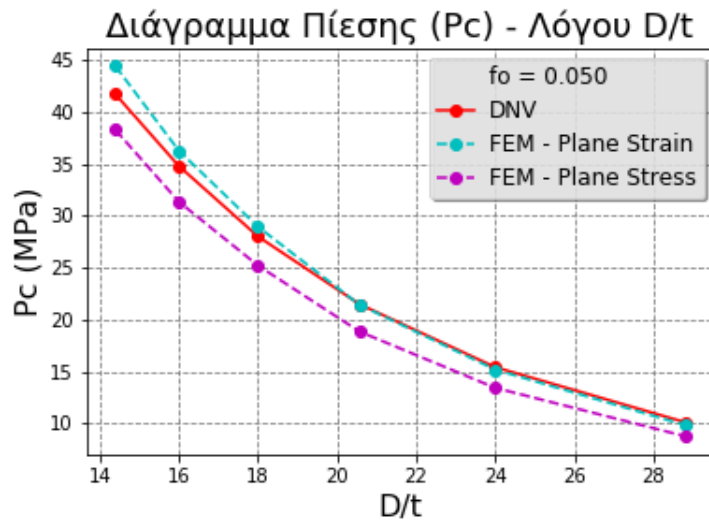


Διάγραμμα 4.11 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 3%.



Διάγραμμα 4.12 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 4%.

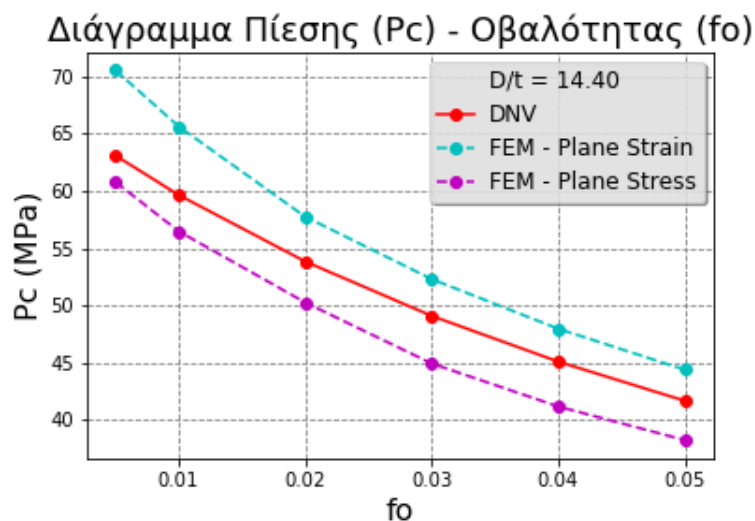
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 4.13 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t για δακτυλίδια αγωγών με οβαλότητα 5%.

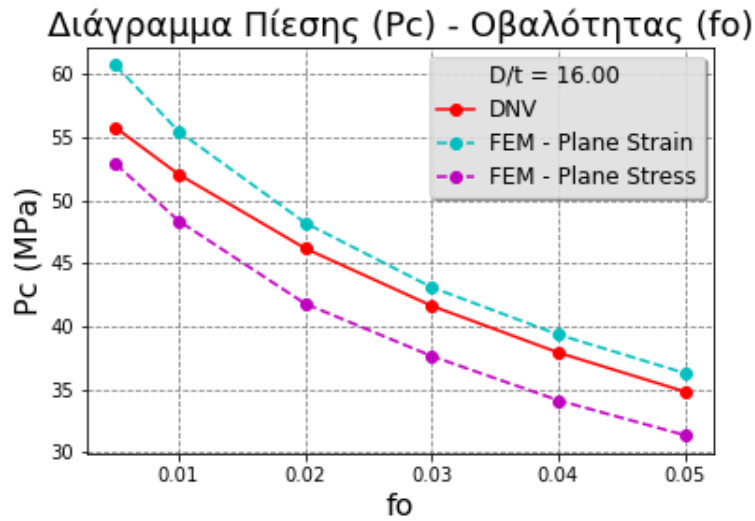
Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα

Τα διαγράμματα που ακολουθούν προκύπτουν κι αυτά από την επίλυση της εξίσωσης του προτύπου DNV και πραγματοποιείται και πάλι σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση και για τις δύο συμπεριφορές υλικού, plane strain και plane stress, μόνο που αυτή τη φορά συσχετίζονται οι τιμές της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για λόγους D/t από 14.4 έως 28.79.

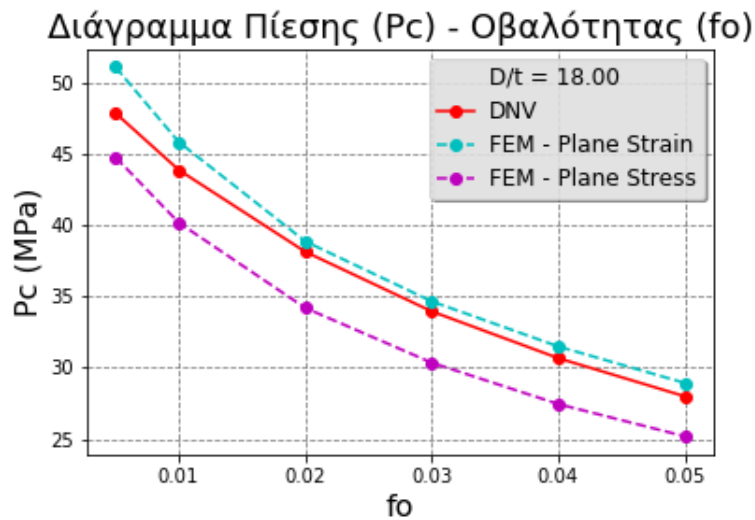


Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Διάγραμμα 4.14 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=14.4$.

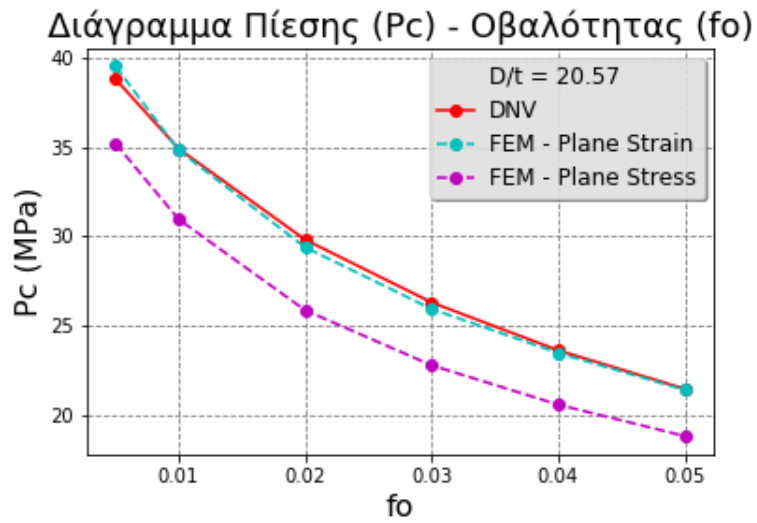


Διάγραμμα 4.15 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια με λόγο $D/t=16$.

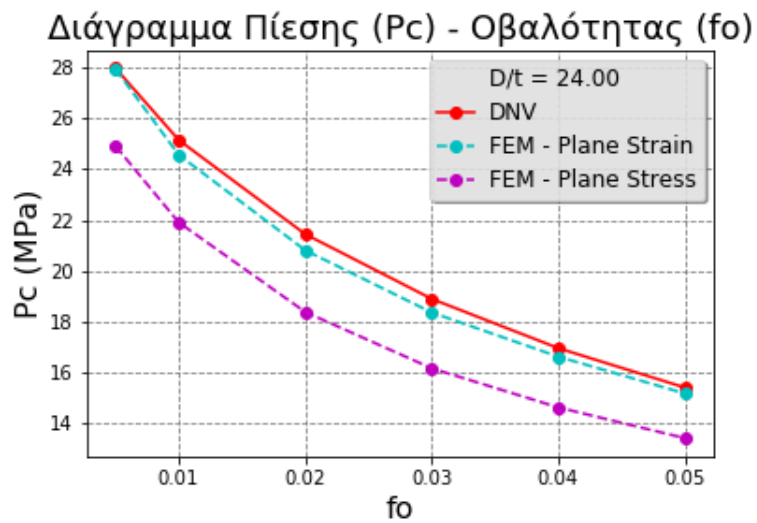


Διάγραμμα 4.16 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=18$.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

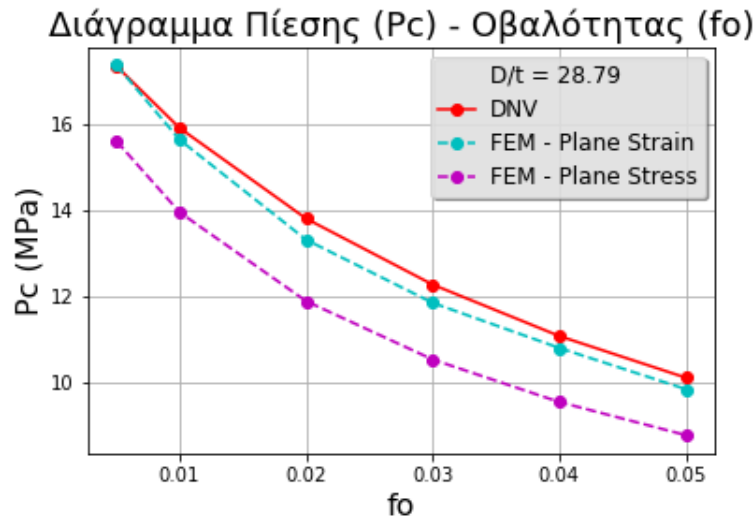


Διάγραμμα 4.17 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=20.57$.



Διάγραμμα 4.18 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=24$.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 4.19 Πίεση κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα για δακτυλίδια αγωγών με λόγο $D/t=28.79$.

Στον **Πίνακα 4.5** σημειώνονται οι μεταβολές στην πίεση κατάρρευσης στις δύο ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή όταν η οβαλότητα είναι 0.005 και όταν είναι 0.05 για τους 6 λόγους D/t , με βάση τις τιμές του προτύπου DNV (κόκκινη καμπύλη).

Πίνακας 4.5 Μεταβολές πίεσης κατάρρευσης για τις δύο ακραίες περιπτώσεις οβαλότητας 0.5 και 5% για τους 6 λόγους D/t .

| D/t | $P_c (f_o=0.5\%)$ | $P_c (f_o=5\%)$ | ΔP_c |
|-------|-------------------|-----------------|--------------|
| 14.4 | 62.95 | 41.4 | 21.55 |
| 16 | 55.55 | 34.48 | 21.07 |
| 18 | 47.5 | 27.67 | 19.83 |
| 20.57 | 38.12 | 21.15 | 16.97 |
| 24 | 27.09 | 15.11 | 11.98 |
| 28.79 | 16.67 | 9.87 | 6.8 |

Σφάλμα μεταξύ τιμής πίεσης κατάρρευσης υπολογισμένης από FEM (plane strain, plane stress) και DNV

Στον ακόλουθο **Πίνακα 4.6** σημειώνονται τα επιμέρους σφάλματα μεταξύ της τιμής της πίεσης κατάρρευσης που προκύπτει από την εξίσωση του προτύπου DNV και των τιμών που εξάγονται από το μοντέλο προσομοίωσης και με τις δύο συμπεριφορές του υλικού (plane strain, plane stress). Σημειώνεται ότι το εν λόγω σφάλμα μεταξύ της τιμής πίεσης κατάρρευσης του προτύπου και του μοντέλου προσομοίωσης υπολογίζεται από τον τύπο $\text{Σφάλμα (\%)} = \frac{P_{CFEM} - P_{CDNV}}{P_{CDNV}} * 100$.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας 4.6 Τιμές σφάλματος-απόκλισης μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV και του μοντέλου προσομοίωσης και για τους δύο τύπους συμπεριφοράς του υλικού, plane strain και plane stress.

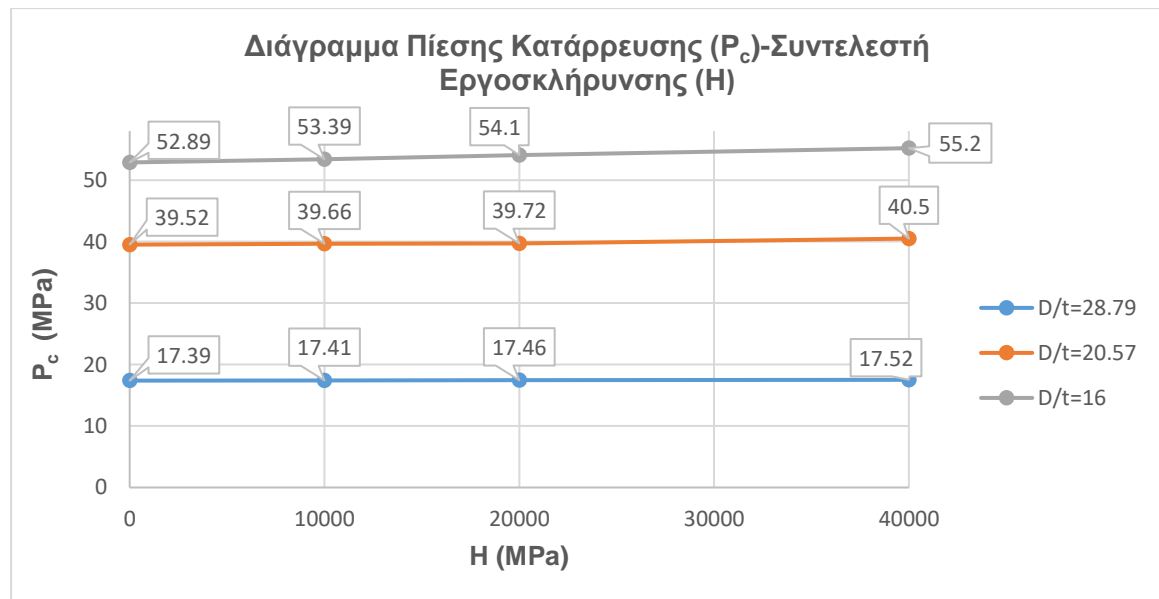
| | t=15.88 mm | | t=19.05 mm | | t=22.23 mm | |
|------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Οβαλότητα | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) |
| 0.005 | 0.10% | -10.10% | -0.10% | -10.90% | 1.90% | -9.30% |
| 0.010 | -1.70% | -12.30% | -2.30% | -12.90% | -0.30% | -11.30% |
| 0.020 | -3.60% | -13.90% | -3.00% | -14.30% | -1.40% | -13.20% |
| 0.030 | -3.50% | -14.20% | -2.80% | -14.50% | -1.40% | -13.40% |
| 0.040 | -2.50% | -13.90% | -2.00% | -13.80% | -0.60% | -12.80% |
| 0.050 | -2.60% | -13.30% | -1.50% | -12.90% | -0.30% | -12.30% |
| Μέση τιμή | -2.30% | -12.95% | -1.95% | -13.22% | -0.35% | -12.05% |
| | t=25.4 mm | | t=28.58 mm | | t=31.75 mm | |
| Οβαλότητα | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) | Σφάλμα - Plane Strain (%) | Σφάλμα - Plane Stress (%) |
| 0.005 | 6.70% | -6.50% | 8.90% | -5.10% | 11.80% | -3.70% |
| 0.010 | 4.50% | -8.40% | 6.60% | -7.10% | 10.00% | -5.30% |
| 0.020 | 1.90% | -10.30% | 4.40% | -9.50% | 7.20% | -6.60% |
| 0.030 | 2.10% | -10.60% | 3.50% | -9.60% | 6.50% | -8.50% |
| 0.040 | 2.70% | -10.50% | 3.80% | -10.00% | 6.40% | -8.70% |
| 0.050 | 3.30% | -10.00% | 4.20% | -9.90% | 6.50% | -8.20% |
| | 3.53% | -9.38% | 5.23% | -8.53% | 8.07% | -6.83% |
| | Μέσο σφάλμα για τους 6 λόγους D/t | Plane strain | 2.04% | | | |
| | | Plane stress | -10.49% | | | |

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Στη συνέχεια της εργασίας και εφόσον έχει διαπιστωθεί ότι η λειτουργία plane strain προβλέπει πιο αντιπροσωπευτικές πιέσεις κατάρρευσης, διενεργήθηκαν κάποιες επιπλέον δοκιμές στο μοντέλο προσομοίωσης προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση ορισμένων παραμέτρων.

4.2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΓΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ (H) ΣΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Στο **Διάγραμμα 4.20** όπου διακρίνονται οι τιμές της πίεσης κατάρρευσης στην περίπτωση που το υλικό είναι πλήρως πλαστικό, αλλά και σε περιπτώσεις όπου ο συντελεστής εργοσκλήρυνσης είναι $H=10000$, 20000 και 40000 MPa. Επιπλέον, στον **Πίνακα 4.7** καταγράφονται οι επιμέρους αυξήσεις στην τιμή της πίεσης κατάρρευσης ανάλογα με τη μεταβολή του συντελεστή εργοσκλήρυνσης.



Διάγραμμα 4.20 Τιμές της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το συντελεστή εργοσκλήρυνσης.

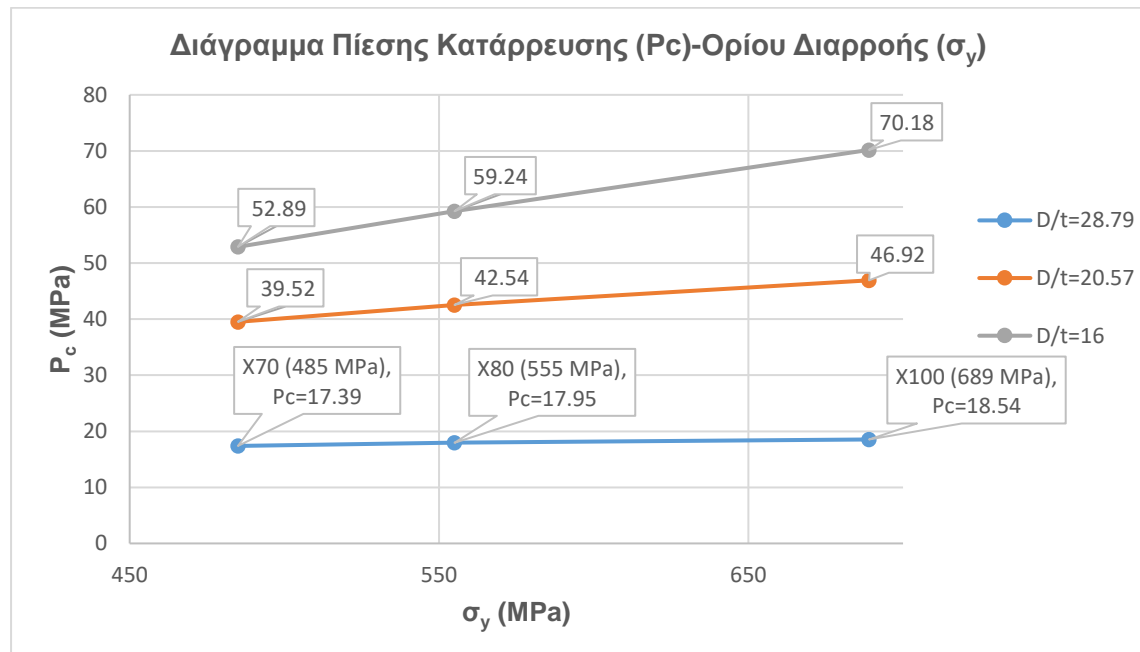
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας 4.7 Αύξηση της τιμής της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την αύξηση του συντελεστή εργοσκλήρυνσης.

| D/t | Αύξηση P_c όταν H από 0 σε 10000 Mpa (Mpa) | Αύξηση P_c όταν H από 10000 σε 20000 Mpa (Mpa) | Αύξηση P_c όταν H από 20000 σε 40000 Mpa (Mpa) | Αύξηση P_c όταν H από 0 σε 20000 Mpa (Mpa) | Αύξηση P_c όταν H από 0 σε 40000 Mpa (Mpa) |
|-------|--|--|--|--|--|
| | 28.79 | 0.02 | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 20.57 | 0.14 | 0.06 | 0.78 | 0.2 | 0.98 |
| 16 | 0.5 | 0.71 | 1.11 | 1.21 | 2.32 |

4.2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΥΠΟΥ (GRADE) ΑΓΩΓΟΥ

Η επίδραση του τύπου σωλήνα που χρησιμοποιείται στην πίεση κατάρρευσης του σωλήνα διακρίνεται στο **Διάγραμμα 4.21**.



Διάγραμμα 4.21 Τιμές της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το όριο διαρροής, δηλαδή τον τύπο (Grade) του σωλήνα (X70, X80, X100).

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

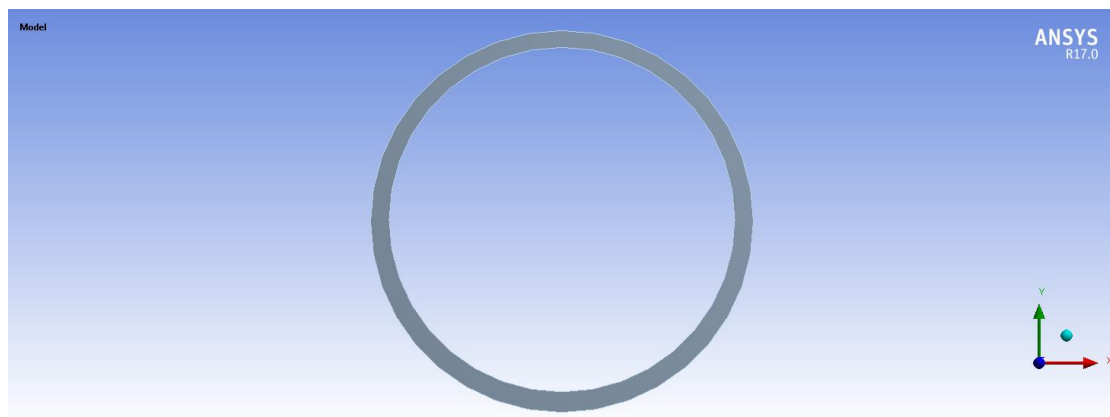
Στον Πίνακα 4.8 που ακολουθεί, καταγράφονται οι μεταβολές της τιμής της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την αλλαγή τύπου σωλήνα.

Πίνακας 4.8 Αύξηση της τιμής της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την αλλαγή τύπου σωλήνα.

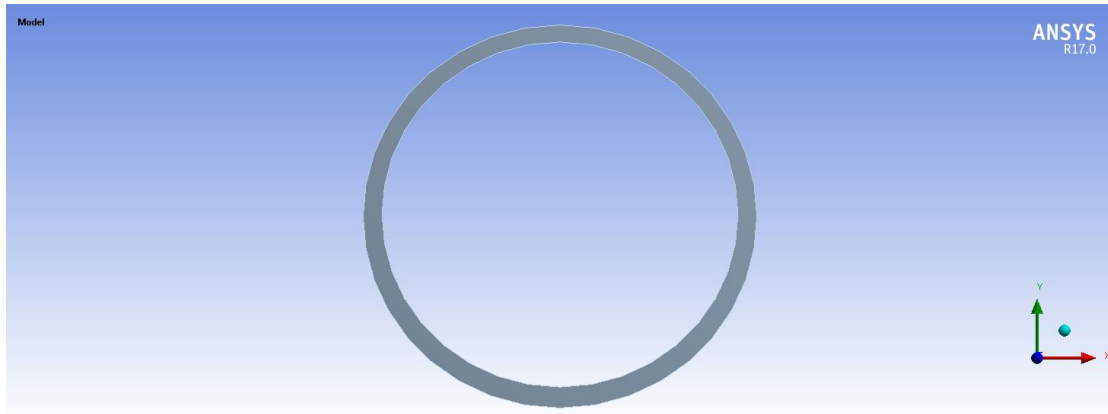
| D/t | Αύξηση P_c όταν ο τύπος σωλήνα από X70 σε X80 (Mpa) | Αύξηση P_c όταν ο τύπος σωλήνα από X80 σε X100 (Mpa) | Αύξηση P_c όταν ο τύπος σωλήνα από X70 σε X100 (Mpa) |
|-------|---|--|--|
| 28.79 | 0.56 | 0.59 | 1.15 |
| 20.57 | 3.02 | 4.38 | 7.4 |
| 16 | 6.35 | 10.94 | 17.29 |

4.2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της εκκεντρότητας (e_c) στην πίεση κατάρρευσης του σωλήνα δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία φαίνονται στην **Εικόνα 2.1** και στην **Εικόνα 2.2**, για δακτυλίδι σωλήνα διαμέτρου $D=457.2$ mm και πάχους $t=22.23$ mm, με οβαλότητα 0.5 και 3% αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1 Δακτυλίδι σωλήνα με $D=457.2$ mm, $t=22.23$ mm, $f_0=0.5\%$ και $e_c=20\%$.



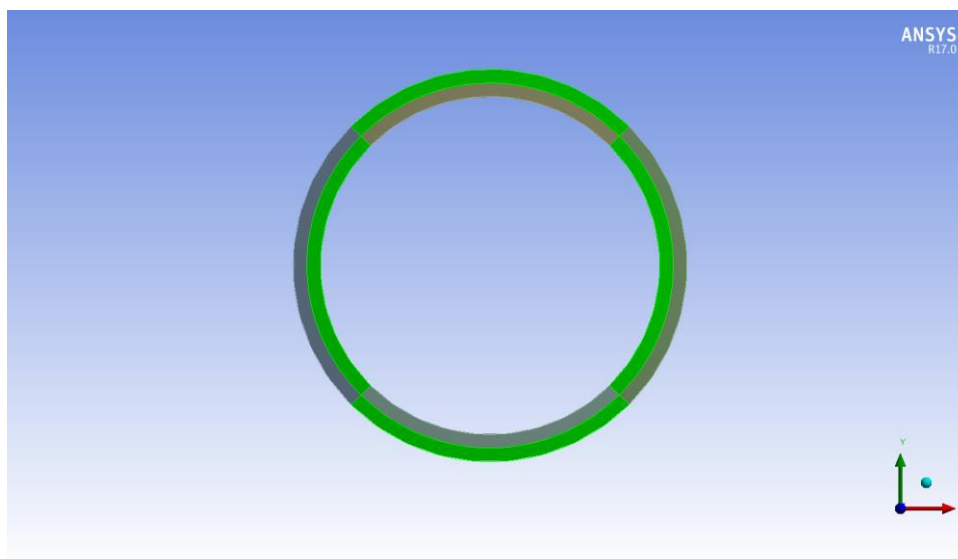
Εικόνα 4.2 Δακτυλίδι σωλήνα με $D=457.2$ mm, $t=22.23$ mm, $f_0=3\%$ και $e_c=20\%$.

4.2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΖΩΝΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Ένα τελευταίο μοντέλο προσομοίωσης που επιλύθηκε είναι αυτό που παρουσιάζεται στις **Εικόνες 4.3 και 4.4**, στο οποίο το δακτυλίδι του αγωγού έχει ουσιαστικά χωριστεί σε 8 περιοχές. Κατά αυτό τον τρόπο μπορούν να ορισθούν διαφορετικές ιδιότητες για τις περιοχές που βρίσκονται υπό συμπίεση (**Εικόνα 4.3**) και διαφορετικές για τις περιοχές που βρίσκονται υπό εφελκυσμό (**Εικόνα 4.4**) κατά την κατάρρευση. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι το υλικό είναι ισότροπο χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών που έχουν προηγηθεί. Δηλαδή για τις ζώνες της συμπίεσης χρησιμοποιούνται οι εξής τιμές:

- 0° : Όριο διαρροής (Θέσεις $11+12+1$)/3=589 MPa
- 90° : Όριο διαρροής (Θέσεις $2+3+4$)/3=574.67 MPa
- 180° : Όριο διαρροής (Θέσεις $5+6+7$)/3=567.33 MPa
- 270° : Όριο διαρροής (Θέσεις $8+9+10$)/3=577.25 MPa

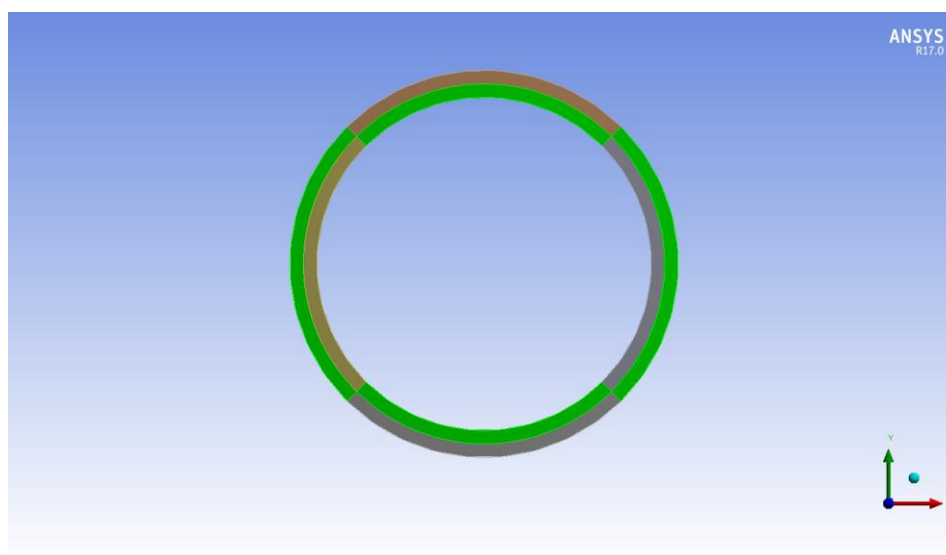
Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Εικόνα 4.3 Ζώνες συμπίεσης σε δακτυλίδι αγωγού.

Και για τις ζώνες εφελκυσμού:

- 0° : Όριο διαρροής (Θέσεις 11+12+1)/3=573 MPa
- 90° : Όριο διαρροής (Θέσεις 2+3+4)/3=556 MPa
- 180° : Όριο διαρροής (Θέσεις 5+6+7)/3=558.67 MPa
- 270° : Όριο διαρροής (Θέσεις 8+9+10)/3=534.33 MPa



Εικόνα 4.4 Ζώνες εφελκυσμού σε δακτυλίδι αγωγού.

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις τιμές συμπίεσης μετά από θερμική γήρανση (έντονα γραμμένες), επιλύεται ένα ακόμη μοντέλο, στο οποίο οι ζώνες συμπίεσης:

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

- 0°: Όριο διαρροής (Θέσεις **11+12+1**)/3=596.33 MPa
- 90°: Όριο διαρροής (Θέσεις **2+3+4**)/3=579 MPa
- 180°: Όριο διαρροής (Θέσεις **5+6+7**)/3=600 MPa
- 270°: Όριο διαρροής (Θέσεις **8+9+10**)/3=591.33 MPa

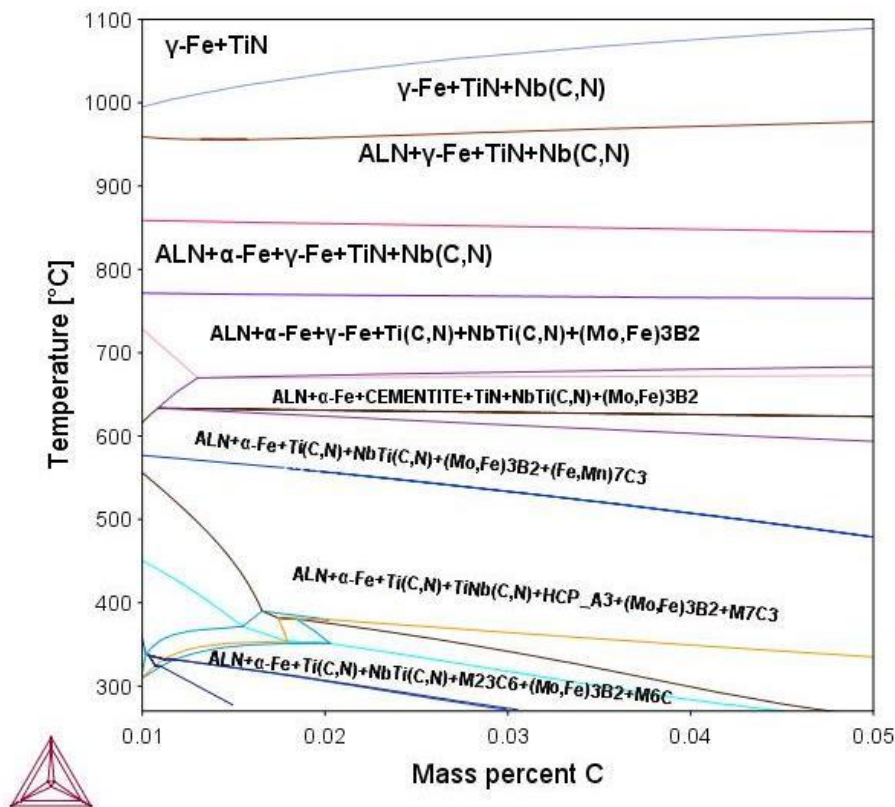
5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα της μηχανικής δοκιμής της συμπίεσης, τα 16 δοκίμια που απλώς συμπίεστηκαν εμφάνισαν όλα καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης τύπου «roundhouse», γεγονός που επιδεικνύει την καλή τους παραμορφωσιμότητα [1]. Όσον αφορά το όριο διαρροής, σε όλες τις θέσεις περιμετρικά του σωλήνα εμφανίστηκε μια μικρή ανισοτροπία μεταξύ των θέσεων 1 και 12 με τις θέσεις 3, 6 και 9, με το όριο διαρροής στη θέση 9 να εμφανίζει τη μικρότερη τιμή.

Από τα δοκίμια που υπέστησαν θερμική γήρανση πριν συμπιεστούν η μεγαλύτερη αύξηση στο όριο διαρροής παρατηρήθηκε στη θέση 9, ενώ η μέση αύξηση του ορίου διαρροής σε σύγκριση με τα δοκίμια που προέρχονται από την ίδια θέση και απλώς συμπίεστηκαν ήταν της τάξης του 3.57%, δηλαδή 20.13 MPa. Μπορούμε να συμπεράνουμε, λοιπόν, ότι ναι μεν παρατηρείται μια αύξηση του ορίου διαρροής, αλλά δεδομένου ότι η απόκλιση του ορίου διαρροής μεταξύ των δοκιμίων που έχουν απλώς συμπιεστεί είναι 17.2 MPa και η μέση αύξηση του ορίου διαρροής στα θερμικώς γηρασμένα είναι 20.13 MPa, είναι πολύ μικρό το περιθώριο μεταξύ τους προκειμένου να αποδοθεί μετά βεβαιότητας η αύξηση αυτή στη θερμική γήρανση. Ωστόσο, όπως αναφέρεται στην έρευνα [84] η επίδραση της θερμικής γήρανσης είναι πιο έκδηλη στα δοκίμια που προέρχονται από τον εγκάρσιο άξονα (transversal), όπου η αύξηση είναι της τάξης του 11-15% σε χάλυβα τύπου X100, ενώ σε χάλυβα X80 η αύξηση του ορίου διαρροής σε δοκίμια που προέρχονται από το διαμήκη άξονα είναι της τάξης μόλις του 1-3.5%. Επιπλέον, στο **Διάγραμμα 5.1** που ακολουθεί παρατίθεται το διάγραμμα φάσεων όπως προέκυψε από το λογισμικό ThermoCalc με βάση τη χημική σύσταση του σωλήνα, όπου για 0.034% κ.β C παρατηρείται ότι όντως υπάρχει μια περιοχή όπου σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 260 και 300°C, μπορεί να υπάρξει όντως κατακρήμνιση $M_{23}C_6$ και M_6C .

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα φάσεων όπως προκύπτει από το λογισμικό Thermocalc με βάση τη χημική σύσταση του σωλήνα των δοκιμών.

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα της μηχανικής δοκιμής του εφελκυσμού, τα 12 δοκίμια εμφάνισαν όλα καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης τύπου «roundhouse», γεγονός που επιδεικνύει την καλή τους παραμορφωσιμότητα [1]. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο της θέσης 12 έσπασε εκτός του μετρήσιμου μήκους των 50 mm μεταξύ των σπειρωμάτων, γι' αυτό και δεν ήταν δυνατή η εξέταση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσής του. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, λοιπόν, των 11 δοκιμών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές όπου το όριο διαρροής είναι υψηλότερο, αλλά η ομοιόμορφη επιμήκυνση μικρότερη και σε αυτές όπου ναι μεν η ομοιόμορφη επιμήκυνση είναι μεγαλύτερη, αλλά το όριο διαρροής έχει μικρότερη τιμή. Ο λόγος $R_{10.5\%}/R_m$ είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι χαρακτηρίζει την παραμορφωσιμότητα του σωλήνα και συγκεκριμένα όσο μικρότερος είναι τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμορφωσιμότητα [75]. Ο ρόλος του λόγου $R_{10.5\%}/R_m$ γίνεται φανερός και από την εξίσωση προσδιορισμού της ικανότητας συμπίεσης του αγωγού σε κατάσταση λυγισμού και αξονικής φόρτισης, η οποία παρατίθεται στο Υποκεφάλαιο 1.5. Πιο συγκεκριμένα ο λόγος $R_{10.5\%}/R_m$ κατά τον αξονικό εφελκυσμό προσδιορίζει την

τιμή του συντελεστή α_n της εξίσωσης. Σε κατάσταση, λοιπόν, εγκατάστασης του αγωγού, όπου η εσωτερική πίεση είναι μηδενική το όριο της παραμόρφωσης κατά τη συμπίεση ($\epsilon_c\%$) μειώνεται με την αύξηση του λόγου $R_{10.5\%}/R_m$, επομένως είναι απαραίτητος ο έλεγχος της τιμής του [86].

Όπως αναμενόταν, το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό στις 8 από τις 11 θέσεις του σωλήνα, γεγονός που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των υλικών, ωστόσο σε 3 θέσεις το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση εμφανίζεται μικρότερο, κάτι που πιθανώς οφείλεται στη διαδικασία της μηχανικής διαστολής, κατά την οποία το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση κατέστη μικρότερο από το αντίστοιχο κατά τον εφελκυσμό στις συγκεκριμένες θέσεις.

Σε ό,τι αφορά τις τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση σε όλες τις περιπτώσεις με τη λειτουργία plane stress εξάγονται τιμές μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV, ενώ με τη λειτουργία plane strain σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει μικρή απόκλιση των τιμών της προσομοίωσης σε σύγκριση με το πρότυπο DNV, γεγονός που φαίνεται και από θετικό και αρνητικό αντίστοιχα πρόσημο στο μέσο σφάλμα για τις δύο λειτουργίες στον **Πίνακα 4.6** Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή όπου ο λόγος D/t έχει τιμή από 14.4 έως 16, όπου ακόμη και με την επιλογή plane strain υπάρχει μεγάλη απόκλιση με το πρότυπο DNV. Ωστόσο αυτό είναι αναμενόμενο, διότι το πρότυπο θεωρείται αξιόπιστο για λόγους D/t , όπου $15 < D/t < 45$ [69]. Επομένως είναι πιθανό το πρότυπο να υπολογίζει πολύ συντηρητικές τιμές για την πίεση κατάρρευσης για λόγους D/t μικρότερους από 15, γεγονός που επιβεβαιώνεται και στην έρευνα [90]. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι στην περιοχή όπου ο λόγος D/t έχει τιμή μεταξύ 14.4 και 16, η προσομοίωση με την επιλογή plane stress δείχνει να προσεγγίζει εμφανώς περισσότερο την τιμή του προτύπου σε σύγκριση με τη λειτουργία plane strain. Τέλος, για λόγους D/t από 20 μέχρι 28.8 η προσομοίωση με την επιλογή plane strain εξάγει τιμές πίεσης κατάρρευσης ελαφρώς μικρότερες από αυτές του προτύπου DNV.

Μελετώντας τα διαγράμματα της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με την οβαλότητα, επαληθεύονται οι παρατηρήσεις που έγιναν και στα αντίστοιχα διαγράμματα της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το λόγο D/t σχετικά με το βαθμό στον οποίο προσεγγίζονται οι τιμές του προτύπου από το μοντέλο προσομοίωσης. Μια ακόμη χρήσιμη παρατήρηση είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος D/t τόσο λιγότερο ευαίσθητος είναι ο σωλήνας σε αύξηση της οβαλότητας.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Συγκεκριμένα, η μεταβολή της πίεσης κατάρρευσης στις δύο ακραίες περιπτώσεις τιμών οβαλότητας, 0.5% και 5%, για λόγο $D/t = 14.4$ είναι 21.55 MPa, ενώ για λόγο $D/t = 28.79$ είναι μόλις 6.8 MPa, γεγονός που επιβεβαιώνει τον παραπάνω ισχυρισμό.

Η επίδραση του συντελεστή εργοσκήρυνσης στην πίεση κατάρρευσης δεν είναι ιδιαίτερος σημαντική, γεγονός που γίνεται αντιληπτό και από το **Διάγραμμα 4.20** όπου διακρίνονται οι τιμές της πίεσης κατάρρευσης στην περίπτωση που το υλικό είναι πλήρως πλαστικό, αλλά και σε περιπτώσεις όπου ο συντελεστής εργοσκήρυνσης είναι $H=10000$, 20000 και 40000 MPa. Από την κλίση των καμπυλών του **Διαγράμματος 4.20** για τις πιέσεις κατάρρευσης των σωλήνων με τρεις διαφορετικούς λόγους D/t και με τους τέσσερις συντελεστές εργοσκήρυνσης, είναι φανερό ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος D/t τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχει στην αύξηση της πίεσης κατάρρευσης, γεγονός που δικαιολογείται κι από την πιο απότομη κλίση της ευθείας, καθώς μειώνεται ο λόγος D/t . Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και στον **Πίνακα 4.7**, όπου καταγράφονται οι επιμέρους αυξήσεις στην τιμή της πίεσης κατάρρευσης ανάλογα με τη μεταβολή του συντελεστή εργοσκήρυνσης, από όπου προκύπτει ότι η μεταβολή της πίεσης κατάρρευσης στις δύο ακραίες περιπτώσεις που ο συντελεστής H γίνεται από 0 40000 MPa, για λόγο $D/t=28.79$ είναι 0.13 MPa, ενώ για λόγο $D/t=16$ είναι 2.32 MPa.

Ο τύπος σωλήνα που χρησιμοποιείται επηρεάζει περισσότερο την πίεση κατάρρευσης των σωλήνων με μικρότερο λόγο D/t , γεγονός που διακρίνεται από την κλίση των ευθειών της πίεσης κατάρρευσης σε συνάρτηση με το όριο διαρροής στο **Διάγραμμα 4.21**, αλλά και από τις επιμέρους μεταβολές της πίεσης κατάρρευσης όταν από υπάρχει μετάβαση από έναν σωλήνα με χαμηλότερο όριο διαρροής σε έναν σωλήνα με μεγαλύτερο όριο διαρροής. Το γεγονός ότι για σωλήνες με μεγαλύτερο λόγο D/t η αύξηση στην πίεση κατάρρευσης είναι αμελητέα σε σύγκριση με την αντίστοιχη μεταβολή σε σωλήνες με μικρότερο λόγο D/t , αποδίδεται στο γεγονός ότι για μεγαλύτερο λόγο D/t η ελαστική πίεση κατάρρευσης είναι μεγαλύτερης σημασίας για τον αγωγό, σύμφωνα με τον τύπο του D/t_{tr} που έχει ήδη αναφερθεί στο Υποκεφάλαιο 2.2.5 του Θεωρητικού μέρους. Επιβεβαίωση στη συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελούν οι μεταβολές στην πίεση κατάρρευσης στον **Πίνακα 4.8** όταν ο τύπος του σωλήνα από X70 γίνει X100, όπου για λόγο $D/t=28.79$ η μεταβολή είναι 1.15 MPa, ενώ για λόγο $D/t=16$ είναι 17.29 MPa.

Σε ό,τι αφορά τις τιμές της πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα προσομοίωσης με εκκεντρότητα, η μείωση στην πίεση κατάρρευσης για το μοντέλο με 0.5% οβαλότητα

ήταν της τάξης του 2.83 %, αφού από 39.52 MPa με $e_c=0$ % έγινε 38.4 MPa με $e_c=20$ %, ενώ για το μοντέλο με 3% οβαλότητα η μείωση στην πίεση κατάρρευσης ήταν της τάξης του 2.1%, αφού από 25.94 MPa με $e_c=0$ % έγινε 25.39 MPa με $e_c=20$ %. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι ο λόγος D/t δεν επηρεάζει την ευαισθησία του σωλήνα στην εκκεντρότητα, αφού για σωλήνα με τα ίδια χαρακτηριστικά και εκκεντρότητα, αλλά με μεγαλύτερη οβαλότητα, η μείωση στην πίεση της κατάρρευσης βρέθηκε μικρότερη. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα στην έρευνα [56].

Όσον αφορά το τελευταίο μοντέλο προσομοίωσης, γίνεται αντιληπτό ότι μπορούν να ορισθούν οι ιδιότητες του υλικού και κατά τον εφελκυσμό και κατά τη συμπίεση, προσεγγίζοντας έτσι καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά που έχει το υλικό του αγωγού. Τέλος, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το μοντέλο με $D=457.2\text{mm}$ και $t=31.75\text{mm}$ πριν και μετά τη θερμική γήρανση, η πίεση κατάρρευσης έγινε από 82.58 MPa 84.3 MPa, δηλαδή σημειώθηκε μια αύξηση της τάξης του 2.1 % στην πίεση κατάρρευσης.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε ό,τι αφορά τις μηχανικές δοκιμές:

1. Στη δοκιμή συμπίεσης στα 16 δοκίμια που απλώς συμπιέστηκαν, παρατηρήθηκε μια σχετική ανισοτροπία/ανομοιογένεια στο όριο διαρροής μεταξύ των θέσεων 1 και 12 με τις θέσεις 3,6 και 9, με την τελευταία να προκύπτει η πιο επιρρεπής από όλες τις υπόλοιπες θέσεις.
2. Στη δοκιμή συμπίεσης, αλλά στα 8 δοκίμια που υπέστησαν γήρανση πριν από τη συμπίεση παρατηρήθηκε μια μέση αύξηση 3.57% (20.13 MPa) στο όριο διαρροής σε σχέση με τα δοκίμια που προέρχονταν από την ίδια θέση του σωλήνα και απλώς συμπιέστηκαν.
3. Στη δοκιμή εφελκυσμού, οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των 11 δοκιμίων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές όπου το όριο διαρροής είναι υψηλότερο, αλλά η ομοιόμορφη επιμήκυνση είναι μικρότερη και σε αυτές όπου ναι μεν η ομοιόμορφη επιμήκυνση είναι μεγαλύτερη, αλλά το όριο διαρροής έχει μικρότερη τιμή.
4. Το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο όριο διαρροής κατά τον εφελκυσμό στις 8 από τις 11 θέσεις του σωλήνα, γεγονός που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των υλικών, ωστόσο σε 3 θέσεις το όριο διαρροής κατά τη συμπίεση εμφανίζεται μικρότερο, κάτι που πιθανώς οφείλεται στη διαδικασία της μηχανικής διαστολής.

Σε ό,τι αφορά το μοντέλο προσομοίωσης:

1. Η πίεση κατάρρευσης μειώνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος D/t .
2. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος D/t τόσο λιγότερο ευαίσθητος είναι ο σωλήνας σε αύξηση της οβαλότητας.
3. Προσεγγίζονται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση του προτύπου DNV, όπου όταν χρησιμοποιείται η επιλογή plane strain η απόκλιση είναι της τάξης του 2.04%, ενώ με την επιλογή plane stress η αντίστοιχη απόκλιση είναι 10.49%.
4. Το πρότυπο DNV υπολογίζει πολύ χαμηλές τιμές για την πίεση κατάρρευσης για λόγους D/t μικρότερους από 15.
5. Η επίδραση του συντελεστή εργοσκλήρυνσης στην πίεση κατάρρευσης δεν είναι ιδιαίτερος σημαντική, ενώ είναι εμφανές ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος

D/t τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχει η αύξηση του συντελεστή εργοσκήρυσης στην αύξηση της πίεσης κατάρρευσης.

6. Ο τύπος σωλήνα που χρησιμοποιείται επηρεάζει περισσότερο την πίεση κατάρρευσης των σωλήνων με μικρότερο λόγο D/t.
7. Οι τιμές της πίεσης κατάρρευσης για τα μοντέλα προσομοίωσης με εκκεντρότητα υποδεικνύουν ότι ο λόγος D/t δεν επηρεάζει την ευαισθησία του σωλήνα στην εκκεντρότητα, αφού για σωλήνα με τα ίδια χαρακτηριστικά και εκκεντρότητα, αλλά με μεγαλύτερη οβαλότητα, η μείωση στην πίεση της κατάρρευσης βρέθηκε μικρότερη.
8. Η πίεση κατάρρευσης λόγω αύξησης του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση, μετά τη γήρανση, αυξήθηκε κατά 2.1%.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

- Διενέργεια μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού και στους υπόλοιπους άξονες και χρήση των αποτελεσμάτων τόσο για σύγκριση μεταξύ των τιμών του ορίου διαρροής και τη μελέτη της ανισοτροπίας, όσο και για τη χρήση των δεδομένων σε αντίστοιχα μοντέλα προσομοίωσης.
- Ανάλυση με TEM, ώστε να διαπιστωθεί αν όντως υπάρχει κατακρήμνιση καρβιδίων και νιτριδίων στις χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη θερμική γήρανση και αν όντως μπορεί να αποδοθεί η αύξηση στο όριο διαρροής σε αυτά.
- Μελέτη της επίδρασης των παραμενουσών τάσεων στην πίεση κατάρρευσης.
- Χρήση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης Ramberg-Osgood στο μοντέλο προσομοίωσης, η οποία εξασφαλίζει μια πιο ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή της παραμόρφωσης.
- Εξέταση της επίδρασης της θερμικής γήρανσης στις εφελκυστικές ιδιότητες του αγωγού και εκ νέου υπολογισμός της πίεσης κατάρρευσης.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Huo Chunyong, Li Yang, Li Lingkang, “DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF PIPELINE STEEL IN LONG-DISTANCE GAS PIPELINE OF CHINA”, The Chinese Society for Metals (CSM) and The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2014.
- [2] S. Braskoro, T.D.T. Dronkers, M. van Driel, “From Shallow to Deep Implications for Offshore Pipeline Design”, Journal of the Indonesian Oil and Gas Community, 2004.
- [3] Hans- Georg Hillenbrand, Michael Graf, Christoph Kalwa, “Development and production of high strength pipeline steels”, Niobium, 2001.
- [4] Ian Nash, “The Production and testing of JCOE Linepipe for the Middle East to India Deepwater Pipeline’s 3500m application”, Peritus International Ltd, 2013.
- [5] Morten B. Langhelle, “Pipelines for Development at Deep Water Fields”, Master Thesis, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, 2011.
- [6] Ji-Ming Zhang, Qiang Chi, Hong-Yuan Chen, Hai-Tao Wang, Wei-Wei Zhang, Fang Yang, Chun-Yong Huo, Qiu-Rong Ma, Yao-Rong Feng, “INFLUENCE OF THERMAL AGING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF X100 HIGH DEFORMABILITY LINE PIPE”, UNIVERSITY OF MICHIGAN ANN ARBOR, 2017.
- [7] Fuat Kara, Josef Navarro, Robert L. Allwood, “Effect of thickness variation on collapse pressure of seamless pipes”, Ocean Engineering 37, p. 998–1006, 2010.
- [8] Josef Navarro, Philip Cooper, “IMPROVED PREDICTION OF EXTERNAL PRESSURE COLLAPSE OF SEAMLESS PIPE”, Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2009, 2009.
- [9] Hiroshi Yatabe, Naoki Fukuda, Tomoki Masuda, Masao Toyoda, “Effect of Material Stress-Strain Behavior and Pipe Geometry on the Deformability of High-Grade Pipelines”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004.
- [10] J.B. Wiskel, J. Ma, D.G. Ivey, H. Henein, “AN INVESTIGATION OF AGING BEHAVIOUR IN MICROALLOYED STEEL (X70) UOE PIPE” HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015, TMS, 2016.

- [11] Jean Gilbert Louis, “Collapse of Thick Walled UOE Pipes Corrosive Resistant Cladding”, Thesis for the degree of master of science, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, 2010.
- [12] M. Fraldi, F. Guarracino, “Towards an accurate assessment of UOE pipes under external pressure: Effects of geometric imperfection and material inhomogeneity”, *Thin-Walled Structures* 63 p. 147–162, 2013.
- [13] Massimiliano Fraldi, Federico Guarracino, “An Analytical Approach to the Analysis of Inhomogeneous Pipes under External Pressure”, *Journal of Applied Mathematics* Volume 2012, 2012.
- [14] Philippe Le Grogneq, Pascal Casari, Dominique Choqueuse, “Influence of residual stresses and geometric imperfections on the elastoplastic collapse of cylindrical tubes under external pressure”, *Marine Structures* 22 p. 836–854, 2009.
- [15] A.M. A1-Sharif, R. Preston, “Improvement in UOE Pipe Collapse Resistance by Thermal Aging”, *Offshore Technology Conference*, 1996.
- [16] David E. Laughin, Kazuhiro Hono, “Physical Metallurgy”, Volume I Fifth edition, 2014.
- [17] Yongchang Liu, Lei Shi, Chenxi Liu, Liming Yu, Zesheng Yan, Huijun Li, “Effect of step quenching on microstructures and mechanical properties of HSLA steel”, *Materials Science & Engineering A675*, p. 371–378, 2016.
- [18] V. Carretero Olalla, V. Bliznuk, N. Sanchez, P. Thibaux, L. A. I. Kestens, R. H. Petrov, “Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters”, *Materials Science & Engineering A604*, p. 46-56, 2014.
- [19] Arakawa Takekazu, Nishimura Kimihiro, Yano Koji, Suzuki Nobuhisa, “Development of High Performance UOE Pipe for Linepipe”, *JFE Technical Report No. 18*, 2013.
- [20] S. Vervynckt, K. Verbeken, B. Lopez, J. J. Jonas, “Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature”, *International Materials Reviews* Vol. 57, 2012.
- [21] Xianglei Kong, Guojian Huang, Kuijun Fu, Fangfang Liu, Minghao Huang, Yinghui Zhang, “Effect of pipe body alloy on weldability of X80 steel”, *HSLA Steels 2015, Microalloying & Offshore Engineering Steels 2015 (Conference proceedings)*, 2015.

- [22] Lei Fan, Tongliang Wang, Zhibin Fu, Shuming Zhang, Qingfeng Wang, “Effect of heat-treatment on-line process temperature on the microstructure and tensile properties of a low carbon Nb-microalloyed steel”, *Materials Science & Engineering A607*, p. 559–568, 2014.
- [23] Yongchang Liu, Yi Shao, Chenxi Liu, Yan Chen, Dantian Zhang, “Microstructure Evolution of HSLA Pipeline Steels after Hot Uniaxial Compression”, *Materials* 9, 721, 2016.
- [24] Volker Schwinn, Dr. Jürgen Bauer, Dr. Peter Flüß, Hans-Jürgen Kirsch, Eric Amoris, “Recent Developments and Applications of TMCP Steel Plates”, *International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels*, 2011.
- [25] R. E. Smallman, A.H.W. Ngan, “Physical Metallurgy and Advanced Materials”, Seventh Edition, 2007.
- [26] Alfonse Chamisa, “Development of Ultra High Strength Steels for Reduced Carbon Emissions in Automotive Vehicles”, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Department of Material Science & Engineering, The University of Sheffield, 2014.
- [27] William D. Callister JR., David G. Rethwisch, “Materials Science and Engineering, An Introduction”, 9th Edition, 2014.
- [28] E. O. Hall: *Proc. Phys. Soc.* 64B, p. 747, 1951.
- [29] N. J. Petch: *J. Iron Steel Inst.*, 174, p. 25, 1953.
- [30] S. Zajac, T. Siwecki, B. Hutchinson and M. Attlegard, “Recrystallization controlled rolling and accelerated cooling for high strength and toughness in V-Ti-N steels”, *Proc. of the Inter. Symp. on Microalloyed Vanadium Steels*, p. 149–170, 1990.
- [31] X. Mao, X. Huo, X. Sun, Y. Chai, *J. Mater. Process. Technol.* 210, p.1660–1666, 2010.
- [32] H. Adrian, F. B. Pickering, “Effect of titanium additions on austenite grain growth kinetics of medium carbon V-Nb steels containing 0,008-0,018%N”, University of Cambridge, 1991.

- [33] J. R. Paules, "Practical considerations in microalloying with vanadium, niobium, or titanium", Proc. of the Inter. Symp. on Microalloyed Vanadium Steels, Cracow, p. 19–32, 1990.
- [34] C. S. Smith Trans. AIME, 175, p. 15, 1948.
- [35] Harry Bhadeshia, Robert Honeycombe, "Steels Microstructure and Properties", Fourth edition, 2017.
- [36] E. Orowan, "Internal stress in metals and alloys", London, The Institute of Metals, p. 451, 1948.
- [37] T. Gladman, "The physical metallurgy of microalloyed steels", London, The Institute of Materials, 2002.
- [38] C. Z. Wagner, Z. Elektrochern., 65, p. 581, 1961.
- [39] Andrew C. Palmer, Roger A. King, "Subsea Pipeline Engineering", 2nd Edition, 2008.
- [40] M. Militzer, "Thermomechanical Processed Steels", Comprehensive Materials Processing, Volume 1, 2014.
- [41] Jai Dev Chandel, Nand Lal Singh, "Formation of X-120 M Line Pipe through J-C-O-E Technique", Engineering 3, p. 400-410, 2011.
- [42] Degala Ventaka Kiran, Suck-Joo Na, "Experimental Studies on Submerged Arc Welding Process", Journal of Welding and Joining Vol. 32, No. 3, 2014.
- [43] Ιστοσελίδα: www.cpw.gr
- [44] S. Roy, Y. C. Park, B. Valeti, "Toughness Requirements for Heat-Affected Zones of Welded Structural Steels for Highway Bridges", Interim Report Project No. 10-95, Lehigh University, 2015.
- [45] T. Tadavi, B. Jogi, S. Dhende, S. Banait, P. Wagh, "Microscopic Analysis of Heat Affected Zone (HAZ) of Submerged Arc Welding (SAW) Joint for 1018 Mild Steel Sheet", Advances in Intelligent Systems Research Vol. 137, p. 194-199, 2017.
- [46] Yongxu Yang, "THE EFFECT OF SUBMERGED ARC WELDING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF PRESSURE VESSEL AND WIND TURBINE TOWER STEELS", A Thesis Submitted for the Degree of Master of Science in the Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, 2008.

- [47] Ki Bong Kang, Ju Seok Kang, Jang Yong Yoo, Dong Han Seo, In Shik Suh, Gyu Baek An, “Development of High Strength and High Performance Linepipe and Shipbuilding Steels”, Advanced Steels, 2011.
- [48] Krauss George, “Steels Processing, Structure and Performance”, ASM International, 2015.
- [49] Mark D. Lower, “Strain-Based Design Methodology of Large Diameter Grade X80 Linepipe”, PhD diss., University of Tennessee, 2014.
- [50] Taylor Roth Jacobs, “ELEVATED TEMPERATURE MECHANICAL PROPERTIES OF LINE PIPE STEELS”, A master thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines.
- [51] Jun Ma, “Effect of Strain Aging on Mechanical Properties of Microalloyed (X70) UOE Steel Pipes”, A master thesis submitted to Department of Chemical and Materials Engineering University of Alberta, 2016.
- [52] Tianxia Zou, Dayong Li, Guanghan Wu, Yinghong Peng, “Yield strength development from high strength steel plate to UOE pipe”, Materials and Design 89, p. 1107–1122, 2016.
- [53] Torsten Ericsson, “Principles of Heat Treating of Steels”, Volume 4 Heat treating ASM International, 1991.
- [54] L. N. Pussegoda, J. J. Jonas, “Comparison of Dynamic Recrystallization and Conventional Controlled Rolling Schedules by Laboratory Simulation”, ISIJ International. Vol. 31, p. 278-288, 1991.
- [55] Nobuyuki Ishikawa and Hitoshi Sueyoshi, Kimihiro Nishimura, Osamu Yamamoto, Akihiko Tanizawa, Yasumitsu Kiyoto, Daisuke Naganuma, “Heavy Gauge UOE Pipe with Improved Compressive Strength for Offshore Pipeline”, Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, 2012.
- [56] Björn Fallqvist, “Collapse of thick deepwater pipelines due to hydrostatic pressure”, Master thesis report, Department of Solid Mechanics Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2009.
- [57] Radhakanta Rana, Shiv Brat Singh, “Automotive Steels, Design, Metallurgy, Processing and Applications”, 2017.

- [58] William D. Callister Jr., “Materials Science and Engineering, An Introduction”, Seventh edition, 2007.
- [59] Danijela A. Skobir, “HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY (HSLA) STEELS”, Institute of Metals and Technology, 2011.
- [60] Jaswar Koto, “Subsea Pipeline Design & Application”, Ver. 1, Ocean & Aerospace Research Institute, Indonesia, 2016.
- [61] ANSYS 17.0, Mechanical Help Manual
- [62] Caryn Nicole Homsher, “Determination of the non-recrystallization temperature (TNR) in multiple microalloyed steels”, Colorado School of Mines.
- [63] Javier Raffo, Rita G. Toscano, Luciano Mantovano, Eduardo N. Dvorkin, “NUMERICAL MODEL OF UOE STEEL PIPES: FORMING PROCESS AND STRUCTURAL BEHAVIOR”, Center for Industrial Research (CINI) Tenaris Argentina, 2007.
- [64] Duane DeGeer, Ulrich Marewski, Hans-Georg Hillenbrand, Bernadette Weber, Michael Crawford, “COLLAPSE TESTING OF THERMALLY TREATED LINE PIPE FOR ULTRA-DEEPWATER APPLICATIONS”, Proceedings of OMAE 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004.
- [65] Andreas Liessem, Gerhard Knauf, Steffen Zimmermann, “Strain Based Design-What the Contribution of a Pipe Manufacturer Can Be”, Europipe GmbH, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH.
- [66] Andreas Liessem, Johannes Groß-Weege, Gerhard Knauf, Steffen Zimmermann, “UOE Pipes for Ultra Deep Water Application-Analytical and FE Collapse Strength Prediction vs. Full-Scale Tests of Thermally Treated Line Pipe”, Europipe GmbH, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH.
- [67] Andreas Liessem, Johannes Groß-Weege, Gerhard Knauf, Steffen Zimmermann, “ENHANCEMENT OF COLLAPSE RESISTANCE OF UOE PIPE BASED ON SYSTEMATIC EXPLOITATION OF THERMAL CYCLE OF COATING PROCESS”, Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference, 2008.
- [68] Tsuru, E., Asahi, H., Ayukawa, N., “Improved collapse resistance of UOE line pipe with thermal aging for deepwater applications”, International Journal of Offshore and Polar Engineering 17, p. 280-287, 2007.

[69] OFFSHORE STANDARD DET NORSKE VERITAS DNV-OS-F101, “Submarine Pipeline Systems”, 2012.

[70] Dr. Niels Kerstens, Dr. Ping Liu, Duane DeGeer, “FULL SCALE APPLICATION OF THERMAL AGEING IN LINE PIPE MATERIAL SELECTION FOR DEEPWATER PIPELINES”, Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2014, 2014.

[71] Jong-hyun Baek, “EFFECT OF OVALITY AND ECCENTRICITY ON COLLAPSE PRESSURE OF SUBSEA PIPELINE”, International Gas Union Research Conference, 2011.

[72] T. Gladman, “The physical metallurgy of microalloyed steels”, 1st ed., The University Press, Cambridge, 1997.

[73] Stelios Kyriakides, Edmundo Corona, “Mechanics of Offshore Pipelines, Volume 1: Buckling and Collapse”, Elsevier, 2007.

[74] F. Guarracino and M. Fraldi (University of Naples), Richard Freeman and Simon Slater (Tata Steel), “Hydrostatic Collapse of Deepwater Pipelines: A Rigorous Analytical Approach”, Offshore Technology Conference, 2011.

[75] Lingkang Ji, Xiao Li, Hongyuan Chen, Chun Yong Huo, Shaotao Gong, Xinwei Zhao, “On the Relationship between Yield Ratio, Uniform Elongation, and Strain Hardening Exponent of High Grade Pipeline Steels”, Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference

[76] Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM E9-09.

[77] Metallic materials Tensile testing —Part 1: Method of test at room temperature, ISO 6892.

[78] J. Adamczyk, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 14 p. 9–20, 2006.

[79] R. Winston Revie, “Oil and Gas Pipelines, Integrity and Safety Handbook”, Wiley, 2015.

- [80] S. G. Hong, H. J. Jun, K. B. Kang, C. G. Park, "Evolution of precipitates in the Nb–Ti–V microalloyed HSLA steels during reheating," *Scripta Materialia*, vol. 48, p. 1201-1206, 2003.
- [81] The University of Memphis, "Chapter 6 - Plane Stress/Plane Strain Stiffness Equations - Part 1".
- [82] Marco A. P. Rosas, Ana Paula F. Souza, Marcos V. Rodrigues, Danilo Machado L. da Silva, "HYDROSTATIC COLLAPSE PRESSURE AND RADIAL COLLAPSE FORCE COMPARISONS FOR ULTRA-DEEPWATER PIPELINES", *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2014.
- [83] Adilson C. Benjamin, Divino J. S. Cunha, "ASSESSMENT OF HYDROSTATIC COLLAPSE OF SUBMARINE PIPELINES: THE CLASSICAL APPROACH REVISITED", *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2012.
- [84] European Commission Research Fund for Coal and Steel, "Special components and strain-based requirements for high strength high pressure pipeline applications", 2013.
- [85] ANSYS Customer Training Material, "ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities", 2010.
- [86] Bing Liu, X.J., Liu, Hong Zhang, "COMPRESSIVE STRAIN CAPACITY OF PIPELINES FOR STRAIN-BASED DESIGN", *Proceedings of IPC2008 7th International Pipeline Conference*, 2008.
- [87] Zhenyong Zhang, Zhifeng Yu, Ming Liu, Kunal Kotian, and Fan Zhang "APPLICATION OF COMPRESSIVE STRAIN CAPACITY MODELS TO MULTIPLE GRADES OF PIPELINES", *Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference IPC2014*, 2014.
- [88] Nader Yoosef-Ghodsi, Istemi Ozkan, Qishi Chen, "COMPARISON OF COMPRESSIVE STRAIN LIMIT EQUATIONS" *Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference IPC2014*, 2014.

[89] Myriam Iturgaiz Elso, "Finite Element Method studies on the stability behavior of cylindrical shells under axial and radial uniform and non-uniform loads", Department of Mechanical and Process Engineering Hochschule Niederrhein, 2012.

[90] Ajit Bastola, Junkan Wang, Ali Mirzaee-Sisan, James Njuguna, "PREDICTING HYDROSTATIC COLLAPSE OF PIPES USING FINITE ELEMENT ANALYSIS", Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2014, 2014.

[91] Tohru Yoshida, Eiji Isogai, Koichi Sato, Koji Hashimoto, "Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures", Nippon Steel Technical Report No. 103, 2013.

[92] J. Zrník, T. Kvackaj, D. Sripinproach, P. Sricharoenchai, "Influence of plastic deformation conditions on structure evolution in Nb–Ti microalloyed steel," Journal of Materials Processing Technology, vol. 133, p. 236-242, 2003.

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Python για την αναλυτική λύση της εξίσωσης του προτύπου DNV

```
import cmath

def collapse_pressure(x):

    #E,v,t,D,X,fo,afab

    E=x[0];v=x[16];t=x[35];D=x[48];X=x[53];fo=x[58];afab=x[59]

    pel=2*E*(t/D)**3/(1-v**2)

    pp=X*6.89475908677537*afab**2*t/D

    b=-pel

    c=-(pp**2+pp*pel*fo*D/t)

    d=pel*pp**2

    u=1/3*(-(b**2)/3+c)

    n=1/2*(2/27*b**3-1/3*b*c+d)

    F=cmath.acos(-n/cmath.sqrt((-u)**3))

    y=-2*cmath.sqrt(-u)*cmath.cos(F/3+60*cmath.pi/180)

    pc=y-1/3*b

    D_t = D/t

    #print(pc)

    pc_real = pc.real

    return pc_real,D_t,fo
```

Συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων (σύνθλιψη) και επιδεκτικότητας διαμόρφωσης σε σωλήνες για υποθαλάσσιους αγωγούς

Πίνακας στο Excel για το σχεδιασμό των δακτυλιδίων αγωγών με οβαλότητα στο ANSYS

| f_o=0.005 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
|----------------------------|----------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 197.425 | 196.275 |
| 457.2 | 28.58 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 200.595 | 199.445 |
| 457.2 | 25.4 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 203.775 | 202.625 |
| 457.2 | 22.23 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 206.945 | 205.795 |
| 457.2 | 19.05 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 210.125 | 208.975 |
| 457.2 | 15.88 | 458.35 | 456.05 | 0.00503062 | 229.175 | 228.025 | 213.295 | 212.145 |
| f_o=0.02 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 199.15 | 194.55 |
| 457.2 | 28.58 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 202.32 | 197.72 |
| 457.2 | 25.4 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 205.5 | 200.9 |
| 457.2 | 22.23 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 208.67 | 204.07 |
| 457.2 | 19.05 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 211.85 | 207.25 |
| 457.2 | 15.88 | 461.8 | 452.6 | 0.02012248 | 230.9 | 226.3 | 215.02 | 210.42 |
| f_o=0.04 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 201.425 | 192.275 |
| 457.2 | 28.58 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 204.595 | 195.445 |
| 457.2 | 25.4 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 207.775 | 198.625 |
| 457.2 | 22.23 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 210.945 | 201.795 |
| 457.2 | 19.05 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 214.125 | 204.975 |
| 457.2 | 15.88 | 466.35 | 448.05 | 0.04002625 | 233.175 | 224.025 | 217.295 | 208.145 |
| f_o=0.01 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 198 | 195.7 |
| 457.2 | 28.58 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 201.17 | 198.87 |
| 457.2 | 25.4 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 204.35 | 202.05 |
| 457.2 | 22.23 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 207.52 | 205.22 |
| 457.2 | 19.05 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 210.7 | 208.4 |
| 457.2 | 15.88 | 459.5 | 454.9 | 0.01006124 | 229.75 | 227.45 | 213.87 | 211.57 |
| f_o=0.03 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 200.2875 | 193.4125 |
| 457.2 | 28.58 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 203.4575 | 196.5825 |
| 457.2 | 25.4 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 206.6375 | 199.7625 |
| 457.2 | 22.23 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 209.8075 | 202.9325 |
| 457.2 | 19.05 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 212.9875 | 206.1125 |
| 457.2 | 15.88 | 464.075 | 450.325 | 0.03007437 | 232.0375 | 225.1625 | 216.1575 | 209.2825 |
| f_o=0.05 | | | | | Εξωτερική διάμετρος | | Εσωτερική διάμετρος | |
| D | t | D_{max} | D_{min} | f_o | D_{max}/2 | D_{min}/2 | D_{max}/2 | D_{min}/2 |
| 457.2 | 31.75 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 202.575 | 191.125 |
| 457.2 | 28.58 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 205.745 | 194.295 |
| 457.2 | 25.4 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 208.925 | 197.475 |
| 457.2 | 22.23 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 212.095 | 200.645 |
| 457.2 | 19.05 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 215.275 | 203.825 |
| 457.2 | 15.88 | 468.65 | 445.75 | 0.05008749 | 234.325 | 222.875 | 218.445 | 206.995 |