



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ**

**Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων ανοξείδωτων χαλύβων
σε κρυογενικές εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΚΑΡΑΒΙΑΣ

Επιβλέπων: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ**

**Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων ανοξείδωτων χαλύβων
σε κρυογενικές εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΩΝΙΔΑΣ ΚΑΡΑΒΙΑΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.....
ΗΛΙΑΝΑ ΧΑΛΙΚΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.....
ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.....

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Γεώργιο Φούρλαρη, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και Φυσικής Μεταλλουργίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς και για την προθυμία του να απαντήσει σε οποιεσδήποτε απορίες παρουσιάστηκαν κατά την εκπόνηση και τη διόρθωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Νικόλαο Μακρή και Σταύρο Δεληγιάνη οι οποίοι με βοήθησαν με τις γνώσεις τους στα διάφορα θέματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας αλλά και στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, όπως επίσης και τον Επίκουρο Καθηγητή Πέτρο Τσακιρίδη που με βοήθησε στις δοκιμές εφελκυσμού. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και το υπόλοιπο προσωπικό του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, τους υποψήφιους διδάκτορες Αναστασία Αλεξανδράτου και Άγγελο Καλδέλη, καθώς και τον τεχνικό του εργαστηρίου Γιάννη Χαραλαμπίτα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σύγχρονη τεχνολογία περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό μηχανημάτων και κατασκευών, που λειτουργούν ή χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μερικά παραδείγματα είναι οι δομικές κατασκευές, σωληνώσεις και αγωγοί οι οποίοι λειτουργούν υπό τους -40°C και συστήματα που μεταφέρουν και αποθηκεύουν υγρό άζωτο και υγροποιημένο φυσικό αέριο σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες έως και -196°C . Αυτά τα συστήματα και οι κατασκευές φτιάχνονται από υλικά που διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες σε αυτές τις θερμοκρασίες. Οι κοινί δομικοί χάλυβες της BCC μικροδομής γίνονται ψαθυροί σε αυτές τις θερμοκρασίες, ενώ οι ωστενιτικοί χάλυβες και άλλα κράματα της FCC μικροδομής διατηρούν την ολκιμότητα και την δυσθραυστότητα τους. Χάλυβες FCC μικροδομής είναι οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες της σειράς AISI 300 που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση και τη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Σε αυτή τη συγκεκριμένη έρευνα μελετάται ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας S32100, όσον αφορά τις μηχανικές του ιδιότητες, την μικροδομή και την θραυσίγενή του επιφάνεια με την βοήθεια του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM), ύστερα από δοκιμές εφελκυσμού σε θερμοκρασίες δωματίου και κρυογενικές. Η θερμοκρασία παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό του μετασταθού ωστενίτη σε μαρτενσίτη HCP και BCC μικροδομής. Επίσης, η ολκιμότητα, η μέγιστη εφελκυστική αντοχή και η δυσθραυστότητα επηρεάζονται σημαντικά με την πτώση της θερμοκρασίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Ανοξείδωτος Ωστενιτικός Χάλυβας SS32100, Κρυογενική Δοκιμή Εφελκυσμού, Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός, Θραυστογραφία

ABSTRACT

Modern technology includes a big number of devices and structures, which operate or are utilized at temperatures lower than the ambient temperature. Some examples are structural constructions, pipelines and tubes which work under -40°C and systems that transfer and store liquid nitrogen and liquefied natural gas at extremely low temperatures up to -196°C . These systems and structures are made of materials that maintain their mechanical properties at these temperatures. The common structural steels of BCC microstructure become brittle at these temperatures, while the austenitic steels and other alloys of FCC microstructure maintain their ductility and fracture toughness. Steels of FCC microstructure are the austenitic stainless steels of the AISI 300 series that are commonly used for storage and transfer of liquefied natural gas (LNG). In this particular research the austenitic stainless steel S32100 is investigated, in respect to its mechanical properties under cryogenic and room temperature tensile tests and regarding its microstructure and fracture surface with the support of scanning electron microscopy (SEM). The role of the temperature plays a significant part in the transformation of metastable austenite to martensite of HCP and BCC microstructure. Also ductility, ultimate tensile strength (UTS) and toughness are substantially affected by a decrease in temperature.

Keywords: Austenitic Stainless Steel SS32100, Cryogenic tensile testing, Scanning Electron Microscopy (SEM), Martensitic Transformation, Fractography

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΣΚΟΠΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

- 1.1. Κραματικές προσθήκες στους ανοξείδωτους χάλυβες.....7
- 1.2. Διάγραμμα Schaeffler για ανοξείδωτους χάλυβες.....12
- 1.3. Κατηγορίες ανοξείδωτων χάλυβων.....13
 - A. Φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.....13
 - B. Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.....16
 - C. Διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες (duplex)17
 - D. Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.....19
 - i. Μικροδομή.....20
 - ii. Κατακρήμιση καρβιδίων.....20
 - iii. Κατακρήμιση νιτριδίων.....22
 - iv. Κατακρήμιση καρβιδίων TiC και NbC.....23
 - v. Κατακρήμιση ενδομεταλλικών φάσεων.....24
 - vi. Σταθερότητα του ωστενίτη.....25
 - vii. Μηχανισμοί παραμόρφωσης και μαρτενσιτικός μετασχηματισμός.....26
 - viii. Τύποι ανοξείδωτων ωστενιτικών χάλυβων και ιδιότητές τους.....30
 - ix. Εφαρμογές.....32

2. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ(CRYOGENIC)

- 2.1. Εισαγωγή.....35
- 2.2. Υλικά για κρυογενικές εφαρμογές.....36

3. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

- 3.1. Καμπύλες μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης και μηχανικές ιδιότητες.....39
- 3.2. Καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης.....47
- 3.3. Μαθηματικές σχέσεις της καμπύλης ροής(flow curve)49

3.4. Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης(strain rate) και της θερμοκρασίας(temperature)	51
4. ΘΡΑΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
4.1. Όλκιμες και ψαθυρές θραύσεις.....	54
5. ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
5.1. Μακροσκοπικά και μικροσκοπικά γνωρίσματα της θραύσης.....	57
5.2. Θραυστογραφία ψαθυρών και όλκιμων θραύσεων.....	57

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	64
2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	65
3. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ(SEM).....	69

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	73
2. ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	82
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ.....	96

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
--------------------------	------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105
--------------------------	------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Τριμερές διάγραμμα Fe-Cr-Ni στους 900°C που δείχνει την ονομαστική σύνθεση του ανοξείδωτου χάλυβα 18-8. [7].....10

Εικόνα 2. Η επίδραση του άνθρακα στον βρόγχο γ(γ-loop) στο διμερές διάγραμμα Fe-Cr. [3].....11

Εικόνα 3. Τροποποιημένο διάγραμμα Schaeffler με ευτηκτική γραμμή στερεοποίησης. Πάνω από την ευτηκτική γραμμή, τα κράματα στερεοποιούνται στην προτεινόμενη ωστενιτική δομή, ενώ κάτω από την ευτηκτική γραμμή, τα κράματα στερεοποιούνται στην προτεινόμενη φερριτική δομή. [15].....12

Εικόνα 4. Διάγραμμα Ισορροπίας Σιδήρου-Χρωμίου(Fe-Cr) [3].....14

Εικόνα 5. Σκληρότητα και αντοχή στην κρούση του κράματος Fe-38%Cr κ.β αφού έχει υποστεί βαφή και έχει γηρανθεί στους 475°C για χρονικό διάστημα που υποδεικνύεται στο διάγραμμα. [11].....15

Εικόνα 6. Τυπικές συνθέσεις (%κ.β) κάποιων φερριτικών ανοξείδωτων χάλυβων. [11].....15

Εικόνα 7. Τυπικές συνθέσεις (%κ.β) κάποιων μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χάλυβων. [8].....17

Εικόνα 8. Εφαρμογές των διφασικών ανοξείδωτων χάλυβων σε βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, σε δεξαμενές ρυμουλκωμένων, στην χημική βιομηχανία, σε σωλήνες ζυθοποιείας και δεξαμενών και στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [8].....18

Εικόνα 9. Τυπικές συνθέσεις διφασικών ανοξείδωτων χάλυβων (%κ.β) και ορισμένες μηχανικές ιδιότητες τους. Ο A219 είναι υπερ-διφασικός ανοξείδωτος χάλυβας. [8].....19

Εικόνα 10. Η επίδραση του άνθρακα στο φαινόμενο της ευαισθητοποίησης [8].....21

Εικόνα 11. Κατακρήμνιση του καρβιδίου του χρωμίου στα όρια των κόκκων και γύρω από αυτά οι περιοχές που είναι ευαίσθητες στην διάβρωσή, λόγω μείωσης του ποσοστού του χρωμίου. [8].....22

Εικόνα 12. Εξαγωνική Κρυσταλλική Δομή (H.C.P) [22].....28

Εικόνα 13. Μικροδομή ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα SS304 έπειτα από κρυογενική έλαση στους -196°C με 10% παραμόρφωση. Παρατηρείται αριστερά της εικόνας μαρτενσίτης α' και δεξιά μαρτενσίτης ε. Η μικρογραφία είναι από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης(SEM) [28].....29

Εικόνα 14. Η επίδραση της μείωσης του περιεχόμενου νικελίου στις καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης ανοξείδωτων ωστενιτικών χάλυβων [11].....30

- Εικόνα 15. Χημικές συστάσεις %κ.β των πιο κοινών ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων. [11].....31
- Εικόνα 16. Δεξαμενή αποθήκευσης φτιαγμένη από ανοξειδωτο ωστενιτικό χάλυβα. [42].....33
- Εικόνα 17. Σωλήνες εναλλάκτη θερμότητας φτιαγμένοι από ωστενιτικό ανοξειδωτο χάλυβα S321/S321 H [24].....34
- Εικόνα 18. Θερμοκρασίες υγροποίησης κάποιων κρυογενικών υγρών. [26].....35
- Εικόνα 19. Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς Υγροποιημένου φυσικού αερίου(LNG) [29].....38
- Εικόνα 20 . Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού [31].....39
- Εικόνα 21. Τύποι δοκιμίων εφελκυσμού: Flat test piece=δοκίμιο τύπου ελάσματος(ορθογωνικής διατομής) , Round test piece= δοκίμιο τύπου ράβδου(κυκλικής διατομής). Gauge length= ωφέλιμο μήκος δοκιμίου και Cross-sectional area= κεντρικό τμήμα δοκιμίου από όπου μετρείται η επιμήκυνση. [32].....40
- Εικόνα 22. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης. [33].....41
- Εικόνα 23. Τυπική καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης για όλκιμο μέταλλο παρουσιάζοντας τα κριτήρια διαρροής. A: όριο ελαστικότητας , A': όριο αναλογίας , B: όριο διαρροής ή συμβατικό όριο διαρροής(0,2%ε) [33].....43
- Εικόνα 24. Τυπική συμπεριφορά σημείου διαρροής σε χάλυβα με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας [33].....44
- Εικόνα 25. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης 3 διαφορετικών χαλύβων. Το εμβαδό των γραμμοσκιασμένων περιοχών κάτω από τις καμπύλες τους αποτελεί την δυσθραυστότητα των χαλύβων. [35].....46
- Εικόνα 26. Σύγκριση των καμπύλων πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης και μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης. Η ελαστική περιοχή έχει συμπιεστεί στον άξονα τον y λόγω των σχετικά μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων. [33].....48
- Εικόνα 27. Λογαριθμική αναπαράσταση της καμπύλης πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης , με n συντελεστή ενδοτράχυνσης και K συντελεστή αντοχής. [33].....49
- Εικόνα 28. Διάφορες μορφές της καμπύλης ροής $\sigma = K \cdot \epsilon^n$, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει ο συντελεστής ενδοτράχυνσης n [33].....49
- Εικόνα 29 . Εύροι ρυθμών παραμόρφωσης σε κοινές δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων [33].....51
- Εικόνα 30. Ρυθμοί παραμόρφωσης και συναφή όργανα και πειραματικές συνθήκες [33].....52
- Εικόνα 31. Μια τυπική θραύση τύπου κώνου και κούπας(cup and cone) ενός όλκιμου μετάλλου έπειτα από δοκιμή εφελκυσμού. [40].....55

- Εικόνα 32. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου εφελκυσμού χάλυβα 4340 . Στο κέντρο της επιφάνειας θραύσης είναι η ινώδης επιφάνεια θραύσης(Fibrous zone) και περιμετρικά εκτείνεται το χείλος διάτμησης(Shear lip) [37].....55
- Εικόνα 33. Ψαθυρή κρυσταλλική θραύση δοκιμίου εφελκυσμού χρυσοσιδήρου [37].....56
- Εικόνα 34. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει τα σχεδόν ισομετρικά κοιλώματα(equiaxed dimples) μιας όλκιμης θραύσης [40].....58
- Εικόνα 35. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει τα επιμηκυμένα κοιλώματα(elongated dimples) μιας όλκιμης θραύσης [40].....59
- Εικόνα 36. Chevron marks ή Herringbone pattern σε μια επιφάνεια θραύσης. [40].....60
- Εικόνα 37. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια θραύση διακρυσταλλικού σχισμού(transgranular cleavage fracture) [40].....61
- Εικόνα 38. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια περικρυσταλλική θραύση(intergranular fracture). [40].....62
- Εικόνα 39. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια θραύση ημι-σχισμού(quasi-cleavage fracture). [40].....63
- Εικόνα 40. Εγκυβωτισμένο δοκίμιο πάνω στη μηχανή εφελκυσμού. Ο πυθμένας του μπουκαλιού είναι κολλημένος στο τέλος του ωφέλιμου μήκους, κοντά στο καμπύλο τμήμα του δοκιμίου(radius). Τα grips του δοκιμίου βρίσκονται εκτός μπουκαλιού και είναι τοποθετημένα στις δαγκάνες της μηχανής.....66
- Εικόνα 41. Το χωνί με το οποίο μεταφέραμε το μίγμα αιθανόλης και υγρού αζώτου ή σκέτου υγρού αζώτου. Το κίτρινο καλώδιο είναι το θερμοστοιχείο που ήταν βυθισμένο στο μπουκάλι με το δοκίμιο και συνδεδεμένο με θερμομέτρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας.....67
- Εικόνα 42. Το δοχείο στο οποίο γινόταν η ανάμιξη αιθανόλης και υγρού αζώτου προτού μεταφερθεί στο μπουκάλι με το δοκίμιο.....68
- Εικόνα 43. Σχηματική αναπαράσταση κοπής, ωφέλιμου μήκους δοκιμίου και θραυστιγενούς επιφάνειας.....69
- Εικόνα 44. Σχηματική αναπαράσταση δείγματος δοκιμίου στο οποίο παρουσιάζεται η θραυστιγενής επιφάνεια και η εξεταζόμενη επιφάνεια.....70
- Εικόνα 45. Μικρογραφία SEM x500 του ‘As-received’ δείγματος 321.....82
- Εικόνα 46. Μικρογραφία SEM x1000 του ‘As-received’ δείγματος 321.....84
- Εικόνα 47. Μικρογραφία SEM x2000 του ‘As-received’ δείγματος 321.....85
- Εικόνα 48. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους 25°C.....87

Εικόνα 49. Μικρογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους 25°C.....	88
Εικόνα 50. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους - 50°C.....	89
Εικόνα 51. Μικρογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους - 50°C.....	90
Εικόνα 52. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους - 190°C.....	91
Εικόνα 53. Μικρογραφία SEM x750 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	92
Εικόνα 54. Μικρογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	93
Εικόνα 55. Μικρογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	94
Εικόνα 56. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους 25°C.....	96
Εικόνα 57. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους 25°C.....	97
Εικόνα 58. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους 25°C.....	97
Εικόνα 59. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους 25°C.....	98
Εικόνα 60. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 50°C.....	100
Εικόνα 61. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 50°C.....	101
Εικόνα 62. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	102
Εικόνα 63. Θραυστογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	102
Εικόνα 64. Θραυστογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους - 190°C.....	103

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους 25°C.....	73
---	----

Διάγραμμα 2. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους -50°C.....	74
Διάγραμμα 3. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους -190°C.....	75
Διάγραμμα 4. Καμπύλες μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης του SS321 στις θερμοκρασίες δοκιμών.	76
Διάγραμμα 5. Η ολκιμότητα του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.....	77
Διάγραμμα 6. Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.....	78
Διάγραμμα 7. Το όριο διαρροής 0,2% του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.....	79
Διάγραμμα 8. Η δυσθραυστότητα του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.	80
Διάγραμμα 9. Αναλογία Ενδοτράχυνσης του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.....	81

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού μορφής ‘dog-bone’ του 321 με βάση το πρότυπο ASTM E 8M-04.....	64
Πίνακας 2. Η μέση χημική σύσταση του υλικού 321(AISI TYPE 321 STAINLESS STEEL)	64
Πίνακας 3. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους 25°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s ⁻¹	73
Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους -50°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s ⁻¹	74
Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους -190°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s ⁻¹	75
Πίνακας 6. Αναλογία ενδοτράχυνσης του 321 στις θερμοκρασίες δοκιμών.....	81

ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να συνδέσει τις μηχανικές ιδιότητες με τις μικροδομικές αλλαγές που προκύπτουν ύστερα από εφελκυσμό σε κρυογενικές θερμοκρασίες του όχι και τόσο ευρέως χρησιμοποιούμενου ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα 321 σε κρυογενικές εφαρμογές.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ανοξείδωτος χάλυβας δεν είναι ένα μόνο απλό υλικό αλλά ένα υλικό που φέρει το όνομα μιας οικογένειας χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση. Όπως και πολλές επιστημονικές ανακαλύψεις, η προέλευση του ανοξείδωτου χάλυβα βρίσκεται σε ένα σοβαρό ατύχημα. Το 1913 στο Σέφιλντ της Αγγλίας, ο Χάρι Μπρέαρλι διερευνούσε την ανάπτυξη νέων κραμάτων χάλυβα για χρήση σε κάννες όπλων. Παρατήρησε ότι μερικά από τα δείγματα του δεν σκούριαζαν και ήταν δύσκολο να προσβληθούν χημικά. Αυτά τα κράματα περιείχαν περίπου 13% χρώμιο. [1]

Η πρώτη εφαρμογή αυτών των χαλύβων ήταν στα μαχαιροπίρουνα για τα οποία ο Σέφιλντ έγινε στη συνέχεια παγκοσμίως διάσημος. Ταυτόχρονη εργασία στη Γαλλία οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. [1]

Η παγκόσμια ζήτηση ανοξείδωτου χάλυβα αυξάνεται με ρυθμό περίπου 5% ετησίως. Η ετήσια κατανάλωση υπερβαίνει σήμερα τα 20 εκατομμύρια τόνους και αυξάνεται σε τομείς όπως ο κατασκευαστικός κλάδος και οι οικιακές συσκευές. Νέες χρήσεις και εφαρμογές βρίσκονται συνεχώς, όπως στην αεροναυπηγική, την ναυπηγική, στα εργοστάσια παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, στην πετροχημική βιομηχανία ακόμα και στην αρχιτεκτονική για την ελκυστική εμφάνιση, την αντοχή στη διάβρωση, τη χαμηλή συντήρηση και την μηχανική αντοχή του ανοξείδωτου χάλυβα. Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ακριβότερος από τους συνήθεις τύπους χάλυβα, αλλά έχει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση, χρειάζεται χαμηλή συντήρηση και δεν χρειάζεται βερνίκωμα ή άλλες προστατευτικές επικαλύψεις. Αυτοί οι παράγοντες σημαίνουν ότι ο ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να είναι πιο οικονομικά βιώσιμος αφού ληφθεί υπόψη το κόστος ζωής και το κόστος κύκλου ζωής. [1]

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι κράμα σιδήρου, άνθρακα και χρωμίου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 10,5 % κ.β. Είναι η ελάχιστη περιεκτικότητα που πρέπει να έχει ένας χάλυβας σε χρώμιο, ώστε να αποκαλείται ανοξείδωτος και ουσιαστικά να αποκτά αυτόν τον αντιδιαβρωτικό χαρακτήρα που του προσδίδει το συγκεκριμένο στοιχείο. Χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στη διάβρωση, για λόγους οικονομικούς, για λόγους αισθητικούς ή για λόγους υγιεινής. Σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες(κοινούς ανθρακούχους), οι ανοξείδωτοι χάλυβες, εκτός από την πολύ υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση, παρουσιάζουν επιπλέον και υψηλότερη μηχανική αντοχή.Επίσης, παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, υψηλότερη δυσθραυστότητα σε κρουγενικές θερμοκρασίες, υψηλότερο ποσοστό σκλήρωσης με παραμόρφωση, υψηλότερη ολκιμότητα και υψηλότερη αντοχή και σκληρότητα. [2] , [3] ,[4]

1.1 Κραματικές προσθήκες στους ανοξείδωτους χάλυβες

Εκτός από χρώμιο, οι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορεί να περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία, όπως νικέλιο Ni, μολυβδαίνιο Mo, μαγγάνιο Mn κλπ. Ανάλογα με τις κραματικές προσθήκες μπορεί να καθοριστεί η κύρια φάση ή οι κύριες φάσεις στην κρυσταλλική τους δομή αλλά και να προσδωθούν διάφορες ιδιότητες(φυσικές και μηχανικές). Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες εξαιτίας της τάσης τους να προωθούν είτε την ωστενιτική είτε τη φερριτική μικροδομή. Παρακάτω αναφέρονται τα στοιχεία ενίσχυσης της φερριτικής μικροδομής(α-φερρογόνα), τα στοιχεία ενίσχυσης της ωστενιτικής μικροδομής(γ-φερρογόνα) και συνοπτικά οι κυριότερες επιδράσεις αυτών των κραματικών στοιχείων στους ανοξείδωτους χάλυβες. [2] , [3] , [4]

Στοιχεία ενίσχυσης φερριτικής μικροδομής(α-φερρογόνα) και οι επιδράσεις τους

Χρώμιο(Cr): Αποτελεί βασικό κραματικό στοιχείο των ανοξείδωτων χαλύβων. Προστίθεται στους χάλυβες για να αυξηθεί η αντοχή τους στην διάβρωση. Η αντοχή αυτή αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χρώμιο. Το χρώμιο βελτιώνει την αντοχή του χάλυβα στην διάβρωση με το σχηματισμό ενός πολύ λεπτού,σταθερού,αναγεννητικού και παθητικού στρώματος του οξειδίου του χρωμίου(Cr_2O_3) στην επιφάνεια του. Με τον όρο παθητικό εννοούμε ότι η αντίδραση του μετάλλου με το περιβάλλον της, για παράδειγμα το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, σχηματίζει ένα προστατευτικό επιφανειακό στρώμα που είναι ενιαίο και σταματάει την περαιτέρω αντίδραση της οξείδωσης. Αν το στρώμα έχει καταστραφεί ή ρωγματωθεί τότε το χρώμιο ξανά αντιδρά και σχηματίζει πάλι το προστατευτικό αυτό στρώμα. Το στρώμα αυτό για να παραμείνει σταθερό και να λειτουργήσει παθητικά πρέπει το ποσοστό του χρωμίου στον χάλυβα να είναι μεγαλύτερο του 11% κ.β. Στην θερμοκρασία περιβάλλοντος το πάχος του προστατευτικού στρώματος οξειδίου που αναπτύσσεται αυτόματα δεν υπερβαίνει τα 10-30 nm. Επίσης το χρώμιο αποτελεί το βασικό συστατικό στο σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων, πολλές από τις οποίες τείνουν να ψαθυροποιήσουν τους ανοξείδωτους χάλυβες(σ,α*,χ,Laves). Τέλος το

χρόμιο ευνοεί το σχηματισμό φερρίτη, συμπιέζοντας την ωστενιτική περιοχή(γ -loop) και τον διατηρεί σε πολλές κατηγορίες ανοξειδωτων χαλύβων. [2] , [4] , [5] , [6]

Μολυβδαίνιο(Mo): Το μολυβδαίνιο προστίθεται στους ανοξειδωτους χάλυβες σε ποσοστό πάνω από 8% και πιο συνηθισμένα σε εύρος 2-4%. Ακόμα και μικρές σχετικά ποσότητες μολυβδαινίου έχουν ισχυρές επιδράσεις στην βελτίωση της αντοχής στην διάβρωση οπών(Pitting corrosion) σε χλωριούχα περιβάλλοντα και στην διάβρωση χαραγών(Crevice corrosion).Επίσης μειώνει την ένταση της οξειδωτικής επίδρασης που απαιτείται για να εξασφαλιστεί η παθητικότητα και μειώνει την τάση να καταστραφούν τα προηγούμενα παθητικά στρώματα.Επιπλέον μειώνει ελαφρά την αντοχή στην οξείδωση υψηλής θερμοκρασίας. Το μολυβδαίνιο είναι ισχυρό α-φερρογόνο στοιχείο και συστέλλει έντονα την ωστενιτική περιοχή(γ -loop). [2] , [4] , [5] , [6]

Νιόβιο(Nb): Στους μικροκραματωμένους χάλυβες , οι μηχανισμοί σκλήρωσης βασίζονται στην κατακρήμνιση λεπτών και διασκορπισμένων καρβιδίων (NbC). Απο την άλλη στους ανοξειδωτους χάλυβες , όσον αφορά την διάβρωση , είναι γνωστό ότι η σταθεροποίηση των φάσεων με προσθήκες Nb , αποτρέπει τον κίνδυνο της περικρυσταλλικής διάβρωσης στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες(HAZ) π.χ μετά από συγκόλληση. Για να αποφευχθεί αυτό , το νιόβιο προστίθεται σε επαρκείς ποσότητες , ανάλογα με τα επίπεδα άνθρακα και αζώτου. Η θεωρητική ποσότητα του νιοβίου που απαιτείται για την πλήρη σταθεροποίηση με βάση τον στοιχειομετρικό υπολογισμό περιγράφεται από την εξίσωση :

$$\%Nb \geq 0.2 + 5 (\%C + \%N)$$

Στους φερριτικούς ανοξειδωτους χάλυβες , η προσθήκη νιοβίου είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την βελτίωση της αντοχής στην θερμική κόπωση. Στους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες , η προσθήκη νιοβίου αυξάνει σημαντικά το όριο διαρροής. Επίσης αποτελεί και αυτό α-φερρογόνο και συστέλλει τον βρόγχο του ωστενίτη. [2] , [4] , [5] , [6]

Τιτάνιο(Ti): Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σταθεροποιητικό στοιχείο για ανοξειδωτο χάλυβα είναι το τιτάνιο. Το τιτάνιο είναι ένα εξαιρετικά αντιδραστικό στοιχείο το οποίο σχηματίζει σταθερό κατακρήμνισμα TiN στην υγρή φάση, παρουσία αζώτου (N). Παρουσία και των δύο C και N, σχηματίζονται τα νιτρίδια του τιτανίου TiN(στην υγρή φάση) και τα καρβίδια του τιτανίου TiC (στη στερεά φάση), όπου τα τελευταία περιβάλλουν τα πρώτα. Η στοιχειομετρική ποσότητα Ti που απαιτείται για πλήρη σταθεροποίηση περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ti \geq 4 (\% C) + 3,4 (\% N)$$

Ωστόσο, απαιτούνται μεγαλύτερα επίπεδα τιτανίου για πλήρη σταθεροποίηση, επειδή το τιτάνιο αντιδρά με το θείο για να σχηματίσει σταθερά σουλφίδια τιτανίου, Ti₂S. Στην πράξη, η γενικά αποδεκτή ποσότητα Ti που απαιτείται για την πλήρη σταθεροποίηση ενός ανοξειδωτου χάλυβα πρέπει να πληρεί τα ακόλουθα κριτήρια:

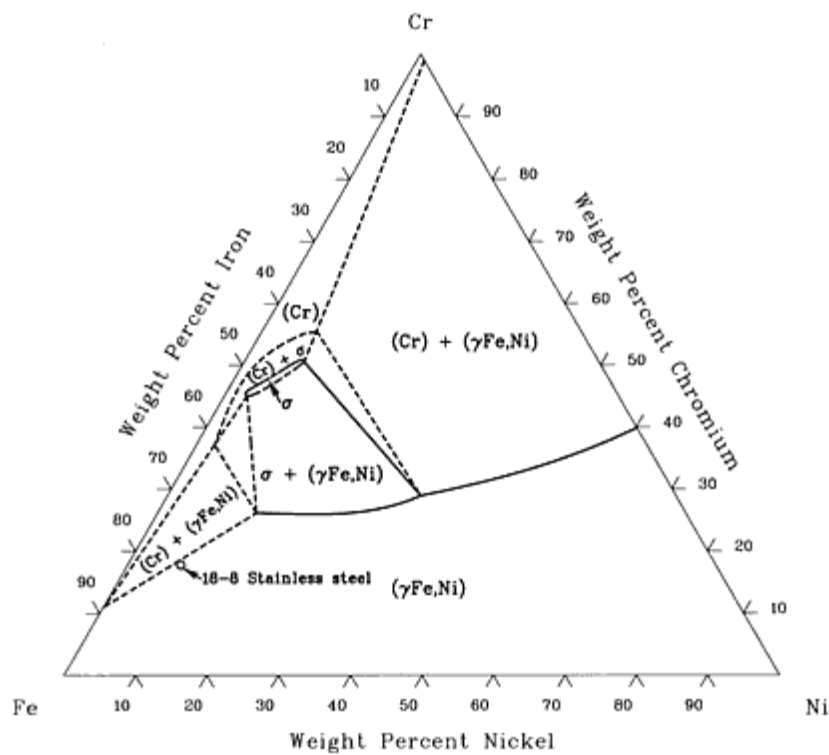
$$Ti \geq 0,15 + 4 (\% C + \% N)$$

Το τιτάνιο βελτιώνει επίσης την αντοχή στη διάβρωση οπών(pitting corrosion) λόγω του ότι τα σταθερά Ti_2S σχηματίζονται κατά προτίμηση από τα σουλφίδια μαγγανίου (MnS) , τα οποία είναι γνωστό ότι δρουν ως θέσεις εκκίνησης της διάβρωσης οπών. Στους χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, το τιτάνιο έχει έντονη επιθυμία να ενωθεί με τον άνθρακα, το άζωτο και το οξυγόνο. Όταν διαλύεται σε χάλυβα, το τιτάνιο πιστεύεται ότι αυξάνει τη σκληρότητα. Ωστόσο, η τάση σχηματισμού καρβιδίου αυτού του στοιχείου είναι τόσο ισχυρή που συχνά βρίσκεται στη δομή του χάλυβα ως αδιάλυτο καρβίδιο και με αυτόν τον τρόπο μειώνει την ικανότητα περαιτέρω σκληρόνσεως. Βέβαια επειδή το καρβίδιο του τιτανίου παραμένει αδιάλυτο και σταθερό βοηθάει στην μείωση εμφάνισης περικρυσταλλικής διάβρωσης στους ανοξειδωτους χάλυβες, αφού δεσμεύει τον άνθρακα και δεν σχηματίζονται τα επιβλαβή καρβίδια του χρωμίου. Τέλος το τιτάνιο προωθεί το σχηματισμό του φερρίτη και περιορίζει την ωστενιτική περιοχή(γ -loop). [2] , [4] , [5] , [6]

Πυρίτιο(Si): Σε μικρές ποσότητες το πυρίτιο προσδίδει ήπια σκληρότητα στους χάλυβες. Το πυρίτιο προστίθεται συνήθως στους ανοξειδωτους χάλυβες , με σκοπό την βελτίωση της αντοχής τους στην οξείδωση. Είναι ένα στοιχείο που σταθεροποιεί τον φερρίτη(α -φερρογόνο). Επίσης στους ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες , η υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο όχι μόνο βελτιώνει την αντοχή στην οξείδωση αλλά προλαμβάνει την ενανθράκωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμα το πυρίτιο χρησιμοποιείται και ως αποξειδωτικό μέσο κατά την τήξη του χάλυβα. [2] , [4] , [5] , [6]

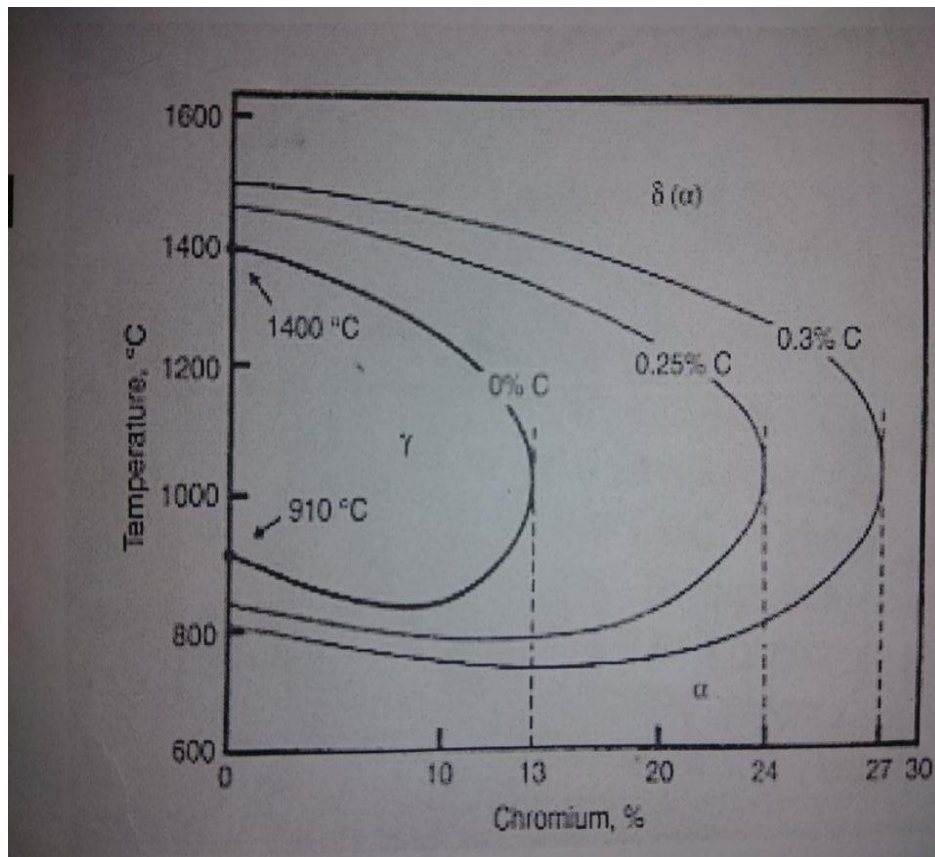
Στοιχεία ενίσχυσης ωστενιτικής μικροδομής(γ -φερρογόνα) και οι επιδράσεις τους

Νικέλιο(Ni): Σε αντίθεση με το χρώμιο, το νικέλιο είναι πιο ευγενές στοιχείο από τον σίδηρο , και η προστατευτική του δράση δεν προκύπτει από τον σχηματισμό ενός επικαλυπτικού οξειδίου , αλλά από το γεγονός ότι κάνει το κράμα πιο ευγενές. Έτσι το καθιστά ανθεκτικό όχι μόνο σε σαφώς οξειδωτικές ατμόσφαιρες , αλλά ακόμη και σε ελαφρά οξειδωτικά ή αναγωγικά περιβάλλοντα. Το νικέλιο ως ισχυρά γ -φερρογόνο στοιχείο , προκαλεί δομικούς μετασχηματισμούς και σταθεροποιεί τον ωστενίτη, αποτελώντας βασική κραματική προσθήκη για την παραγωγή ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων. Με προσθήκη νικελίου μεγαλύτερη από 8% ο ωστενίτης(σε μετασταθή κατάσταση) μπορεί να διατηρηθεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και χαμηλότερες (Εικόνα 1). Επίσης το νικέλιο αυξάνει σε σημαντικό βαθμό τα μηχανικά χαρακτηριστικά και μεταξύ αυτών την δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες(κρυογενικές) και την αντοχή σε ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυξάνει επίσης την συγκολλησιμότητα. [2] , [4] , [5] , [6]



Εικόνα 1. Τριμερές διάγραμμα Fe-Cr-Ni στους 900^oC που δείχνει την ονομαστική σύνθεση του ανοξειδώτου χάλυβα 18-8. [7]

Άνθρακας (C): Ο ρόλος του άνθρακα είναι πολυσύνθετος. Μπορεί να εξυπηρετεί ορισμένες σκοπιμότητες όταν προστίθεται στο κράμα (π.χ αύξηση της αντοχής), όμως αποτελεί αρνητικό στοιχείο σχετικά με την αντοχή στην διάβρωση. Ο άνθρακας δεν σχηματίζει καρβίδια με το νικέλιο, αλλά σχηματίζει με το χρώμιο , το οποίο είναι πολύ ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο, ισχυρότερο από τον σίδηρο και το μαγγάνιο. Έτσι ο άνθρακας δεσμεύει χρώμιο υπό την μορφή καρβιδίων, ώστε η μήτρα του κράματος να γίνεται φτωχότερη σε χρώμιο και επομένως πιο ευκολοδιάβρωτη. Επίσης με την δημιουργία καρβιδίων στο κράμα(π.χ χρωμίου) ευνοείται ο σχηματισμός τοπικών γαλβανικών στοιχείων διάβρωσης. Εκτενέστερη αναφορά για τα καρβίδια του χρωμίου γίνεται παρακάτω. Ακόμα η προσθήκη άνθρακα επεκτείνει το βρόγχο γ(γ-loop) (Εικόνα 2). Βέβαια πρέπει να υπάρχει ένα όριο προσθήκης άνθρακα προκειμένου να μην υπάρξει μεγάλη κατακρήμνιση των επιβλαβών καρβιδίων του χρωμίου που προαναφέρθηκαν. [2] , [3] , [4] , [5] , [6]



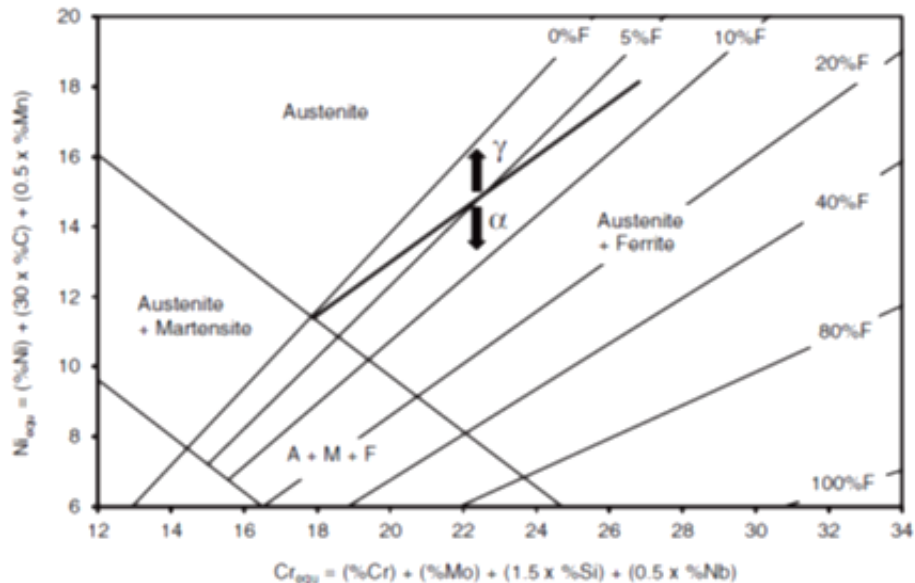
Εικόνα 2. Η επίδραση του άνθρακα στον βρόγχο γ(γ-loop) στο διμερές διάγραμμα Fe-Cr. [3]

Άζωτο(N): Το άζωτο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του ωστενίτη στους ανοξειδωτους χάλυβες. Όπως και ο άνθρακας, επεκτείνει το βρόγχο γ-loop του ωστενίτη στο διάγραμμα σιδήρου-χρωμίου και μπορεί και τον διατηρεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Με την προσθήκη αζώτου βελτιώνεται επίσης το όριο διαρροής όπως και η αντοχή στην διάβρωση οπών(pitting corrosion) και στην περικρυσταλλική διάβρωση. Αυτό συμβαίνει λόγω της κατακρήμνισης Cr_2N αντί για $Cr_{23}C_6$. [2] , [4] , [5] , [6]

Μαγγάνιο(Mn): Το μαγγάνιο προστίθεται συνήθως για να βελτιώσει τις ιδιότητες του χάλυβα κατά την θερμή διαμόρφωση και να αυξήσει την αντοχή, την δυσθραυστότητα και την σκληρότητα. Το μαγγάνιο όπως και το νικέλιο είναι ένα στοιχείο που ευνοεί τον σχηματισμό του ωστενίτη και επεκτείνει την ωστενιτική περιοχή έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δεν έχει την ίδια επίδραση που έχει το νικέλιο ως γ-φερρογόνο αλλά χρησιμοποιείται συχνά ως υποκατάστατο του νικελίου για λόγους οικονομικούς. [2] , [4] , [5] , [6]

1.2 Διάγραμμα Schaeffler για ανοξείδωτους χάλυβες

Με βάση τα κραματικά στοιχεία που αναλύθηκαν παραπάνω και τις συστάσεις τους μπορεί να καθοριστεί μέσω του διαγράμματος Schaeffler η αναμενόμενη μικροδομή των ανοξείδωτων χάλυβων. [3] , [4]



Εικόνα 3. Τροποποιημένο διάγραμμα Schaeffler με ευτηκτική γραμμή στερεοποίησης. Πάνω από την ευτηκτική γραμμή, τα κράματα στερεοποιούνται στην προτιμώμενη ωστενιτική δομή, ενώ κάτω από την ευτηκτική γραμμή, τα κράματα στερεοποιούνται στην προτιμώμενη φερριτική δομή. [15]

Οι άξονες του διαγράμματος (Εικόνα 3) δεν είναι απλά χρώμιο ή νικέλιο αλλά ισοδύναμο χρώμιο και νικέλιο. Κατά αυτόν τον τρόπο η επίδραση και άλλων κοινών κραματικών στοιχείων ενπεριέχεται:

$$\%Ni_{equivalent} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0,5(\%Mn) + 0,3(\%Cu)$$

$$\%Cr_{equivalent} = \%Cr + 2(\%Si) + 1,5(\%Mo) + 5,5(\%Al) + 5(\%V) + 1,75(\%Nb) + 1,5(\%Ti) + 0,75(\%W)$$

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται η ύπαρξη μονοφασικών περιοχών A=ωστενίτης, F=φερρίτης, M=μαρτενσίτης, διφασικών περιοχών, A+M, A+F και της τριφασικής περιοχής A+M+F. [3] , [4]

Αν και ο ωστενίτης παραμένει μετασταθής στην θερμοκρασία δωματίου, δεν είναι σταθερή φάση. Με παραμόρφωση εν ψυχρώ μπορεί να μετασχηματιστεί είτε σε φερρίτη είτε σε μαρτενσίτη, και κατά αυτόν τον τρόπο σκληρώνεται με τέτοιο βαθμό άμεσα εξαρτώμενο από την σύσταση. Το 'μικρό τρίγωνο' κάτω αριστερά στο διάγραμμα ουσιαστικά αναφέρεται σε ανοξείδωτους χάλυβες που απαρτίζονται από φερρίτη και μαρτενσίτη(περιοχή F+M). [3] , [4]

1.3 Κατηγορίες ανοξειδωτων χάλυβων

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται με βάση την κύρια φάση ή τις κύριες φάσεις στην κρυσταλλική δομή τους σε:

Μαρτενσιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες, που περιέχουν περίπου 12% Cr και 0,1% C κ.β ως βασική σύνθεση , οδηγώντας σε μια πλήρως μαρτενσιτική μικροδομή σε θερμοκρασία δωματίου. [2] , [4] , [8]

Φερριτικούς ανοξειδωτους χάλυβες, που περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες χρωμίου , οι οποίες σταθεροποιούν την φερριτική φάση. [2] , [4] , [8]

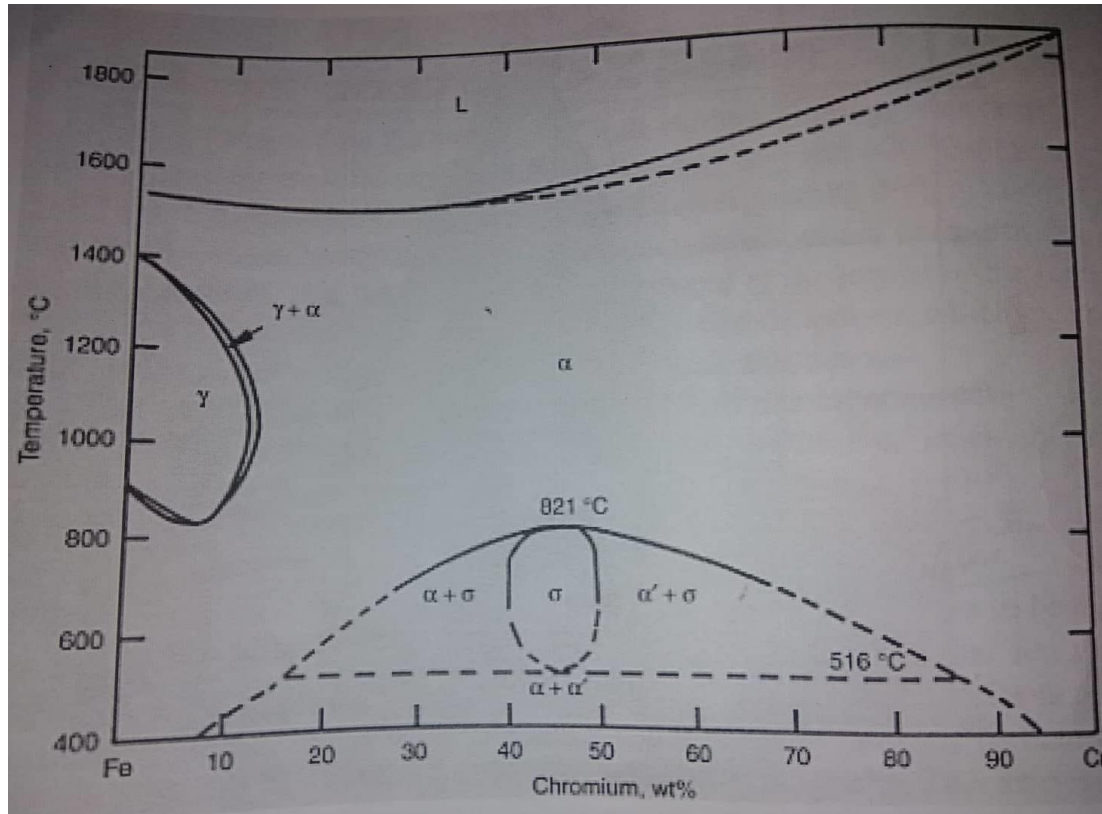
Ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες, που τυπικά περιέχουν 18% Cr και 8% Ni κ.β. Το νικέλιο εξισορροπεί την επίδραση του χρωμίου , σταθεροποιώντας την ωστενιτική φάση. [2] , [4] , [8]

Διφασικούς ανοξειδωτους χάλυβες, που απαρτίζονται από φερρίτη και ωστενίτη κατά προσέγγιση 50/50-ωστενίτη/φερρίτη. [2] , [4] , [8]

A. Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Πρόκειται για ανοξειδωτους χάλυβες με κύρια φάση το φερρίτη (α -Fe). Περιέχουν 10,5-30% χρώμιο, αλλά ελάχιστο ή καθόλου νικέλιο (<2%). Ωστόσο περιέχουν και μικρότερες ποσότητες από άλλα κραματικά στοιχεία όπως το μολυβδαίνιο, το τιτάνιο και το νιόβιο. Γενικά είναι φθηνότεροι από τις υπόλοιπες κατηγορίες ανοξειδωτων χάλυβων και συνήθως έχουν πολύ καλύτερη αντοχή στην μηχανική καταπόνηση σε διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτοί οι χάλυβες, ιδιαίτερα στα υψηλότερα επίπεδα χρωμίου, έχουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση σε πολλά περιβάλλοντα, αλλά παρουσιάζουν έντονη ευθραυστότητα. Αυτό προκύπτει εν μέρει από τα στοιχεία παρεμβολής, τον άνθρακα και το άζωτο. Για παράδειγμα ένας ανοξειδωτος φερριτικός χάλυβας με περιεκτικότητα 25% Cr κ.β θα είναι κανονικά ψαθυρός σε θερμοκρασία δωματίου , εάν η περιεκτικότητα σε άνθρακα υπερβαίνει το 0,03% κ.β. Ένας πρόσθετος παράγοντας είναι ότι η απουσία μιας αλλαγής φάσης καθιστά πιο δύσκολη την εκλέπτυνση του μεγέθους κόκκων του φερρίτη , το οποίο μπορεί να γίνει χονδροειδές μετά από κατεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (π.χ συγκόληση). Αυτό αυξάνει περαιτέρω την θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση του χάλυβα , η οποία είναι ήδη υψηλή από την παρουσία των στοιχείων παρεμβολής. Ευτυχώς οι σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής χάλυβα , όπως η μέθοδος AOD(Argon Oxygen Degassing) μειώνει τα ποσοστά των στοιχείων παρεμβολής(C και N) κάτω από το 0,03% , με αποτέλεσμα φερριτικούς ανοξειδωτους χάλυβες με βελτιωμένη όλκιμότητα και δυσθραυστότητα. Παρόλο τα ελεγχόμενα ποσοστά άνθρακα και αζώτου οι φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες, συγκρινόμενοι με την ωστενιτική οικογένεια ανοξειδωτων , έχουν χαμηλότερη όλκιμότητα και υποφέρουν επίσης από ψαθυροποίηση. Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία και ορισμένοι τύποι αυτής της οικογένειας έχουν χαμηλή συγκολλησιμότητα. Η εν ψυχρώ παραμόρφωση δεν αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε θραύση αλλά ελατώνει ουσιαστικά την

ολκιμότητα. Η αντοχή σε θραύση των φερριτικών ανοξειδωτών χαλύβων σπάνια υπερβαίνει τα 600 MPa. Το μεγαλύτερο ποσοστό της αυξημένης τους καταπόνησης βρίσκεται σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου οι σιγαστήρες και τα συστήματα εξάτμισης κατασκευάζονται πλέον από φερριτικούς ανοξειδωτούς χάλυβες. [3], [4], [8], [11]



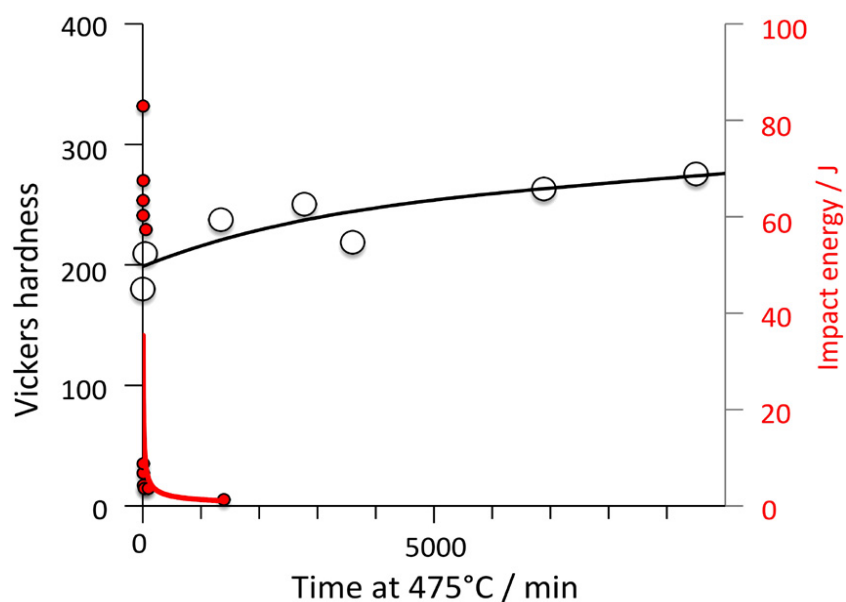
Εικόνα 4. Διάγραμμα Ισορροπίας Σιδήρου-Χρωμίου(Fe-Cr) [3]

Ψαθυροποίηση στους 475°C

Οι φερριτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες που είναι πλούσιοι σε χρώμιο όταν θερμαίνονται μεταξύ των 400°C και 500°C αναπτύσσουν ένα τύπο ευθραυστότητας ή ψαθυρότητας, γνωστού ως ψαθυροποίηση στους 475°C (Εικόνα 4). Η αιτία είναι η κατακρήμνιση μιας υπομικροσκοπικής φάσης πλούσιας σε χρώμιο (bcc α*). Η φάση αυτή παραμένει συνεκτική με την μήτρα σιδήρου/χρωμίου, παρεμποδίζοντας όμως την πλαστική παραμόρφωση μέσω μηχανισμών ολίσθησης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο με την αύξηση του περιεχόμενου χρωμίου. Η εικόνα 5 απεικονίζει το φαινόμενο για ένα εξαιρετικά πλούσιο κράμα Fe-38.8%Cr κ.β που έχει γηρανθεί στους 475°C. Η μείωση της δυσθραυστότητας είναι δραματική και σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από ό, τι μπορεί να εξηγηθεί με βάση τις αλλαγές της σκληρότητας εξαιτίας της αποσύνθεσης του στερεού διαλύματος. Η ψαθυρότητα μπορεί να απομακρυνθεί με θέρμανση του κράματος σε θερμοκρασίες 600°C ή ανώτερες και στην συνέχεια ταχύτατη ψύξη. [3], [4], [8], [11]

Επίσης η παρατεταμένη γήρανση οδηγεί στο σχηματισμό σ-φάσης, όπου ο ρυθμός κατακρήμνισης της αυξάνεται με τη συγκέντρωση του χρωμίου. Όπως και στον οστενίτη, η παρουσία της φάσης σίγμα μπορεί να οδηγήσει σε έντονη ψαθυρότητα ή ευθραυστότητα. Εκτενέστερη αναφορά για την σ-φάση γίνεται παρακάτω στην οικογένεια των ανοξειδωτών οστενιτικών χαλύβων. [3] , [4] , [8] , [11]

Εκτός από το φαινόμενο της ψαθυροποίησης στους φερριτικούς ανοξειδωτους χάλυβες συναντάται και το φαινόμενο της ευαισθητοποίησης το οποίο είναι σχεδον αναπόφευκτο στους φερριτικούς και εμφανίζεται σε όλα τα είδη των ανοξειδωτων. Το φαινόμενο της ευαισθητοποίησης αναλύεται εκτενέστερα παρακάτω στους οστενιτικούς. [3] , [4] , [8], [11]



Εικόνα 5. Σκληρότητα και αντοχή στην κρούση του κράματος Fe-38%Cr κ.β αφού έχει υποστεί βαφή και έχει γηρανθεί στους 475°C για χρονικό διάστημα που υποδεικνύεται στο διάγραμμα. [11]

Element	Type 409L	Type 430	Type 446	Type 18/2
C	<0.03	0.06	0.08	0.02
Cr	11	17.0	25.0	18.0
Mo				2.0
Mn	1.0	1.0	1.5	
Si	1.0	1.0	1.0	
Ti	$6 \times w_C$			
N				0.25

Εικόνα 6. Τυπικές συνθέσεις (%κ.β) κάποιων φερριτικών ανοξειδωτων χαλύβων. [11]

B. Μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες

Οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται όταν η αντοχή στην διάβρωση ή/και στην οξείδωση απαιτούνται σε συνδυασμό με υψηλές αντοχές σε χαμηλές θερμοκρασίες ή αντοχή στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες. Η περιεκτικότητα τους σε χρώμιο πρέπει να είναι πάνω από το 10,5-11% κ.β προκειμένου να έχουν την ιδιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα. Βέβαια στο διάγραμμα σιδήρου-χρωμίου για περιεκτικότητα άνω του 10,5% σε χρώμιο, δεν μπορεί ο χάλυβας να ωστενιτοποιηθεί προκειμένου να παραχθεί στην συνέχεια μαρτενσίτης. Άρα με την προσθήκη παραπάνω άνθρακα αλλά και άλλων στοιχείων όπως άζωτο, νικέλιο και μαγγάνιο επεκτείνεται η ωστενιτική περιοχή στο διάγραμμα σιδήρου χρωμίου και για περιεκτικότητες σε χρώμιο μεγαλύτερες του 10,5%. Τυπικά οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες περιέχουν περίπου 12-18% Cr κ.β στην σύνθεσή τους. Η ελάχιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι περίπου στο 0,1% κ.β. Για να παραχθεί η μαρτενσιτική μικροδομή στους ανοξείδωτους μαρτενσιτικούς χάλυβες, θερμαίνονται στην ωστενιτική περιοχή και στην συνέχεια βάζονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πιθανώς και σε θερμοκρασία χαμηλότερη για να μειωθεί το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη. Ο ρυθμός βαφής που απαιτείται για να παραχθεί ο μαρτενσίτης δεν είναι μεγάλος. Η βαφή γίνεται στον αέρα για λεπτά πάχη ενώ για πιο μεγάλα πάχη η βαφή γίνεται στο νερό ή στο λάδι. Μετά την βαφή συνήθως ακολουθεί η κατεργασία της επαναφοράς για να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή και δυσθραυστότητα. [4], [8], [9], [10]

Διαμορφώνονται σχετικά δύσκολα εν ψυχρώ και έχουν χαμηλή κατεργασιμότητα και συγκολλησιμότητα. Για το λόγο αυτό διαμορφώνονται κυρίως με θερμή έλαση και θερμή σφυρηλασία. Οι κυριότερες εφαρμογές τους είναι σε εγκαταστάσεις χημικών και πετροχημικών βιομηχανιών σε συνθήκες χαμηλής διαβρωτικότητας, σε αεριοστροβίλους και υδροστροβίλους, σε εξαρτήματα αεροσυμπιεστών, ως μαχαιροπίρουνα, λεπίδες ξυραφιών κτλ. Σε εφαρμογές όπως μαχαιροπίρουνα, εγχειρητικά όργανα κλπ η υψηλή αντοχή είναι η επιθυμητή και όχι τόσο η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα. Π.χ Για τον χάλυβα 420 το συμβατικό όριο διαρροής του μετά από βαφή και επαναφορά είναι περίπου 1,2 GPa, ενώ ο 440C επαναφερόμενος στους 300°C έχει συμβατικό όριο διαρροής περίπου 2 GPa. Όπως και οι φερριτικοί, έτσι και οι μαρτενσιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες υποφέρουν από ψαθυρότητα όταν για παράδειγμα χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες των 475°C για αρκετή ώρα με αποτέλεσμα την κατακρήμνιση της υπομικροσκοπικής ψαθυρής φάσης α*. Άλλες φάσεις που κατακρημνίζονται και οδηγούν σε ψαθυρότητα είναι σ, χ και Laves, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω. [4], [8], [9], [10]

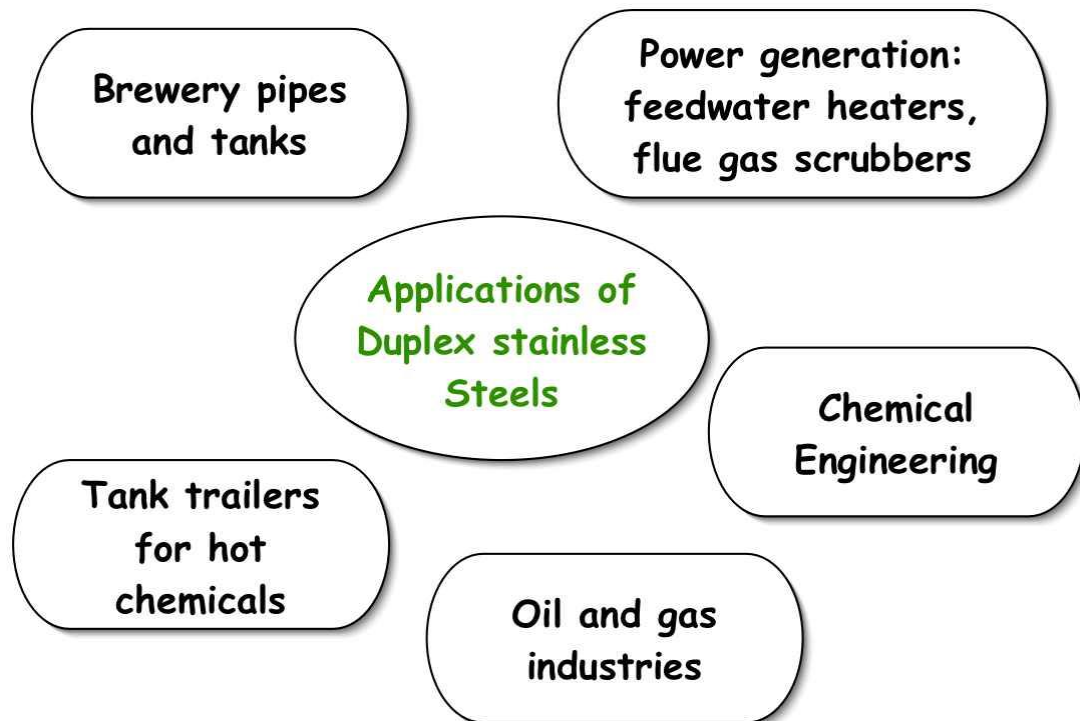
Grade	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
410	0.15	1.0	0.5	11.5-13.0	-	-	0.04	0.03
416	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.60	0.04	0.15
420	0.15-0.40	1.0	1.0	12.0-14.0	-	-	0.04	0.03
431	0.20	1.0	1.0	15.0-17.0	-	1.25-2.0	0.04	0.03
440A	0.60-0.75	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.75	0.04	0.03
440B	0.75-0.95	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.75	0.04	0.03
440C	0.95-1.20	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.75	0.04	0.03

Εικόνα 7. Τυπικές συνθέσεις (%κ.β) κάποιων μαρτενσιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. [8]

C. Διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες (duplex)

Στο διάγραμμα σιδήρου-χρωμίου παρατηρείται ότι μεταξύ της ωστενιτικής περιοχής και της φερριτικής υπάρχει μια περιορισμένη περιοχή(α+γ) η οποία μπορεί να εξασφαλίσει 2 φάσεις στους ανοξείδωτους χάλυβες. Η κρυσταλλική αυτή δομή παράγεται όταν υπάρχει σωστή ισορροπία μεταξύ των α-φερρογόνων και γ-φερρογόνων στοιχείων. Για να επιτευχθεί η διφασική μικροδομή(duplex structure) είναι απαραίτητη η αύξηση του ποσοστού (%κ.β) του χρωμίου πάνω από το 20%. Ωστόσο οι ακριβείς αναλογίες α και γ καθορίζονται από την θερμική κατεργασία που υποβάλλεται ο χάλυβας. Είναι ξεκάθαρο με βάση τον ωστενιτικό βρόγχο(γ-loop) στο διάγραμμα ισορροπίας Fe-Cr ότι διατηρώντας τον χάλυβα στις θερμοκρασίες μεταξύ 1000-1300 °C θα αναγκάσει τον φερρίτη να ποικίλλει με βάση τα ευρύτερα όρια. Η συνήθης θερμική κατεργασία που γίνεται είναι μεταξύ των 1050°C και 1150°C, όταν ο φερρίτης δεν είναι ευαίσθητος στον ακόλουθο ρυθμό ψύξης. Οι διφασικοί ή ωστενιτοφερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες ή ανοξείδωτοι χάλυβες διπλής φάσης (duplex), περιέχουν ωστενίτη και φερρίτη σε αναλογία που κυμαίνεται από 50:50 έως 40:60. Συνήθως περιέχουν 19-28% Cr, <5% Mo και λίγο Ni (1,5-7% ανάλογα με τον τύπο). Χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα χρωμίου, αζώτου και μολυβδαίνιου παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, απολαμβάνοντας ταυτόχρονα το πλεονέκτημα των υψηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με τις άλλες οικογένειες. Για παράδειγμα οι διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν καλύτερη μηχανική αντοχή από τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, λόγω της διφασικής μικροδομής τους αλλά και λόγω το ότι κανονικά αυτό οδηγεί σε μια εκλέπτυνση του μεγέθους των κόκκων. Η προσθήκη του αζώτου στους χάλυβες αυτούς μπορεί να αυξήσει το ποσοστό του ωστενίτη μέχρι και 50% σε ορισμένα κράματα. Η βελτίωση στην δυσθραυστότητα πιθανώς να σχετίζεται με το υψηλό ποσοστό του ωστενίτη, που το κάνει δυνατόν να παράγονται βαριά προϊόντα όπως μπάρες και ελάσματα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η αντοχή στην ρωγμάτωση κατά την στερεοποίηση, ιδιαίτερα εκείνη που συνδέεται με την συγκόλληση. Επίσης λόγω του υψηλού ποσοστού σε χρώμιο παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην διάβρωση. Βέβαια το υψηλό ποσοστό σε χρώμιο οδηγεί στον κίνδυνο κατακρήμνισης ενδομεταλλικών φάσεων όπως η σ και η α*. [11] , [8]

Οι υπερ-διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν ακόμα υψηλότερη αντοχή στην διάβρωση και πιο συγκεκριμένα στην τοπική διάβρωση οπών, λόγω των αυξημένων περιεκτικότητων σε χρώμιο, μολυβδαίνιο και άζωτο. Για να διατηρηθεί η ισορροπία φερρίτη/ωστενίτη είναι απαραίτητη η αύξηση στη περιεκτικότητα των στοιχείων που σταθεροποιούν τον ωστενίτη, όπως το νικέλιο. Οι υπερ-διφασικοί ανοξείδωτοι χάλυβες τυπικά περιέχουν 27Cr-7Ni-4Mo-0,3N %κ.β. [11] , [8]



Εικόνα 8. Εφαρμογές των διφασικών ανοξείδωτων χάλυβων σε βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου , σε δεξαμενές ρυμουλκούμενων, στην χημική βιομηχανία , σε σωλήνες ζυθοποιείας και δεξαμενών και στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [8]

<i>Designation</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Other</i>	<i>UTS / MPa</i>	<i>Elongation / %</i>
<i>Type 329</i>	28.0	6.0	0.10	2.0	1.0	0.04	0.03	1.5 Mo	724	25
<i>Type 326</i>	26.0	6.5	0.05	1.0	0.6	0.01	0.01	0.25 Ti	689	35
<i>2RE60</i>	18.5	4.5	0.02	1.5	1.6	0.01	0.01	2.5 Mo	717	48
<i>IC378</i>	21.8	5.5	0.03	1.38	0.40	0.03	0.01	3.0 Mo 0.18 Cu 0.07 V 0.14 N		
<i>IC381</i>	22.1	5.8	0.02	1.92	0.48	0.03	0.01	3.2 Mo 0.07 Cu 0.13 V 0.14 N		
<i>A219</i>	25.6	9.4	0.03	0.70	0.60	0.02	0.01	4.1 Mo 0.27 N		

Εικόνα 9. Τυπικές συνθέσεις διφασικών ανοξειδωτων χαλύβων (%κ.β) και ορισμένες μηχανικές ιδιότητες τους. Ο A219 είναι υπερ-διφασικός ανοξειδωτος χάλυβας. [8]

D. Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες είναι μια εξαιρετική οικογένεια κραμάτων που έχουν εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση και εξίσου εντυπωσιακές μηχανικές ιδιότητες. Έχουν καλύτερη αντοχή, δυσθραυστότητα και ικανότητα για μορφοποίηση σε σχέση με τα περισσότερα εμπορικά βιώσιμα κράματα σε κρυογενικές θερμοκρασίες αλλά και πολύ υψηλότερες. Αξιολογούνται επίσης αισθητικά και είναι περιβαλλοντικά καλοήθεις. Αν και μόνο 10,5% χρώμιο περίπου απαιτείται ώστε να θεωρηθεί ένας χάλυβας ανοξειδωτος , οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν τουλάχιστον 15% χρώμιο όπου μαζί με το νικέλιο , το μαγγάνιο , τον άνθρακα και το άζωτο συνδυάζονται για να σταθεροποιήσουν την ωστενιτική μικροδομή. Γενικότερα τα επίπεδα του χρωμίου σε αυτούς τους χάλυβες κυμαίνονται μεταξύ 16-26% κ.β και του νικελίου μεταξύ 3,55-37% κ.β. Παρουσιάζουν πολύ καλύτερη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ανοξειδωτων χαλύβων, ενώ είναι αρκετά συγκολλησιμοι και σε πολύ λεπτά πάχη. Είναι μη μαγνητικοί και μπορούν να σκληρυνθούν με κατεργασία εν ψυχρώ. Ωστόσο δεν μπορούν να σκληρυνθούν με θερμική κατεργασία. [11] , [8] , [15]

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες βρίσκονται σε χρήση από το 1920, αλλά η πρόοδος στην κατεργασία τους εφαρμόστηκε το 1970 και τους έκανε πολύ πιο αποδοτικούς για κοινές χρήσεις σε εφαρμογές όπου επικαλυμμένοι ή επιμεταλλωμένοι χάλυβες , αλουμίνια ή κράματα χαλκού μπορεί διαφορετικά να προτιμούνταν. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν στην αυξημένη χρήση τους, είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής με χαμηλό κόστος συντήρησης , η ικανότητα ανακύκλωσης και η καλοήθης επίδραση στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. [11] , [8] , [15]

i. Μικροδομή

Η μικροδομή των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων είναι ωστενιτική. Ο ωστενίτης μπορεί να διατηρηθεί σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (σε μετασταθή κατάσταση). Αυτό συμβαίνει λόγω της προσθήκης κραματικών στοιχείων ενίσχυσης της ωστενιτικής δομής(γ-φερρογόνα). Κυριότερος εκπρόσωπος αυτών των στοιχείων είναι το νικέλιο. Για παράδειγμα σε ένα ανοξειδωτο χάλυβα με περιεκτικότητα σε χρώμιο 18% κ.β απαιτείται προσθήκη νικελίου με ελάχιστη περιεκτικότητα 8% κ.β προκειμένου να διατηρηθεί η ωστενιτική μικροδομή σε θερμοκρασίες δωματίου. Σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση και επομένως και μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε χρώμιο (π.χ 25% κ.β), η περιεκτικότητα σε νικέλιο πρέπει και αυτή να είναι αυξημένη (π.χ 15% κ.β). [11] , [8] , [15]

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες σχεδιάζονται ώστε να περιέχουν και αρκετό ποσοστό φερρίτη μετά την στερεοποίηση και την ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου. Η ποσότητα του φερρίτη που διαλυτοποιείται κατά την διάρκεια κανονικής κατεργασίας, καθορίζεται από το τροποποιημένο διάγραμμα του Schaeffler (εικόνα 3.) Ο φερρίτης αυτός που προέρχεται από το στάδιο της στερεοποίησης ονομάζεται δ-φερρίτης.

$$\%ferrite=3(Cr+1,5Si+Mo)2,8(Ni+0,5Mn)-84(C+N)-19,8\%$$

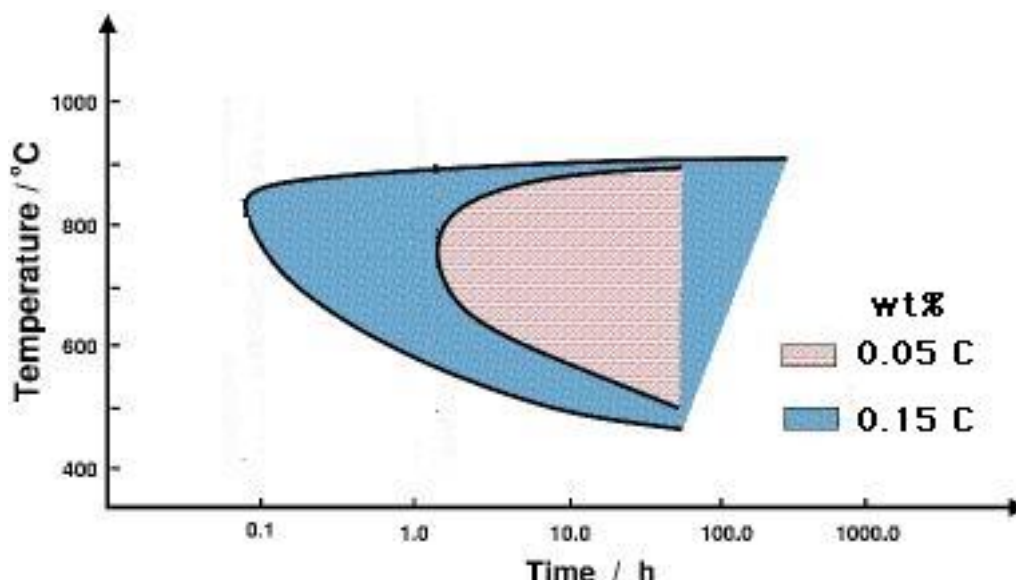
Το ποσοστό του φερρίτη που συναντάται στους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες είναι 2-10% και βοηθάει στην αντιμετώπιση της θερμής ρωγμάτωσης κατά την διεργασία της συγκόλλησης. [15] , [11] , [8]

ii. Κατακρήμνιση καρβιδίων

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες μπορεί να περιέχουν πάνω από 0,15% κ.β άνθρακα. Ο άνθρακας αυξάνει το όριο διαρροής , βοηθάει στην σταθεροποίηση του ωστενίτη , αλλά αν δεν διατηρηθεί σε στερεό διάλυμα τότε αναμειγνύεται με το χρώμιο με την μορφή $M_{23}C_6$, όπου Μ είναι κατά βάση χρώμιο Cr , αλλά επίσης και σίδηρος. Το καρβίδιο αυτό του χρωμίου κατακρημνίζεται αρχικά στα όρια των κόκκων , στην συνέχεια στις διδυμίες του ωστενίτη και έπειτα εντός των ωστενιτικών κόκκων. Με την κατακρήμνιση του $Cr_{23}C_6$ στα όρια των κόκκων μειώνεται η ποσότητα του χρωμίου στους γύρω κόκκους με αποτέλεσμα να χάνεται η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά τους και να παύει να σχηματίζεται το προστατευτικό παθητικό στρώμα Cr_2O_3 . Άρα εξασθενίζει η ωστενιτική μήτρα σε χρώμιο και χάνει τις αντιδιαβρωτικές της ιδιότητες. Το φαινόμενο της εξασθένισης σε χρώμιο είναι πολύ εντονότερο κοντά στα όρια των κόκκων εκεί που εντοπίζεται και η κατακρήμνιση και έχει ως αποτέλεσμα οι περιοχές αυτές να είναι ευαίσθητες στην διάβρωση (Εικόνα 11). Αυτό το είδος διάβρωσης ονομάζεται περικρυσταλλική διάβρωση και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ευαισθητοποίηση. Στο φαινόμενο αυτό μαζί με τα καρβίδια $Cr_{23}C_6$, συμμετέχουν και τα καρβίδια Cr_7C_3 , τα οποία κατακρημνίζονται εξίσου στα όρια των κόκκων. Τα παραπάνω καρβίδια του χρωμίου κατακρημνίζονται όταν υπάρξει θέρμανση των κραμάτων σε θερμοκρασίες μεταξύ 500°C και 850°C για κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να είναι και λίγα λεπτά ή αργή ψύξη έπειτα από κάποια θερμική κατεργασία σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Το χρονικό διάστημα

στο οποίο θα κατακρημνισθούν τα καρβίδια αυτά εξαρτάται και από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Για παράδειγμα η κατακρήμνιση στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες με 0,08% κ.β σε άνθρακα γίνεται εντός ολίγων λεπτών , ενώ σε αυτούς με ποσοστό κάτω από το 0,03% C κ.β γίνεται σε χρονικό διάστημα 100 φορές μεγαλύτερο. Η ταχύτητα κατακρήμνισης αυξάνεται με την αύξηση του νικελίου , του μολυβδαινίου και της ψυχρής διαμόρφωσης , ενώ με την προθήκη αζώτου και μαγγανίου μειώνεται. Γενικά το φαινόμενο της ευαισθητοποίησης μπορεί να αντιμετωπιστεί :

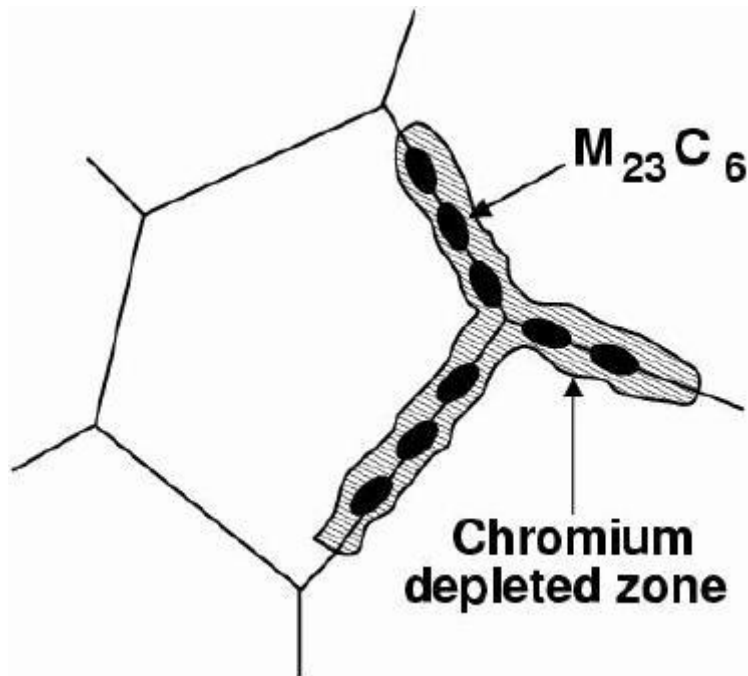
1. Με την μείωση του ποσοστού σε άνθρακα [11] , [8]



Εικόνα 10. Η επίδραση του άνθρακα στο φαινόμενο της ευαισθητοποίησης [8]

2. Με την προσθήκη Ti, Nb, Ta και W , τα οποία έχουν μεγαλύτερη συγγένεια με τον άνθρακα σε σχέση με την συγγένεια που έχει το χρώμιο και άρα τα καρβίδια τους κατακρημνίζονται πρώτα(π.χ TiC,NbC). Ουσιαστικά δεσμεύουν τον άνθρακα και έτσι μειώνουν την πιθανότητα να σχηματιστεί το επιβλαβές καρβίδιο του χρωμίου. Γενικά πρέπει να γίνει μια θερμική κατεργασία ώστε να τονωθεί ο σχηματισμός των TiC και NbC , για παράδειγμα σε θερμοκρασία στους 900°C για 1 ώρα. Αυτό, γιατί σε θερμικές κατεργασίες χαμηλότερων θερμοκρασιών τα καρβίδια του χρωμίου θα σχηματιστούν γρηγορότερα στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Τα καρβίδια του τιτανίου και του νιοβίου αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω. [11] , [8]
3. Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης σε ανώτερες θερμοκρασίες σχηματισμού των καρβιδίων του χρωμίου και στην συνέχεια απότομη ψύξη στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο δεν θα προλάβουν τα καρβίδια να επανακατακρημνιστούν ή να κατακρημνιστούν νέα. [11] , [8]
4. Με διάφορους άλλους παράγοντες που επιδρούν στο πρόβλημα, όπως το μέγεθος κόκκου του ωστενίτη και ο κρυσταλλογραφικός χαρακτήρας των ορίων των κόκκων. Δημιουργώντας κρυσταλλογραφικούς ιστούς που ευνοούν

όρια κόκκων χαμηλής ενέργειας τα οποία είναι λιγότερο αποτελεσματικά ως ετερογενείς θέσεις φύτρωσης και μειώνοντας το μέγεθος του κόκκου του ωστενίτη μπορεί επίσης να βοηθήσει αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα οποιουδήποτε καρβιδίου και κατά συνέπεια μειώνοντας την έκταση των σχετικών πεδίων διάχυσης του χρωμίου. [11] , [8]



Εικόνα 11. Κατακρήμνιση του καρβιδίου του χρωμίου στα όρια των κόκκων και γύρω από αυτά οι περιοχές που είναι ευαίσθητες στην διάβρωση, λόγω μείωσης του ποσοστού του χρωμίου. [8]

iii. Κατακρήμνιση νιτριδίων

Στους απλούς ωστενιτικούς χάλυβες, ο ρόλος του αζώτου είναι σε μεγάλο βαθμό ένα κραματικό στοιχείο ενίσχυσης του στερεού διαλύματος , αν και μπορεί να αντικαταστήσει τον άνθρακα στο καρβίδιο $Cr_{23}C_6$. Υψηλότερες συγκεντρώσεις αζώτου μπορούν να διατηρηθούν χωρίς επιβλαβείς κατακρημνίσεις σε σχέση με την περίπτωση του άνθρακα. Με 0,2%-0,3% κ.β N , μπορεί να κατακρημνιστεί το νιτρίδιο του χρωμίου Cr_2N στα όρια των κόκκων , αλλά και εντός των κόκκων του ωστενίτη. Η έκθεση των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων στον αέρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των $600^{\circ}C$ μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου κάτω από το στρώμα του οξειδίου με χονδρόκοκη κατακρήμνιση Cr_2N στην ωστενιτική μήτρα , καθώς και ασυνεχής και ελασματοειδής κατακρήμνιση στα όρια των κόκκων. Τέτοιες περιοχές συνήθως οδηγούν σε ραγμές κάτω από συνθήκες ερπυσμού. [11]

Με την παρουσία του νιοβίου και του τιτανίου , πιο σταθερά νιτρίδια αυτών των στοιχείων σχηματίζονται , τα οποία είναι πολύ λιγότερο διαλυτά στον ωστενίτη από τα νιτρίδια του χρωμίου Cr_2N . TiN και NbN είναι τα νιτρίδια του τιτανίου και του

νιοβίου τα οποία είναι ισόμορφα με τα αντίστοιχα καρβίδια (TiC και NbC) και το M_6N που μπορεί τελικά να αντικαταστήσει το NbN κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Αυτά τα νιτρίδια μπορούν να κατακρημνισθούν στις θερμοκρασίες 650-850°C ύστερα από απότομη ψύξη από υψηλές θερμοκρασίες διαλυτοποίησης. Μπορεί συνεπώς να προκύψουν ως αποτέλεσμα της συγκόλλησης ή σε κράματα που υπόκεινται σε συνθήκες ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι τρόποι φύτερωσης αυτών των νιτρίδιων είναι παρόμοιοι με εκείνους των αντίστοιχων καρβιδίων, αν και υπάρχουν διαφορές στην μορφολογία τους. Ουσιαστικά τα νιτρίδια του νιοβίου και του τιτανίου αντικαθιστούν σε μεγάλο βαθμό την κατακρήμνιση του Cr_2N αφού κατακρημνίζονται γρηγορότερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. [11]

iv. Κατακρήμνιση καρβιδίων TiC και NbC

Κανονικά στην πράξη, προστίθεται επαρκής ποσότητα νιοβίου ή τιτανίου στους ανοξείδωτους χάλυβες, ώστε να ενωθούν με όλο τον άνθρακα. Οι στοιχειομετρικές αναλογίες είναι:

$$\begin{array}{l} Ti:C \quad Nb:C \\ \text{Ατομικά Βάρη} : 48:12 \quad 93:12 \\ \text{Αναλογίες} \quad : 4:1 \quad 8:1 \end{array}$$

Ωστόσο, οι προσθήκες υπερβαίνουν αυτές τις αναλογίες για να επιτρέψουν κάποιο στερεό διάλυμα Ti ή Nb και για συννέωση με οποιοδήποτε άζωτο που μπορεί να υπάρχει. Τα καρβίδια του τιτανίου και του νιοβίου είναι πολύ λιγότερο διαλυτά στον ωστενίτη από το καρβίδιο του χρωμίου, άρα θα σχηματιστούν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες ως σχετικά σταθερά σωματίδια. Θα παραμένουν σταθερά και αδιάλυτα κατά την διάρκεια εμπορικών θερμικών κατεργασιών, που περιλαμβάνουν θερμοκρασίες διαλυτοποίησης όχι υψηλότερες από 1050°C και έτσι θα ελαχιστοποιούν με αυτόν τον τρόπο την πιθανή φύτερωση των καρβιδίων του χρωμίου $Cr_{23}C_6$. Ωστόσο, τα καρβίδια του νιοβίου και του τιτανίου έχουν κάποια διαλυτότητα στον ωστενίτη στους 1050°C και μπορούν στην συνέχεια να κατακρημνιστούν και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Κατά την διάρκεια κατεργασιών υψηλών θερμοκρασιών, όπως η συγκόλληση, αυτά τα καρβίδια διαλύονται σε μεγαλύτερο βαθμό στον ωστενίτη και μπορούν στην συνέχεια να επανακατακρημνιστούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς, τα NbC και TiC δεν θα σχηματίζουν πάντα αδρανής διασπορές και είναι πιθανό να ανακατανεμηθούν με θερμική κατεργασία. Έχουν ωστόσο μεγάλο πλεονέκτημα να μην καταστρέφουν την μήτρα του χρωμίου, ιδιαίτερα σε ευαίσθητες περιοχές, όπως τα όρια των κόκκων. Η δυνατότητα σχηματισμού διασπορών NbC και TiC έχει ένα περαιτέρω πλεονέκτημα στο ότι αυτές οι διασπορές μπορούν να παραμείνουν πολύ λεπτές σε θερμοκρασίες μεταξύ 500-750°C και έτσι να παρέχουν ένα μέσο διασποράς που ενισχύει τους ωστενιτικούς χάλυβες ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντοχή σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών. Η ανάπτυξη ανθεκτικών σε ερπυσμό ωστενιτικών χαλύβων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις ιδιότητες αυτών των διασπορών καρβιδίου. Οι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες που περιέχουν αυτά τα στοιχεία για αυτό το σκοπό είναι οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες 321(Ti stabilized) και 347(Nb stabilized) και αποκαλούνται και ως 'stabilized stainless steels'. [11]

Ο σχηματισμός των NbC και TiC στον ωστενίτη μελετήθηκε πιο εύκολα υποβάλλοντας τον χάλυβα σε κατεργασία διαλυτοποίησης υψηλών θερμοκρασιών (1100-1300^o C), ακολουθούμενη από απότομη ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με επακόλουθη γήρανση στο εύρος 650-850^oC η κατακρήμνιση λαμβάνει μέρος. Τα καρβίδια είναι και τα 2 εδροκεντρωμένης δομής (FCC) τύπου κρυστάλλου NaCl με παραμέτρους πλέγματος εντός 2-3% το ένα από το άλλο, αλλά διαφέρουν από εκείνα του ωστενίτη κατά 20-25%. Η κατακρήμνιση σε κάθε περίπτωση συμβαίνει με διάφορους τρόπους. [11]

Θέσεις κατακρήμνισης

1. Τα όρια των κόκκων είναι προτιμηταίες θέσεις κατακρήμνισης, αλλά επειδή το χρώμιο διαχέεται πιο γρήγορα στον ωστενίτη σε χαμηλές θερμοκρασίες απ'ότι το νιόβιο ή το τιτάνιο, τα Cr₂₃C₆ συνήθως σχηματίζονται πρώτα. [11]
2. Στα σημεία όπου υπάρχουν διαταραχές φυτρώνουν εκτεταμένα NbC και TiC. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ένα σημαντικό μέρος της αντοχής ερπυσμού αυτής της ομάδας των κραμάτων προκύπτει από την φύτρωση των καρβιδίων του κράματος στις διαταραχές που παράγονται από την παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες. [11]
3. Τυχαία κατακρήμνιση του (NbTi)C στην μήτρα, όχι σε σημεία διαταραχών, παρατηρείται περιστασιακά, αλλά είναι η σπανιότερη μορφολογία που συναντάται. Κατά συνέπεια λαμβάνονται μόνο μετά από θερμικές κατεργασίες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλους υπερκορεσμούς κενών στην μήτρα ωστενίτη, δηλαδή πολύ υψηλές θερμοκρασίες διαλυτοποίησης και ταχεία βαφή. [11]

v. Κατακρήμνιση ενδομεταλλικών φάσεων

σ (Sigma-phase)

Ενώ έχουν παρατηρηθεί αρκετές άλλες ενδομεταλλικές φάσεις στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, αναφορά γίνεται κυρίως στην φάση σ (sigma), καθώς έχει καταστροφική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου. Η φάση σ είναι μια ισόμορφη ένωση σιδήρου-χρωμίου (FeCr) με στοιχειομετρική αναλογία 1:1 συνήθως και το κρυσταλλικό της πλέγμα είναι τετραγωνικό με παραμέτρους 0,8799 και 0,4544 nm, εξαρτώμενη από την σύσταση που προκύπτει από το διμερές διάγραμμα σιδήρου-χρωμίου σε μια ευρεία κλίμακα σύστασης μεταξύ 25 και 60% κ.β σε Cr. Στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, ο σχηματισμός της σ ενθαρρύνεται όταν η περιεκτικότητα σε χρώμιο υπερβαίνει το 17% κ.β, αλλά αποθαρρύνεται όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νικέλιο. Η φάση αυτή κατακρημνίζεται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη και για την πλήρη ανάπτυξή της απαιτείται μακράς διάρκειας γήρανση (πάνω από 1500 ώρες) στους 750^oC. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις, σ έχει ανιχνευθεί σε χάλυβες 25Cr-20Ni μετά από 70 ώρες σε αυτή τη θερμοκρασία. Η παρουσία του φερρίτη (δ-φερρίτη) στην ωστενιτική μικροδομή επιταχύνει πολύ το σχηματισμό της σ, η οποία έχει δειχθεί ότι φυτρώνει στην διεπιφάνεια γ/α (ωστενίτη/φερρίτη), δηλαδή στα όρια των κόκκων τους. Ο φερρίτης που είναι πλουσιότερος σε χρώμιο τείνει να απορροφάται κατά προτίμηση κατά την ανάπτυξη της σ. Στοιχεία όπως το Mo και το Ti επιταχύνουν το σχηματισμό της σ, δηλαδή σε χάλυβα 18Cr-8Ni-3Mo-1Ti κ.β%, η σ φάση μπορεί να σχηματιστεί

μετά από μόνο 30 λεπτά στους 870°C. Επίσης η διαμόρφωση εν ψυχρώ επιταχύνει την φυτρωσή της. [12] , [13] , [14] , [8], [11]

Laves , χ(chi)

Η φάση χ παρατηρείται στους ανοξειδωτους χάλυβες που περιέχουν σημαντικές προσθήκες μολυβδαινίου και εκθέτονται σε υψηλές θερμοκρασίες(730–1010 °C). Συχνά παρατηρείται σε ανοξειδωτους που είναι ευαίσθητοι στο σχηματισμό σ φάσης και έχει μια χωροκεντρωμένη (BCC) , α-μαγγανίου-τύπου κρυσταλλική δομή. Συναντάται με τους εξής χημικούς τύπους $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$, $(FeNi)_{36}Cr_{18}Mo_4$, $M_{18}C$. Η χ φυτρώνει πρώτα στα όρια των κόκκων , μετά σε ασυναφείς διδυμίες και τέλος εντός των κόκκων. Η μορφολογία της και το σχήμα της είναι σαν ράβδος και σφαιρικό. Όπως και στην σ φάση η διαμόρφωση εν ψυχρώ επιταχύνει την φύτρωσή της. [12] , [13] , [14]

Η Laves (η) φάση επίσης μπορεί να σχηματιστεί στους ανοξειδωτους ωστενιτικούς χάλυβες μετά από μακράς διάρκειας έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία. Οι ανοξειδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες που περιέχουν μολυβδαίνιο, τιτάνιο και νιόβιο είναι πιο επιρρεπείς στο να σχηματίσουν την Laves φάση. Η κατακρήμνιση γίνεται στις θερμοκρασίες μεταξύ 650-950°C. Πρόκειται για μια εξαγωνική ενδομεταλλική ένωση τύπου Fe_2Mo . Η φάση Laves κατακρημνίζεται εντός των κόκκων και έχει σχήμα σφαιρικό. [12] , [13] , [14]

vi. Σταθερότητα του ωστενίτη

Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της ωστενιτικής φάσης είναι η σταθερότητα της. Μια ωστενιτική μικροδομή μπορεί να χαρακτηριστεί ως σταθερή όταν η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_s είναι χαμηλότερη από αυτήν της θερμοκρασίας δωματίου. Για παράδειγμα ο ωστενιτικός ανοξειδωτος χάλυβας 18Cr-8Ni στην πραγματικότητα έχει M_s κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για να επέλθει μετασχηματισμός της ωστενιτικής δομής σε μαρτενσιτική θα πρέπει να ψυχθεί σε θερμοκρασίες π.χ υγρού αζώτου(-196 ° C) ή σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες της M_s . Επίσης η εφαρμογή πλαστικής παραμόρφωσης σε θερμοκρασίες δωματίου μπορεί να οδηγήσει σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ο μετασχηματισμός επαγόμενος από παραμόρφωση είναι σχεδόν πάντα παρόν. Η αύξηση της M_s από διαμόρφωση εν ψυχρώ (παραμόρφωση) ορίζεται από την M_d ή M^s θερμοκρασία κάτω από την οποία επέρχεται μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη όταν ο χάλυβας παραμορφώνεται υπό την επιβολή τάσεων. Γενικά όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία τόσο χαμηλότερα βρίσκονται και οι θερμοκρασίες M_s και M_d ή M^s , και είναι δυνατόν να υπάρξει κατά προσέγγιση θερμοκρασία M_s , χρησιμοποιώντας εμπειρικές εξισώσεις. Η ποσότητα του σχηματιζόμενου μαρτενσίτη εξαρτάται από την θερμοκρασία , το ρυθμό παραμόρφωσης και την σύσταση. Η επίδραση της σύστασης περιγράφεται από την εξίσωση του Angel το 1954:

$$M_d30(^\circ C) = 497 - 462(\%C+\%N) - 9,2\%Si - 8,1\%Mn - 13,7\%Cr -20\%Ni - 18,5\%Mo$$

Όπου Md30 είναι η θερμοκρασία που σχηματίζεται 50% μαρτενσίτης με πραγματική παραμόρφωση(true strain) 30%. [11] , [15] , [16]

vii. Μηχανισμοί παραμόρφωσης και μαρτενσιτικός μετασχηματισμός

Είναι αποδεδειγμένο ότι οι μηχανισμοί παραμόρφωσης και οι μηχανικές ιδιότητες των εδροκεντρωμένων μετάλλων σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης(Stacking Fault Energy-SFE), η οποία είναι η παράμετρος που καθορίζει πότε η ανάπτυξη διδυμιών(twinning) , ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη ή η ολίσθηση των διαταραχών θα κυριαρχήσει στην διαδικασία παραμόρφωσης του υλικού. Για χάλυβες με χαμηλές ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης , ο τρόπος της πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να αλλάξει από ολίσθηση διαταραχών σε παραμόρφωση με ανάπτυξη διδυμιών, το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την σκλήρωση του κράματος. Η ανάπτυξη διδυμιών συνήθως κυριαρχεί όταν η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης κυμαίνεται από 18 έως 45 mJ m⁻² , ενώ ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ευνοείται όταν η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης είναι μικρότερη από 18 mJ m⁻² και η ολίσθηση διαταραχών θα κυριαρχήσει όταν η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης ξεπεράσει τα 45 mJ m⁻². Στους ανοξείδωτους αστενιτικούς χάλυβες, ύστερα από μονοαξονικό εφελκυσμό και ολική σύρματος , παρατηρούνται 2 μηχανισμοί μαρτενσιτικού μετασχηματισμού: α) βοηθούμενος από τάση μαρτενσιτικός μετασχηματισμός(stress assisted or stress induced martensite transformation): $\gamma(\text{FCC}) \rightarrow \epsilon\text{-μαρτενσίτης}(\text{HCP}) \rightarrow \alpha'\text{-μαρτενσίτης}(\text{BCC})$ και β) επαγόμενος από παραμόρφωση μαρτενσιτικός μετασχηματισμός(strain induced martensite transformation): $\gamma(\text{FCC}) \rightarrow \text{twinning} \rightarrow \alpha'\text{-μαρτενσίτης}(\text{BCC})$. Γενικά χαμηλές ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης (low SFE) προωθούν τον μετασχηματισμό σε α' μέσω του ϵ -μαρτενσίτη(<18mJ m⁻²), ενώ υψηλότερες ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης οδηγούν στους μετασχηματισμούς $\gamma \rightarrow \text{twinning} \rightarrow \alpha^*$ (>18mJ m⁻²). [44]-[50]

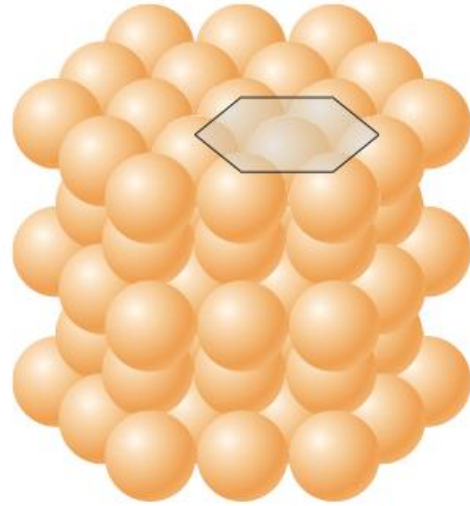
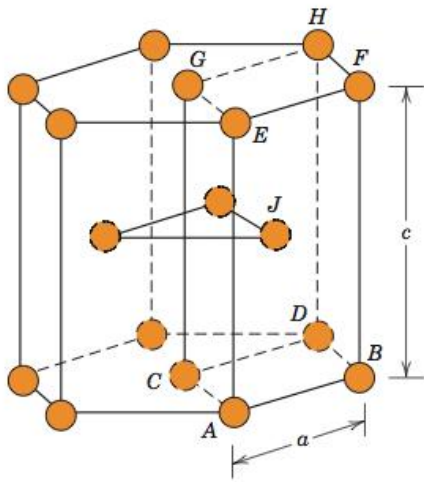
Οι διαταραχές είναι οι κύριοι φορείς της πλαστικής παραμόρφωσης στα κρυσταλλικά υλικά και αυτές μπορούν να διασχίσουν ή όχι τους κόκκους , ανάλογα την φύση των διεπιφανειών. Η συγκέντρωση των διαταραχών στο εσωτερικό των κόκκων συνεχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης , δίνοντας διάφορους τύπους αλληλεπιδράσεων των διαταραχών μέσα στους κόκκους ,που σχετίζονται με την ολίσθηση εκτεταμένων διαταραχών(glide of extended dislocations) σε διαφορετικά συστήματα ολίσθησης. Η δραστηριότητα των διαταραχών είναι η πηγή της ανάπτυξης διδυμιών και η ανάπτυξη διδυμιών εξελίσσεται σε μια ευνοϊκή ανακατανομή των επιμέρους διαταραχών(partial dislocations-SFs). [44]-[50]

Στα εδροκεντρωμένα μέταλλα (FCC) , τα σφάλματα συσσώρευσης και οι διδυμίες μπορούν να σχηματιστούν από τον διαχωρισμό των διαταραχών κοχλία(screw dislocations) ή από τις 60° διαταραχές. Ο διαχωρισμός αυτός δημιουργεί τις επιμέρους διαταραχές οι οποίες περιβάλλουν το σφάλμα ή τα σφάλματα συσσώρευσης και αυξάνει όσο η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται από την ενδοτράχυνση(strain hardening). Στους αστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες με χαμηλές ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης(Low SFEs) οι επιμέρους διαταραχές που απαρτίζουν μια ολίσθηση διαταραχών διαχωρίζονται πολύ περισσότερο ή δημιουργούνται περισσότερα και μεγαλύτερα σφάλματα συσσώρευσης σε σχέση με τους αστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες που έχουν υψηλότερες ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης. Επίσης η ανάπτυξη μηχανικών διδυμιών είναι ευκολότερη

όταν η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης είναι χαμηλή. Ο αυξανόμενος σχηματισμός σφαλμάτων συσσώρευσης και διδύμων στο σημείο τομής των επιπέδων κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης σημαίνει ότι αυξάνονται τα εμπόδια για τις επόμενες ολισθήσεις με αποτέλεσμα να παράγεται ένας υψηλός ρυθμός ενδοτράχυνσης. [44]-[50]

Πιστεύεται ότι τα σφάλματα συσσώρευσης λειτουργούν ως θέσεις φύτρωσης για τον ε-μαρτενσίτη, ο οποίος έχει εξαγωνική κρυσταλλική δομή(HCP). Στην πραγματικότητα η FCC και η HCP κρυσταλλική δομή είναι πολύ κοντά ενεργειακά λόγω της 'closed-packed' φύσης τους. Επίσης στη διαδικασία της ανάπτυξης διδυμίων και στο μετασχηματισμό από γ(FCC) σε ε(HCP) από τα σφάλματα συσσώρευσης παίζει ρόλο και η πυκνότητα των διαταραχών. Ο ε-μαρτενσίτης(HCP) μπορεί να σχηματιστεί αν η ολίσθηση των σφαλμάτων συσσώρευσης τοποθετηθεί πάνω σε κάθε δεύτερο επίπεδο (111)γ, με επίπεδο συνήθειας(habit plane) (0001)ε παράλληλο στο επίπεδο σφάλματος συσσώρευσης (111)γ. Αυτός ο τύπος μαρτενσίτη έχει την μορφή πλακιδίων τα οποία είναι παράλληλα μεταξύ τους και τα οποία μπορεί εύκολα να τα μπερδέψει κάποιος με τις διδυμίες του ωστενίτη. Τα πλακίδια ε μαρτενσίτη μπορεί να είναι και υπό οξεία γωνία μεταξύ τους. Η ανάπτυξη διδυμίων θα παρουσιαστεί αν τα σφάλματα συσσώρευσης τοποθετηθούν πάνω σε κάθε δεύτερο 'closest packed' επίπεδο (111)γ της FCC δομής. Η ανάπτυξη διδυμίων μπορεί να διευκολύνει την παραμόρφωση, εισάγοντας πρόσθετα συστήματα ολίσθησης ή διευκολύνοντας τη μεταφορά μεταξύ των ήδη υπάρχοντων συστημάτων ολίσθησης μέσω των αλληλεπιδράσεων διαταραχών-διδύμων. Εφόσον σχηματιστούν οι δίδυμοι παραμόρφωσης μπορούν να απωθήσουν τύπους διαταραχών ολίσθησης(glide dislocations) και να δώσουν αύξηση στην συσσώρευση διαταραχών(pile up dislocations). Συνεπώς οι διαταραχές ολίσθησης(glide dislocations) περιορίζονται σε μια λεπτή λωρίδα ολίσθησης(slip band) σχηματίζοντας μια μεγάλη συσσώρευση(large pile-up) ενάντια σε ένα εμπόδιο, όπως το όριο ενός κόκκου ή ενός διδύμου. Οι μεγάλες συσσωρεύσεις διαταραχών μπορούν να δημιουργήσουν μια μεγάλη τάση προς τα πίσω και να οδηγήσουν σε υψηλό ρυθμό ενδοτράχυνσης. [44]-[50]

Οι ωστενιτικοί χάλυβες χρωμίου-νικελίου έχουν ενέργειες σφαλμάτων συσσώρευσης 5-60mJ/m² και αναμένεται ότι τα κράματα με το υψηλότερο ποσοστό σε νικέλιο θα παρουσιάσουν την μικρότερη ενδοτράχυνση, καθώς το νικέλιο είναι ένα από τα στοιχεία που αυξάνει την ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης του ωστενίτη. Τα στοιχεία όπως χρώμιο, μαγγάνιο, κοβάλτιο, πυρίτιο, άνθρακας και άζωτο μειώνουν την ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης του ωστενίτη. Επίσης η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης μειώνεται με την πτώση της θερμοκρασίας. Άρα όσο μικρότερη γίνεται η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης τόσο μεγαλώνουν και οι πιθανότητες να φυτρώσει ε μαρτενσίτης. Η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης για ωστενιτικούς χάλυβες και κυρίως ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες σε θερμοκρασία δωματίου, υπολογίζεται με βάση την χημική σύσταση από την εξίσωση (1): SFE(room temperature) (mJ/m²) = -53 + 6.2(Ni) + 0.7(Cr) + 3.2(Mn) + 9.3(Mo) (wt%) ενώ με βάση την θερμοκρασία από την εξίσωση (2): SFE=SFE(room temperature) + 0,05*(T-293K). [11], [17]-[21], [23], [54]

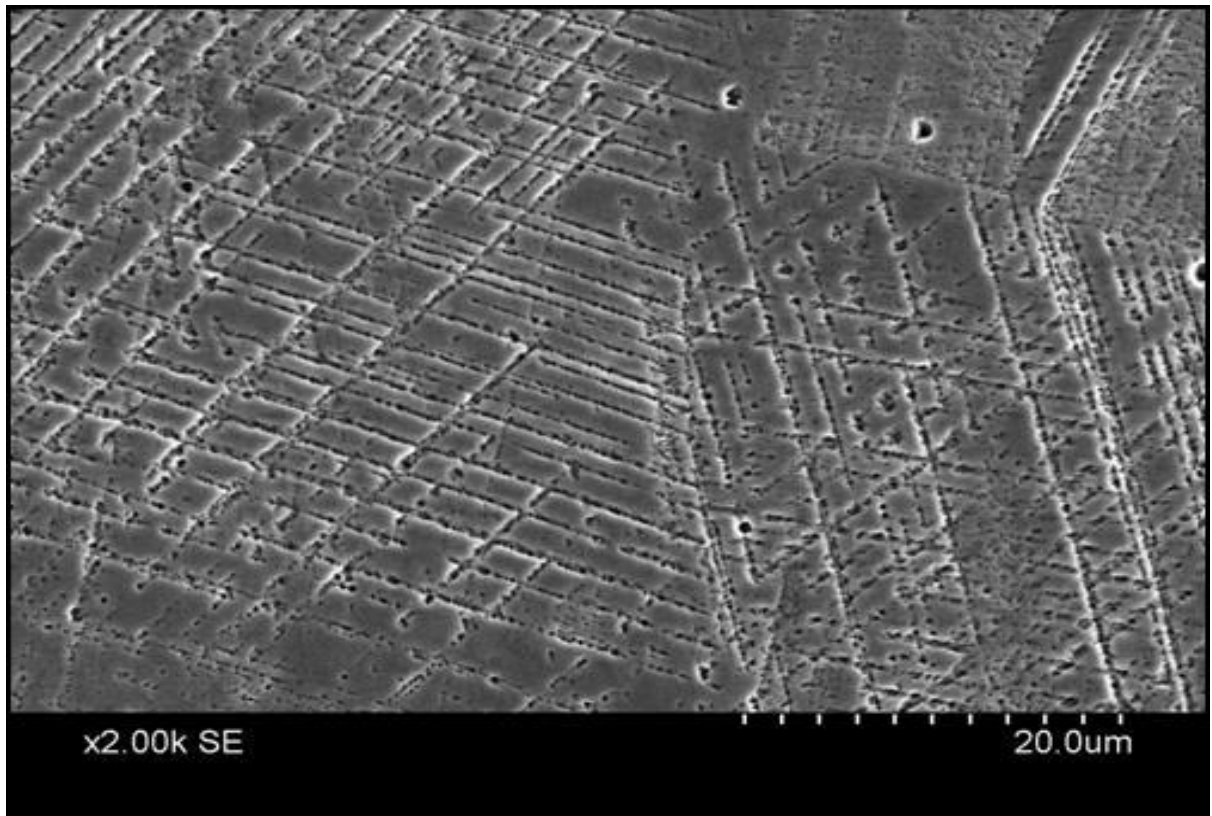


Εικόνα 12. Εξαγωνική Κρυσταλλική Δομή (H.C.P) [22]

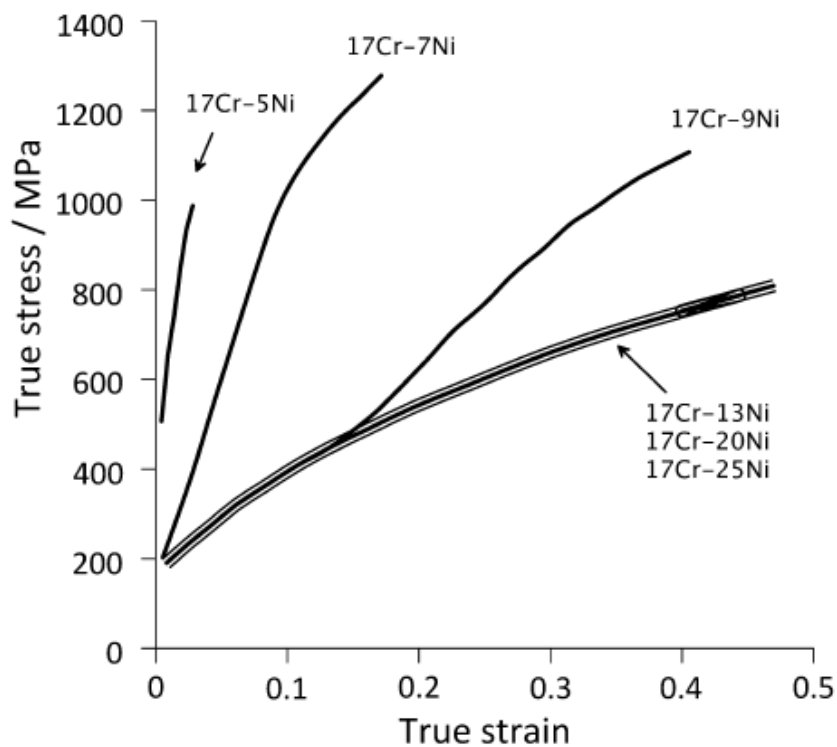
Με επακόλουθη παραμόρφωση ή ψύξη ή και τα δύο, οι περιοχές του ε-μαρτενσίτη μεταμορφώνονται πολύ γρήγορα σε μαρτενσίτη α' , δομής BCC. Ουσιαστικά ο ε-μαρτενσίτης μετασχηματίζεται σχεδόν πάντα σε α' μαρτενσίτη σε υψηλότερες παραμορφώσεις (higher strains). Η μέγιστη ποσότητα ε-μαρτενσίτη συνήθως παρατηρείται σε παραμορφώσεις χαμηλότερες από 15%, εξαρτώμενη πάντα από την θερμοκρασία παραμόρφωσης. Επίσης α' φυτρώνει στις διεπιφάνειες μεταξύ ε μαρτενσίτη και ωστενιτικής μήτρας γ , όπως και στο σημείο τομής των πλακιδίων ε-μαρτενσίτη. Ουσιαστικά η φάση του ε μαρτενσίτη μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενδιάμεση μετασταθής φάση στην φύτρωση του α' μαρτενσίτη από την ωστενιτική μήτρα γ , δηλαδή υπάρχει μια μετάβαση από την $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ (stress assisted martensite). Ακόμα ο μετασχηματισμός του ωστενίτη γ σε μαρτενσίτη α' μπορεί να συμβεί στις διεπιφάνειες και στα σημεία τομής διδύμων (deformation or annealing twins) (strain induced martensite), στο εσωτερικό των διδύμων, στα σημεία τομής των ζωνών διάτμησης (shear bands), στα όρια των κόκκων και στα τριπλά σημεία ορίων των κόκκων. Όπως και στην περίπτωση του ε-μαρτενσίτη, οι μηχανικοί δίδυμοι ή διδυμοί παραμόρφωσης μπορούν να αποτελέσουν μια ενδιάμεση μετασταθής φάση για την φύτρωση του α' . Η μορφολογία του α' μαρτενσίτη είναι κυρίως τύπου 'Irregular lath' και 'blocky'. Με βάση την θεωρία των διαταραχών ο μηχανισμός φύτρωσης του α' μαρτενσίτη γίνεται στα σημεία που συσσωρεύονται οι διαταραχές (dislocation pile-ups) π.χ όρια διδύμων παραμόρφωσης και πλακιδίων ε-μαρτενσίτη. Όσο περισσότερες διαταραχές συσσωρεύονται στα σημεία αυτά τόσο αυξάνει και η ποσότητα του α' μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης αρχικά αναπτύσσεται κάθετα προς και κυρίως στην μια πλευρά του επιπέδου ολίσθησης (111) γ . Η παρουσία των διδύμων παραμόρφωσης, του ε και του α' μαρτενσίτη οδηγούν το κράμα σε σκλήρωση και σε αύξηση της μηχανικής του αντοχής. [11], [17], [18], [19], [20], [21], [23], [27], [28], [29], [44]-[50]

Ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη αποτελεί χωρίς αμφιβολία την μεγαλύτερη επίδραση στους ρυθμούς ενδοτράχυνσης του κράματος, και το οποίο παρουσιάζεται στις καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης αρκετών ωστενιτικών χαλύβων, όπου με την μείωση του περιεχόμενου νικελίου μειώνεται και η σταθερότητα του ωστενίτη (Εικόνα 14). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθούν

όρια διαρροής πάνω από 1500Μρα. Π.χ ένας μετασταθής ωστενίτης που περιέχει 17Cr-4Ni-3Mn-0.1C %κ.β μετά από 40% παραμόρφωση σε θερμοκρασία δωματίου και σχεδόν πλήρη μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη έχει 0,2% συμβατικό όριο διαρροής 1700Μρα. [11]



Εικόνα 13. Μικροδομή ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα SS304 έπειτα από κρυογενική έλαση στους -196°C με 10% παραμόρφωση. Παρατηρείται αριστερά της εικόνας μαρτενσίτης α' και δεξιά μαρτενσίτης ε. Η μικρογραφία είναι από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης(SEM) [28]



Εικόνα 14. Η επίδραση της μείωσης του περιεχόμενου νικελίου στις καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων [11]

viii. Τύποι ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων και ιδιότητες τους

Ο πιο κοινός ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας είναι ο αποκαλούμενος 18-8 με περιεκτικότητα σε χρώμιο 18% κ.β και 8% κ.β σε νικέλιο. Έχει την ελάχιστη περιεκτικότητα σε νικέλιο που είναι συνακόλουθη της ωστενιτικής μικροδομής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ωστόσο σε μερικές περιπτώσεις π.χ μετά από παραμόρφωση, ή αν το ποσοστό σε άνθρακα είναι χαμηλό, μπορεί να μετασχηματιστεί μερικώς σε μαρτενσίτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μερικές από τις πιο συνήθεις προδιαγραφές ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων τύπου 18-8 δίνονται στην εικόνα 15. [11]

Element	Numerical designation of steel type						
	301	302	304	310	316	321	347
C	0.15 max	0.08 max	0.08 max	0.25 max	0.08 max	0.08 max	0.08 max
N	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cr	16–18	17–19	18–20	24–26	16–18	17–19	17–19
Ni	6–8	8–10	8–12	19–22	10–14	9–12	9–13
Mo					2–4		
Ti						5 × C	
Nb							10 × C
Mn	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Εικόνα 15. Χημικές συστάσεις %κ.β των πιο κοινών ανοξείδωτων ωστενιτικών χάλυβων. [11]

Μεγαλύτερη σταθερότητα της ωστενιτικής μικροδομής επιτυγχάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο, όπως παρουσιάζεται στον τύπο 310 από την εικόνα 15.

Γενικά οι ανοξείδωτοι χάλυβες 18-8 οφείλουν την ευρεία χρήση τους στην γενικότερη εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ωστόσο αυτό βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νικέλιο και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χρώμιο που δίνει μεγαλύτερη αντοχή στην περικρυσταλλική διάβρωση. Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι επιρρεπείς στην εργοδιάβρωση ή διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ιδιαίτερα με την παρουσία ιόντων χλωρίου, όπου λίγα ppm μπορεί μερικές φορές να αποδειχθούν καταστροφικά. Αυτό είναι ένα είδος αστοχίας που συμβαίνει σε διαβρωτικά περιβάλλοντα κάτω από μικρές τάσεις που είτε έχουν εφαρμοστεί σκόπιμα είτε έχουν παραμείνει από την κατασκευή του υλικού ως εναπομείναντες τάσεις (residual stresses). Στους ανοξείδωτους ωστενιτικούς χάλυβες παρουσιάζεται σαν διακρυσταλλικές ρωγμές οι οποίες είναι πιο εύκολο να αναπτυχθούν σε ζεστά διαλύματα χλωρίου. Το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης περιορίζεται σε κράματα ωστενιτικών με υψηλότερο ποσοστό σε νικέλιο. [11]

Ο τύπος 316 ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα περιέχει 2-4% κ.β μολυβδαίνιο, το οποίο δίνει ουσιαστική βελτίωση στην γενικότερη αντοχή στην διάβρωση και ιδιαίτερα στην αντοχή στην διάβρωση οπών, η οποία μπορεί να καθοριστεί ως οπές ή τοπικές διεισδύσεις πάνω στο αντιδιαβρωτικό-παθητικό στρώμα και η οποία προκύπτει συνήθως σε διαλύματα χλωρίου. Πρόσφατα αναπτύχθηκαν κάποιοι τύποι αντοχής στην διάβρωση οπών με ως και 6,5% κ.β σε μολυβδαίνιο, αλλά με το χρώμιο και το νικέλιο αλλαγμένα με περιεκτικότητες 20% και 24% κ.β αντίστοιχα ώστε να διατηρηθεί και η ωστενιτική μικροδομή. Κράματα όπως αυτά είναι γνωστά ως υπερωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες. [11]

Η διάβρωση στα όρια των κόκκων μπορεί να αποτελέσει ένα σοβαρό πρόβλημα, ιδιαίτερα όταν υπάρξει κατακρήμνιση $Cr_{23}C_6$ σε αυτές τις περιοχές έπειτα από θερμική κατεργασία υψηλής θερμοκρασίας όπως η συγκόλληση. Για να

καταπολεμηθεί αυτό το φαινόμενο μερικοί τύποι ωστενιτικών όπως 304 και 316 φτιάχνονται με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,03% κ.β και ορίζονται ως 304L και 316L όπου L= Low Carbon Content=χαμηλό ποσοστό% κ.β σε άνθρακα. Εναλλακτικά νιόβιο ή τιτάνιο προστίθενται ώστε να ενωθούν με τον άνθρακα , όπως στους τύπους 321 και 347. [11]

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες τυπικά έχουν συμβατικό όριο διαρροής 250Μpa και μέγιστη εφελκυστική αντοχή 500-600Μpa. Με σφοδρή ψυχρή κατεργασία , δηλαδή 80% ελάττωση διατομής στην σχεδίαση σύρματος , τα σχετικά μέτρια όρια διαρροής των συνηθισμένων ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων μπορεί να φτάσουν και τα 1200 Μpa. [11]

ix. Εφαρμογές

Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε οικιακά , βιομηχανικά , μεταφορικά και αρχιτεκτονικά προϊόντα βασισμένα κυρίως για την αντοχή τους στην διάβρωση, αλλά και την δυνατότητα τους για μορφοποίηση, την μηχανική τους αντοχή και τις ιδιότητες τους σε ακραίες θερμοκρασίες. Επειδή το αρχικό τους κόστος είναι συχνά υψηλότερο από αυτό των εναλλακτικών υλικών, η δημοτικότητα τους βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους τους καθ'όλη την διάρκεια ζωής τους. Οι βιομηχανίες τροφίμων, φαρμάκων , χημικών , χαρτοπολτού και χαρτιού και πετροχημικών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες λόγω της αντοχής τους στην διάβρωση , η οποία αποδίδει αργή συντήρηση , έλλειψη μόλυνσης του προϊόντος , υψηλή καθαριότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής. Η ευκολία κατά την συγκόλληση και τη κατασκευή είναι σημαντική σε αυτές τις εφαρμογές, αλλά ο ανοξείδωτος χρησιμοποιείται απλά και μόνο επειδή είναι το πιο οικονομικό υλικό που μπορεί να κάνει αυτή τη δουλειά. Τα αρχικά κόστη είναι συχνά ένας κακός υπολογισμός για ένα υλικό , όπως στην περίπτωση των ράβδων οπλισμού σκυροδέματος , όπου ολόκληρη η κατασκευή κινδυνεύει από την διάβρωση ενός δευτερεύοντος εξαρτήματος. [15] , [8] , [11]

Μερικές φορές η δυνατότητα για μορφοποίηση γίνεται εξίσου σημαντική με την αντοχή στην διάβρωση. Τεντωμένα-διαμορφωμένα μέρη , όπως οι νεροχύτες είναι ένα παράδειγμα χρήσης των πιο μη σταθεροποιημένων ωστενιτικών τύπων ανοξείδωτου χάλυβα , ενώ οι υψηλά σταθεροποιημένοι τύποι ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων χρησιμοποιούνται για μέρη βαθιάς κοίλανσης ή για εξαρτήματα όπου ζητείται χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Φίλτρα αυτοκινήτων , φουσίγια των στυλό , δοχεία μαγειρέματος(κατσαρόλες) , τμήματα σκληρού δίσκου είναι παραδείγματα του τελευταίου. [15] , [8] , [11]

Η υψηλή αντοχή του ψυχρά κατεργασμένου ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα, τον καθιστά ως ένα επικρατέστερο υλικό για χρήση σε αυτοκίνητα διαμετακόμησης , αλλά επίσης και σε ελατήρια, λεπίδες μαχαιριών και άγκυρες ζώνης ασφαλείας.

Αφού οι ωστενιτικοί είναι δύσθραυστοι ακόμα και σε θερμοκρασίες υγρού ηλίου , χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλες τις κρυογενικές εφαρμογές. Μοναδικώς είναι εξίσου χρήσιμοι σε θερμοκρασίες άνω των 800 °C , όπου βρίσκουν ευρεία χρήση σε εναλλάκτες θερμότητας (Εικόνα 17) , βραστήρες (Εικόνα 16) , τουρμπίνες , κάμινους και σε συστήματα εξατμίσεων αυτοκινήτων , όπου η δυνατότητα για μορφοποίηση των φερριτικών ή η αντοχή τους στον ερπυσμό είναι ανεπαρκής. [15] , [8] , [11]



Εικόνα 16. Δεξαμενή αποθήκευσης φτιαγμένη από ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα. [42]



Εικόνα 17. Σωλήνες εναλλάκτη θερμότητας φτιαγμένοι από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα S321/S321 H [24]

2. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ(CRYOGENIC)

2.1 Εισαγωγή

Η επιστήμη και η τεχνολογία παραγωγής περιβάλλοντος χαμηλής θερμοκρασίας αναφέρεται γενικά ως κρυογενική(cryogenic). Η λέξη κρυογενική αυστηρά σημαίνει να παραχθεί κρύο , αλλά ο όρος έχει αποκτήσει μια γενικότερη έννοια με τα χρόνια από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες. Σήμερα ο όρος κρυογενική συνδέεται με την παραγωγή και την μελέτη περιβάλλοντων χαμηλής θερμοκρασίας. Έτσι ένας μηχανικός κρυογενικής (cryogenic engineer) είναι ένα άτομο το οποίο ειδικεύεται σε αυτούς τους τομείς. Η τεχνογνωσία ενός μηχανικού κρυογενικής μπορεί να ποικίλει σημαντικά σε αυτόν τον κλάδο. Η εξειδίκευση στην κρυογενική μηχανική είναι σε ζήτηση σε μια ευρεία ποικιλία τεχνολογικών πεδίων , συμπεριλαμβανομένων προηγμένων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και αποθήκευσης , μεταφοράς και διαστημικών προγραμμάτων και μιας ευρείας ποικιλίας ερευνητικών προσπαθειών της φυσικής και της μηχανικής. [25] , [26]

Με τα χρόνια η λέξη κρυογενική ανέπτυξε αρκετές κοινές χρήσεις. Ένα κρυογενικό υγρό , είναι ένα υγρό το οποίο χρησιμοποιείται με σκοπό να παραχθεί κρύο, ενώ κρυογενικά μηχανήματα είναι τα εξαρτήματα για να επιτευχθούν τα περιβάλλοντα χαμηλής θερμοκρασίας. Αρχικά φαίνεται ότι όλα τα μηχανήματα και τα υγρά που χρησιμοποιούνται στην ψύξη θα αναγνωρίζονται ως κρυογενικά. Γενικά όμως γίνεται αποδεκτό ότι η λέξη κρυογενική είναι αποκλειστικά για εκείνες τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες κάτω περίπου από τους 100-150 K. Αυτή η διάκριση καθιερώνεται επειδή αντιπροσωπεύει το σημείο(τη θερμοκρασία) όπου τα μόνιμα αέρια N₂ και O₂ αρχίζουν να υγροποιούνται. Μερικές φορές , η κρυογενική χρησιμοποιείται αναφορικά με την υγροποίηση του φυσικού αερίου και γενικότερα με την τεχνολογία υγροποίησης του. Τα σημεία υγροποίησης ορισμένων κρυογενικών υγρών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 18. [25] , [26]

System	CH ₄	O ₂	Ar	CO ₂	N ₂	Ne	H ₂	He
Liquefaction temperature (K)	111.7	90.1	87.4	81.1	77.3	27.2	20.4	4.2

Εικόνα 18. Θερμοκρασίες υγροποίησης κάποιων κρυογενικών υγρών. [26]

Ουσιαστικά τα συγκεκριμένα υγρά παύουν να είναι υγρά πάνω από αυτές τις θερμοκρασίες(σε °C) και εξατμίζονται.

Η επίτευξη αυτών των χαμηλών και πολύ χαμηλών θερμοκρασιών έχει εξαρτηθεί από την ανάπτυξη τεχνικών κρυογενικής, αλλά κυρίως από τα επιτεύγματα στον τομέα των υλικών. Υλικά που παίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτήν την κατεύθυνση. Ως κίνητρο για συζήτηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο της κρυογενικής και των ιδιοτήτων τους σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι χρήσιμο να εντοπιστούν οι κυριότερες εφαρμογές για κρυογενική τεχνολογία σήμερα. Ορισμένες από αυτές είναι εμπορικές επιχειρήσεις, ενώ άλλες βρίσκονται ακόμη στα στάδια της έρευνας και της ανάπτυξης. Είναι δυνατόν να διαχωριστούν αυτές οι εφαρμογές στις επόμενες κατηγορίες: [25] , [26]

- Αποθήκευση και μεταφορά κρυογενικών υγρών
- Διαχωρισμός και παραγωγή αερίων

- Βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές
- Τροποποίηση ιδιοτήτων των υλικών με μείωση της θερμοκρασίας
- Διαστημικές εφαρμογές (πρόωση πυραύλων , προσομοίωση του διαστήματος)
- Υπεραγωγιμότητα

2.2 Υλικά για κρυογενικές εφαρμογές

Στις κρυογενικές εφαρμογές , τα υλικά που χρησιμοποιούνται , θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά λόγω των δραστικών αλλαγών των ιδιοτήτων τους , όταν αυτά εκτίθενται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Υλικά τα οποία είναι όλκιμα κανονικά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορεί να γίνουν εξαιρετικά ψαθυρά όταν υποβάλλονται σε κρυογενικές θερμοκρασίες , ενώ άλλα υλικά μπορεί να βελτιωθούν όσον αφορά τις ιδιότητες της ολκιμότητας. Μόλις επιλεγθούν τα υλικά , η μέθοδος σύνδεσης τους θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά , ώστε να εξασφαλιστεί ότι η επιθυμητή απόδοση διατηρείται με την χρήση των κατάλληλων τεχνικών συγκόλλησης. [25] , [26]

Όταν οι ιδιότητες των υλικών , οι οποίες λαμβάνονται υπόψη για κρυογενικές χρήσεις είναι άγνωστες ή δεν μπορούν να βρεθούν σε γνωστούς οδηγούς και πρότυπα , εκτιμώνται πειραματικά πριν γίνει οποιαδήποτε χρήση των υλικών αυτών σε αυτές τις συνθήκες. [25] , [26]

Τα χαρακτηριστικά των υλικών αλλάζουν σημαντικά με την θερμοκρασία. Αν και σε χαμηλές θερμοκρασίες η αντοχή και η σκληρότητα των περισσότερων υλικών αυξάνεται , αυτά έχουν την τάση να συρρικνώνονται και να γίνονται ψαθυρά. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό κρυογενικών συστημάτων. Οι 2 ιδιότητες που είναι συχνά περισσότερο ανησυχητικές είναι η ένταση της τάσης σ μέσα στο υλικό και το μέτρο ελαστικότητας E . Αυτές οι ιδιότητες του υλικού εισέρχονται στον υπολογισμό των μηχανισμών αστοχίας σε μηχανολογικές κατασκευές. Για τα πιο κοινά δομικά υλικά , το όριο διαρροής και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή αυξάνουν με την μείωση της θερμοκρασίας. Το μέγεθος αυτής της αύξησης κυμαίνεται περίπου από 10% σε μερικά μεταλλικά κράματα στο 100% σε αρκετά πολυμερή υλικά. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει με την μείωση της θερμοκρασίας. [25] , [26]

Πολλά μεταλλικά στοιχεία και ένας μεγάλος αριθμός κραμάτων μετατρέπονται σε κατάσταση με ουσιαστικά μηδενική ηλεκτρική αντίσταση όταν ψύχονται σε θερμοκρασίες κοντά σε εκείνες του σημείου βρασμού του υγρού ηλίου. Πιο πρόσφατα με την ανακάλυψη υπεραγώγιμων υλικών υψηλού πεδίου , οι τεχνικές εφαρμογές αποκαταστάθηκαν. Συγκεκριμένα μεγάλης κλίμακας υπεραγώγιμοι μαγνήτες και υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά είναι πλέον αρκετά καλά εγκατεστημένα υποπεδία υπεραγωγιμότητας. Τα υπεραγώγιμα υλικά απαιτούν περιβάλλοντα υγρού ηλίου για να πετύχουν τις ιδιότητες τους , αλλά σημαντικότερα η συμπεριφορά των υπεραγώγιμων συσκευών διέπεται σε μεγάλο βαθμό από προβλήματα μεταφοράς θερμότητας , αποτελεσματικής ψύξης και ασφάλειας. Για παράδειγμα οι ιδιότητες ενός υπεραγωγού είναι αγώγιμες μεταφέροντας ηλεκτρικό ρεύμα , υπό την προϋπόθεση ότι το υλικό παραμένει κάτω από την τοπική κρίσιμη θερμοκρασία και

πεδίο. Η θερμική ισορροπία δεν είναι πάντα δυνατή , επομένως οι υπεραγωγοί πρέπει να κατασκευάζονται από ένα υλικό μήτρας χαμηλής αντοχής όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο για να παρέχουν την δυνατότητα μεταφοράς ρεύματος σε περίπτωση που ο υπεραγωγός εισέλθει στην κανονική κατάσταση. [25] , [26]

Με βάση τις ιδιότητες τους που καθορίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες , μόνο ορισμένα υλικά είναι κατάλληλα για χρήση σε κρυογενικές εφαρμογές. Τα υλικά αυτά είναι οι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, ο χαλκός, ο ορείχαλκος , το αλουμίνιο και τα κράματά του , κράματα Ni/Fe (invar), υπερκράματα νικελίου και πολυμερή υλικά(Teflon , Karton , Mylar). Τα μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν την καλύτερη σχέση μεταξύ αντοχής και ολκιμότητας συγκρινόμενα με τα άλλα υλικά. Για παράδειγμα τα κεραμικά υλικά παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ολκιμότητα σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά. Τα σύνθετα υλικά κατέχουν μια ενδιάμεση θέση μεταξύ κεραμικών και πολυμερών υλικών , όσον αφορά την αντοχή και την ολκιμότητα τους. Άρα λόγω του μεγάλου πλεονεκτήματος που έχουν τα μεταλλικά υλικά ιδιαίτερα όσον αφορά την ολκιμότητα , τα καθιστά καταλληλότερα για κρυογενικές εφαρμογές. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την θερμοκρασία περιβάλλοντος τα μεταλλικά υλικά συμπεριφέρονται καλύτερα λόγω της κρυσταλλικής τους δομής. Το όριο διαρροής και η εφελκυστική αντοχή των μεταλλικών υλικών που κρυσταλλώνονται στην χωροκεντρωμένη κυβική δομή εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία. Τα χωροκεντρωμένα μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν μειωμένη ολκιμότητα σε μια στενή θερμοκρασιακή περιοχή κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος σε σημείο που τα καθιστά ψαθυρά, ειδικά σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου. Απο την άλλη τα μεταλλικά υλικά που κρυσταλλώνονται στην εδροκεντρωμένη κυβική δομή παρουσιάζουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και ελαφρά μειωμένη ολκιμότητα σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες απο την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ουσιαστικά διατηρούν την δυσθραυστότητα τους και την ολκιμότητα τους σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και σε μερικές περιπτώσεις η ολκιμότητα τους αυξάνει με την μείωση της θερμοκρασίας. [25] , [26]

Από τα πιο χρησιμοποιούμενα μεταλλικά υλικά της FCC δομής σε κρυογενικές θερμοκρασίες είναι οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες και πιο συγκεκριμένα η σειρά 300. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες της σειράς 300 προσφέρουν ένα πολύ καλό συνδυασμό δυσθραυστότητας και συγκολλησιμότητας για εφαρμογή στις πιο χαμηλές θερμοκρασίες. Η χρήση τους είναι ικανοποιητική για θερμοκρασίες μέχρι και -196°C , όπως μεταφορά και αποθήκευση κρυογενικών προϊόντων(Υγροποιημένο φυσικό αέριο) λόγω του χαμηλού τους κόστους και της ευκολίας κατασκευής τους (Εικόνα 19). Η αποθήκευση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου(LNG) γίνεται στους 110K δηλαδή -163°C περίπου. Το σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς του πρέπει να προστατεύεται από την ψαθυρότητα χαμηλής θερμοκρασίας και την υψηλή πίεση. Ανάγκες τις οποίες ικανοποιούν οι ήδη ευρέως χρησιμοποιούμενοι στην βιομηχανία αυτή χάλυβες της σειράς 300, ο 304 και ο 316, που τελευταία βέβαια υπήρξαν διάφορες ανησυχίες όσον αφορά την διάβρωση τους στο θαλασινό νερό. Γι αυτό η μελέτη για χρήση άλλων τύπων της σειράς 300 που παρουσιάζουν και καλύτερη αντοχή στην διάβρωση σε θαλάσσια περιβάλλοντα γίνεται τα τελευταία χρόνια. [25] , [26] , [29] , [30]



Εικόνα 19. Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς Υγροποιημένου φυσικού αερίου(LNG) [29]

3. Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

3.1 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και μηχανικές ιδιότητες

Οι βασικές αρχές της παραμόρφωσης και της θραύσης μπορούν να περιγραφούν μέσω της δοκιμής εφελκυσμού. Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη δοκιμή για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών υλικών. [33] , [36]

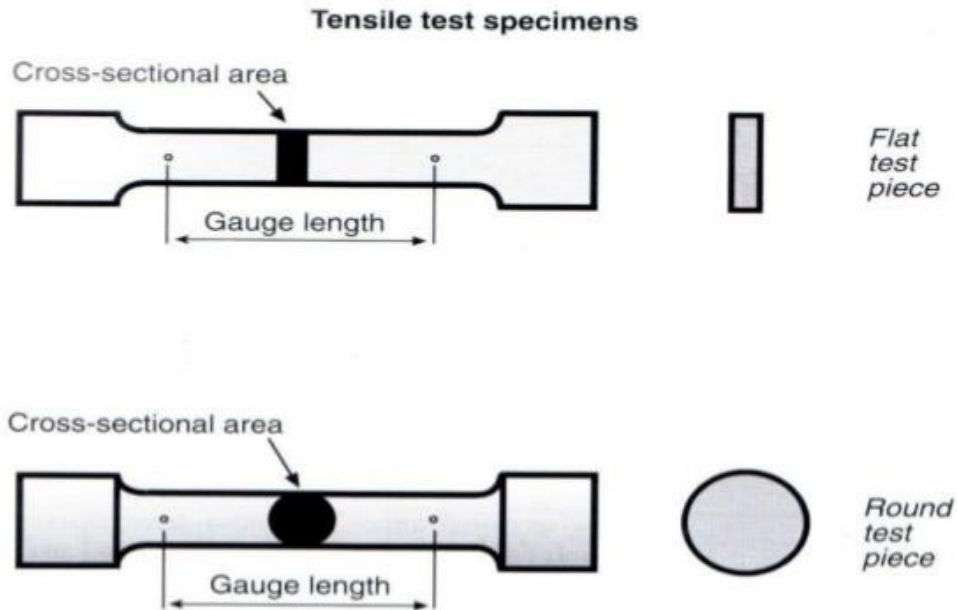
Η δοκιμή γίνεται συνήθως σε μια μηχανή που καταγράφει τη δύναμη εφελκυσμού που ασκείται πάνω στο δοκιμαζόμενο δοκίμιο, καθώς και την επιμήκυνση του δοκιμίου (Εικόνα 20). Έτσι αν F , είναι η δύναμη και $\Delta L = L - L_0$ η επιμήκυνση του δοκιμίου , τότε το καταγραφικό καταγράφει καμπύλη $F-\Delta L$. [33] , [36]



Εικόνα 20 . Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού [31]

Το δοκίμιο είναι συνήθως μια ράβδος κυκλικής διατομής ή ένα έλασμα με τυποποιημένες διαστάσεις, που διαφέρουν από χώρα σε χώρα (Εικόνα 21). Η επιμήκυνση μετριέται πάνω στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει ‘σταθερή διατομή’ , ανάμεσα σε 2 χαραγές αναφοράς που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του

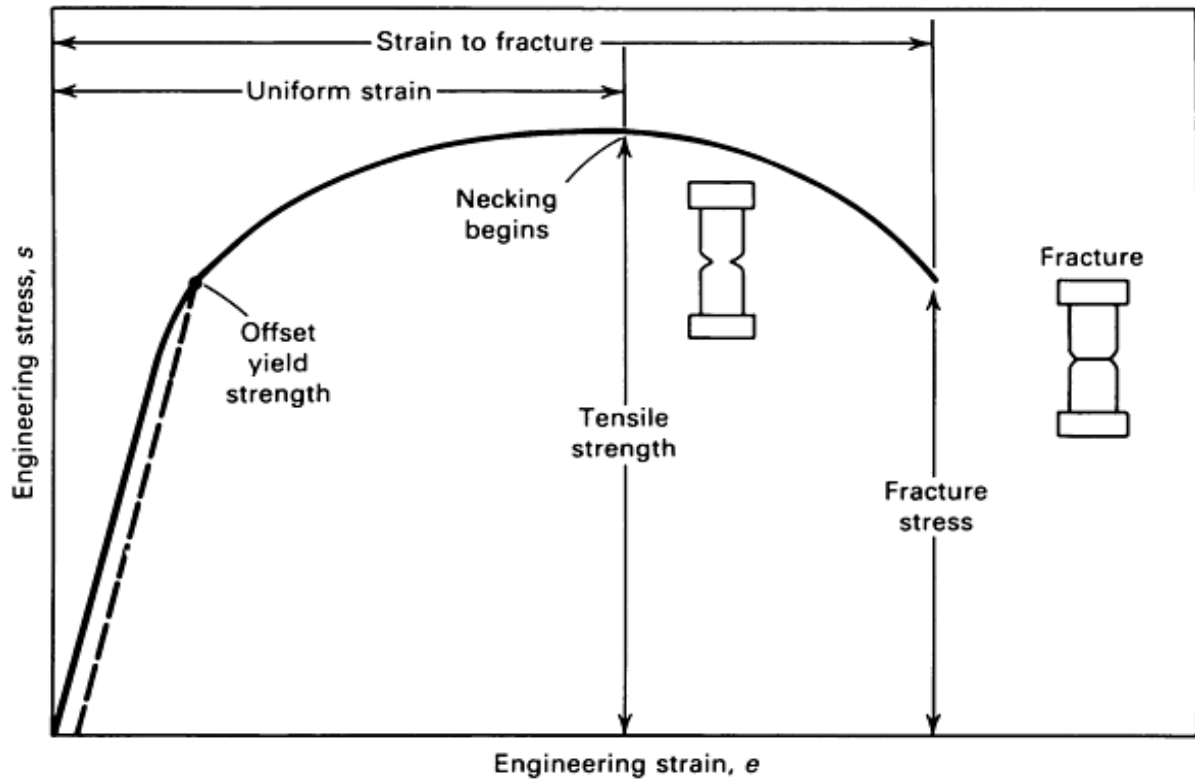
δοκιμίου L_0 . Τα άκρα του δοκιμίου έχουν ισχυρότερη και μεγαλύτερη διατομή (grip areas). [33] , [36]



Εικόνα 21. Τύποι δοκιμίων εφελκυσμού: Flat test piece=δοκίμιο τύπου ελάσματος(ορθογωνικής διατομής) , Round test piece= δοκίμιο τύπου ράβδου(κυκλικής διατομής). Gauge length= ωφέλιμο μήκος δοκιμίου και Cross-sectional area= κεντρικό τμήμα δοκιμίου από όπου μετριέται η επιμήκυνση. [32]

Αν A_0 είναι η αρχική διατομή του δοκιμίου και L_0 το αρχικό του μήκος, συνηθίζεται να ανάγεται η δύναμη F ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή $s = F/A_0$, όπου s η τάση(εφελκυστική) που ασκείται στο δοκίμιο, η οποία ονομάζεται και μηχανική τάση και έχει μονάδες μέτρησης N/m^2 ή Pa . Επίσης ανάγεται η επιμήκυνση ΔL στην μονάδα του μήκους του δοκιμίου L_0 , $e = \Delta L/L_0$,η οποία αποτελεί την ειδική επιμήκυνση(elongation) , ή όπως την αποκαλούμε για εν συντομία παραμόρφωση(strain) ή μηχανική παραμόρφωση. [33] , [36]

Προφανώς οι καμπύλες $F-\Delta L$ και $s-e$ έχουν ακριβώς την ίδια μορφή , γιατί τα S_0 και L_0 είναι 2 σταθεροί αριθμοί.



Εικόνα 22. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης. [33]

Το σχήμα και το μέγεθος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης εξαρτάται από την σύσταση, την θερμική κατεργασία, το ιστορικό της πλαστικής παραμόρφωσης, τον ρυθμό παραμόρφωσης, την θερμοκρασία και την τάση που ασκήθηκε κατά την διάρκεια της δοκιμής. Από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μπορούν να εξαχθούν διάφορες χρήσιμες μηχανικές ιδιότητες και μεγέθη σχετικά με το εξεταζόμενο υλικό, όπως το όριο διαρροής, η μέγιστη εφελκυστική αντοχή, η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα κ.α. [33], [36]

Το γενικό σχήμα της καμπύλης μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης (εικόνα 22) απαιτεί περαιτέρω εξήγηση. Το παραπάνω διάγραμμα είναι ένα διάγραμμα $s-e$, όπου το σημείο τομής της διακεκομένης γραμμής με την καμπύλη καθορίζει το συμβατικό σημείο διαρροής (Offset yield strength). Το σημείο που ξεκινάει ο λαιμός (necking) είναι το σημείο μέγιστης εφελκυστικής αντοχής (UTS) ή Αντοχής σε εφελκυσμό και το σημείο που τελειώνει η καμπύλη αποτελεί το σημείο της θραύσης (Fracture). Ομοιόμορφη παραμόρφωση (Uniform strain) παρατηρείται μέχρι το σημείο έναρξης σχηματισμού λαιμού. Μετά την έναρξη σχηματισμού λαιμού ως και την θραύση η παραμόρφωση είναι ανομοιόμορφη (non-uniform). Στο τμήμα της καμπύλης μεταξύ συμβατικού ορίου διαρροής και μέγιστης εφελκυστικής αντοχής, παρατηρείται αύξηση της αντοχής του υλικού. Αυτή η αύξηση στην αντοχή είναι το αποτέλεσμα της ενδοτράχυνσης (strain hardening) και το τμήμα της καμπύλης ονομάζεται τμήμα ενδοτράχυνσης (strain hardening section). Ένας τρόπος μέτρησης του βαθμού της ενδοτράχυνσης ενός υλικού είναι η αναλογία μέγιστης εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής και ονομάζεται **αναλογία ενδοτράχυνσης (strain**

hardening ratio). Πριν από το συμβατικό σημείο διαρροής η τάση που ασκείται στο δοκίμιο είναι γραμμικά ανάλογη της παραμόρφωσης δηλαδή της μορφής $s = E * e$ (νόμος του Hooke). Η περιοχή αυτή ορίζεται ως ελαστική περιοχή. Η μηχανική συμπεριφορά σε αυτή την περιοχή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης ορίζεται από μια βασική φυσική ιδιότητα που ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας (συνχά συντομογραφείται ως $E = s/e$). Το μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση της γραμμής τάσης-παραμόρφωσης σε αυτή τη γραμμική περιοχή και είναι βασική φυσική ιδιότητα όλων των υλικών. Αντιπροσωπεύει ουσιαστικά την σταθερά ελατηρίου ενός υλικού. Στην ελαστική περιοχή η παραμόρφωση είναι ελαστική, δηλαδή υπό την εφαρμογή ενός φορτίου ή μιας τάσης το δοκίμιο θα επιμηκυνθεί όσο συνεχίζει να ασκείται αυτή η τάση, αλλά μόλις σταματήσει να ασκείται η τάση αυτή το δοκίμιο θα επιστρέψει στο αρχικό του μήκος και γενικότερα στις αρχικές του διαστάσεις. Όταν η τάση που ασκείται υπερβεί μια τιμή που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής (Yield Strength) το δοκίμιο αρχίζει να διαρρέει πλαστικά (πλαστική παραμόρφωση). Με τον όρο πλαστική παραμόρφωση εννοείται ότι, αν το δοκίμιο υποστεί τάση μεγαλύτερη του ορίου διαρροής, θα επιμηκυνθεί και θα παραμείνει σε αυτήν την επιμήκυνση και αφού σταματήσει να ασκείται η τάση αυτή. Δηλαδή η εξίσωση $s = E * e$ παύει να ισχύει σε τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση του σημείου διαρροής. Καλύτερη προσέγγιση του ορίου διαρροής γίνεται παρακάτω. [33], [34], [36], [43]

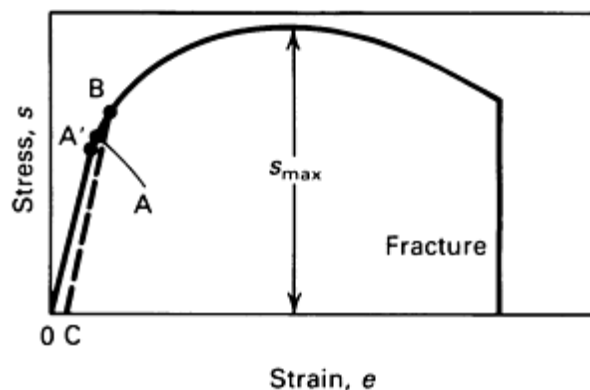
Όριο διαρροής και κριτήρια διαρροής

Η τάση στην οποία παρατηρείται η έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης ή διαρροής εξαρτάται από την ευαισθησία των μετρήσεων παραμόρφωσης. Στα περισσότερα υλικά υπάρχει μια σταδιακή μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά και το σημείο στο οποίο η πλαστική παραμόρφωση ξεκινά είναι δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια. Στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού, έχουν χρησιμοποιηθεί 3 κριτήρια για την έναρξη της διαρροής (yielding): το όριο ελαστικότητας (elastic limit), το όριο αναλογίας (proportional limit) και το όριο διαρροής (yielding strength). [33], [34], [36]

1. Το όριο ελαστικότητας που παρουσιάζεται στην εικόνα 23 και είναι το σημείο A είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει το υλικό χωρίς καμία μετρήσιμη μόνιμη παραμόρφωση να παραμένει σε αυτό και μετά την εφαρμογή αυτής της τάσης. Με την αύξηση της ευαισθησίας της μέτρησης της παραμόρφωσης, η τιμή του ορίου ελαστικότητας μειώνεται μέχρι να γίνει ίσο με το πραγματικό όριο ελαστικότητας που καθορίζεται από τις μετρήσεις μικροπαραμόρφωσης. Με την ευαισθησία της παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται τυπικά στις μελέτες μηχανικής (10^{-4} inch/inch), το όριο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από το όριο αναλογίας. Ο προσδιορισμός του ορίου ελαστικότητας απαιτεί μια κουραστική διαδικασία δοκιμών φόρτισης και εκφόρτισης. Γι αυτό το λόγο, αντικαθίσταται συνχά από το όριο αναλογίας. [33], [34]
2. Το όριο αναλογίας (proportional limit) που παρουσιάζεται στην εικόνα 23 και είναι το σημείο A' ορίζεται ως η οριακή τάση πάνω από την οποία η

σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης παύει να είναι γραμμική και να ισχύει ο νόμος του Hooke ($s = E * e$). Στα περισσότερα υλικά το όριο ελαστικότητας και το όριο αναλογίας είναι πολύ κοντά μεταξύ τους στην καμπύλη s - e (εικόνα 22) και είναι πολύ δύσκολο να καθοριστούν και να διακριθούν με ακρίβεια. Οι τιμές τους εξαρτώνται από την ευαισθησία του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Επομένως σε τέτοιες περιπτώσεις καθορίζεται ένα σημείο στην καμπύλη το συμβατικό σημείο διαρροής (offset yield strength). Συνήθως ορίζεται χαράσσοντας παράλληλη διακεκομμένη γραμμή προς την γραμμική περιοχή της καμπύλης (ελαστική περιοχή) από το 0,2% παραμόρφωση, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 22. Το συμβατικό όριο διαρροής θεωρείται συχνά και ως το όριο διαρροής (yield strength) της καμπύλης. [33] , [34]

3. Ως όριο διαρροής (yield strength) που είναι το σημείο B στην εικόνα 23 είναι η τάση που απαιτείται για να προκληθεί μια μικρή καθορισμένη ποσότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Στην εικόνα 23 το όριο διαρροής συμπίπτει με το συμβατικό όριο διαρροής. [33] , [34]

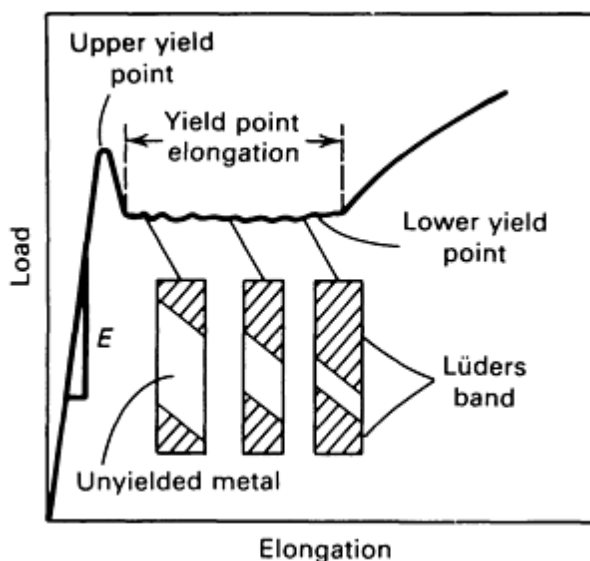


Εικόνα 23. Τυπική καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης για όλκιμο μέταλλο παρουσιάζοντας τα κριτήρια διαρροής. A: όριο ελαστικότητας , A': όριο αναλογίας , B: όριο διαρροής ή συμβατικό όριο διαρροής(0,2%e) [33]

Οι μηχανικοί για σκοπούς σχεδιασμού και προδιαγραφών επιλέγουν το συμβατικό όριο διαρροής, επειδή αποφεύγει τις πρακτικές δυσκολίες μέτρησης των ορίων αναλογίας και ελαστικότητας. Σε κάποια πολύ όλκιμα υλικά όπως ο μαλακός χαλκός και ο γκρι χυτοσίδηρος είναι πολύ δύσκολο να διακριθεί το όριο διαρροής ακόμα και το συμβατικό όριο διαρροής στο 0,2% και γι αυτό καθορίζεται το σημείο διαρροής με τιμή της τάσης που προκαλεί $e=0,005$. Επίσης σε ορισμένα μέταλλα, όπως ο ανοπτημένος χάλυβας με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα , δείχνει ένα τοπικά ετερογενή τύπο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική παραμόρφωση όπου παράγει ένα σημείο διαρροής στην καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης με μια επιμήκυνση του (Εικόνα 24). Το φορτίο αυξάνεται σταθερά με ελαστική παραμόρφωση, πέφτει

ξαφνικά, κυμαίνεται γύρω από περίπου σταθερή τιμή φορτίου και στη συνέχεια αυξάνεται με περαιτέρω παραμόρφωση. Το φορτίο στο οποίο λαμβάνει χώρα η απότομη πτώση ονομάζεται ανώτερο σημείο διαρροής(Upper yield point). Το σταθερό φορτίο ονομάζεται χαμηλότερο σημείο διαρροής και η επιμήκυνση που εμφανίζεται με σταθερό φορτίο ονομάζεται επιμήκυνση του σημείου διαρροής(yield point elongation). Η παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα σε όλη την επιμήκυνση του σημείου διαρροής είναι ετερογενής. Στο ανώτερο σημείο διαρροής, μια διακριτή ζώνη παραμορφωμένου μετάλλου, γίνεται συχνά εύκολα ορατή, εμφανίζεται με μια συγκέντρωση τάσεων, όπως ένα φιλέτο. Συμπτωματικά με το σχηματισμό της ζώνης, το φορτίο πέφτει στο χαμηλότερο σημείο διαρροής. Στη συνέχεια η ζώνη διαδίδεται κατά μήκος του δοκιμίου, προκαλώντας την επιμήκυνση του σημείου διαρροής. Σε τυπικές περιπτώσεις, διάφορες ζώνες σχηματίζονται σε διάφορα σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Αυτές οι ζώνες είναι γενικά σε περίπου 45 ° με τον άξονα του εφελκυσμού. Συνήθως ονομάζονται Lüders ζώνες(luders bands) ή ‘stretcher strains’.

[33]



Εικόνα 24. Τυπική συμπεριφορά σημείου διαρροής σε χάλυβα με χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα. Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας [33]

Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (UTS)

Όσον αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό ή την μέγιστη εφελκυστική αντοχή ορίζεται ως το μέγιστο φορτίο που καταγράφει η δοκιμή εφελκυσμού προς την αρχική διατομή του δοκιμίου και αποτελεί βασική μηχανική ιδιότητα μαζί με το όριο διαρροής που αναφέρθηκε. **UTS(Μέγιστη εφελκυστική αντοχή) = F_{max}/A_0** [33] , [36]

Ολκιμότητα(Ductility)

Όσον αφορά την ολκιμότητα(ductility) που είναι η ικανότητα ενός μετάλλου να παραμορφώνεται ανεξάρτητα από το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάστηκαν για να προκληθεί αυτή η μόνιμη παραμόρφωση, μετριέται με 2 μεγέθη:

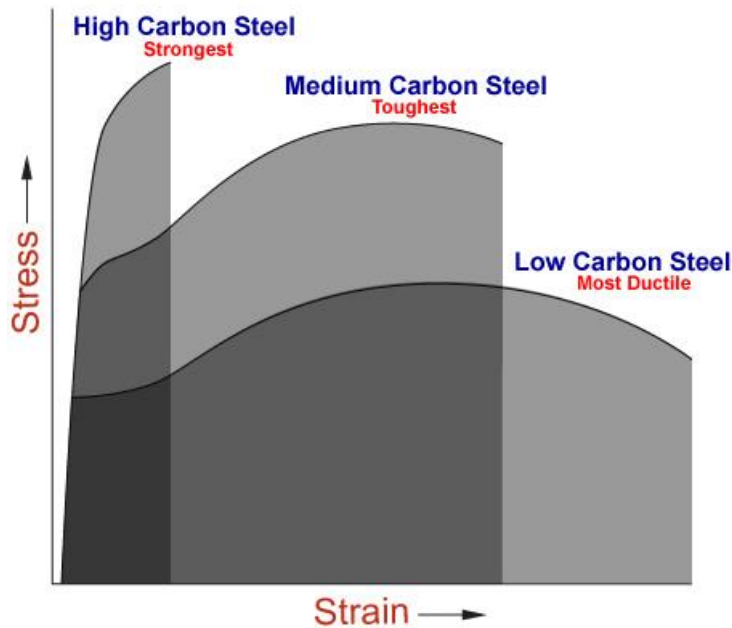
- Την παραμένουσα επιμήκυνση μετά από την θραύση , εκφρασμένη σαν ποσοστό του αρχικού μήκους του δοκιμίου(elongation): $e\% = 100 * (L_f - L_o)/L_o$ (όπου L_f =το μήκος του δοκιμίου μετά την θραύση)
- Την μείωση της διατομής του δοκιμίου στο σημείο που επήλθε η θραύση(Reduction of area): $A\% = 100 * (A_f - A_o)/A_o$ (A_f = η διατομή στο σημείο της θραύσης)

Η ολκιμότητα αποτελεί και αυτή μια βασική μηχανική ιδιότητα του υλικού. [33] , [36]

Δυσθραυστότητα(Toughness)

Μια άλλη ιδιότητα που μπορεί να μετρηθεί από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι η δυσθραυστότητα. Η δυσθραυστότητα είναι μια σύνθετη μηχανική ιδιότητα που αποδίδει συγχρόνως την ικανότητα ενός υλικού να υποβάλλεται σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις πριν από την θραύση δηλαδή να έχει σημαντική ολκιμότητα(ductility) και να αντέχει σε μεγάλα φορτία πάνω από το όριο διαρροής πριν επέλθει η θραύση δηλαδή να έχει υψηλή αντοχή(Tensile Strength). Η ολκιμότητα και η αντοχή είναι 2 ιδιότητες που σπάνια συμβαδίζουν στο ίδιο υλικό σε ικανοποιητικό βαθμό. Όσα υλικά κατέχουν ένα ικανοποιητικό συνδυασμό των 2 αυτών ιδιοτήτων είναι δύσθραυστα και το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι μεγάλο. [33] , [35] , [36]

Η δυσθραυστότητα είναι λοιπόν το εμβαδό κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ή το ολοκλήρωμα της καμπύλης και εκφράζει την μηχανική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει η μονάδα όγκου του υλικού μέχρι να θραυστεί (Εικόνα 25). Μονάδα μέτρησης της δυσθραυστότητας είναι J/m^3 [33] , [35] , [36]



Εικόνα 25. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης 3 διαφορετικών χαλύβων. Το εμβαδό των γραμμοσκιασμένων περιοχών κάτω από τις καμπύλες τους αποτελεί την δυσθραυστότητα των χαλύβων. [35]

Υπάρχουν αρκετές μεταβλητές που έχουν μεγάλη επίδραση στην δυσθραυστότητα ενός υλικού. Αυτές οι μεταβλητές είναι:

1. Ρυθμός παραμόρφωσης(strain rate)
2. Θερμοκρασία
3. 'Notch effect'

Ένα μέταλλο μπορεί να έχει ικανοποιητική δυσθραυστότητα κάτω από στατικά φορτία , αλλά μπορεί να αστοχήσει κάτω από δυναμικά φορτία ή κρούσεις. Κατά κανόνα, η ολκιμότητα και ως εκ τούτου η δυσθραυστότητα μειώνονται όσο αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης. Η θερμοκρασία είναι η 2^η μεταβλητή που επηρεάζει σημαντικά την δυσθραυστότητα. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται , μειώνεται και η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα. Η 3^η μεταβλητή είναι ο όρος 'notch effect' και έχει να κάνει με την κατανομή των τάσεων. Ένα υλικό θα παρουσιάσει καλή δυσθραυστότητα όταν οι τάσεις που εφαρμόζονται είναι μονοαξονικές(εφελκυστικές). Όταν οι τάσεις είναι πολυαξονικές λόγω της παρουσίας του 'notch'(εγκοπής) , το υλικό δεν θα μπορεί να αντέξει την ταυτόχρονη ελαστική και πλαστική παραμόρφωση σε διάφορες κατευθύνσεις. [33] , [35] , [36]

3.2 Καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης

Η παραμόρφωση είναι ένας γενικός όρος και μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά , είτε ως μηχανική παραμόρφωση(engineering stress) είτε ως πραγματική παραμόρφωση(true strain). Η ονομαστική παραμόρφωση που προαναφέρθηκε ή αλλιώς μηχανική παραμόρφωση συχνά συμβολίζεται με το γράμμα e , ενώ η πραγματική παραμόρφωση ή αλλιώς λογαριθμική παραμόρφωση συμβολίζεται με το γράμμα ε . [33]

Η εξίσωση της μηχανικής παραμόρφωσης είναι $e = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0$

Η εξίσωση της πραγματικής παραμόρφωσης είναι:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

Δηλαδή $\varepsilon = \ln[(L_0 + \Delta L) / L_0] = \ln(1 + e)$, αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο μέχρι την έναρξη σχηματισμού λαιμού(necking).

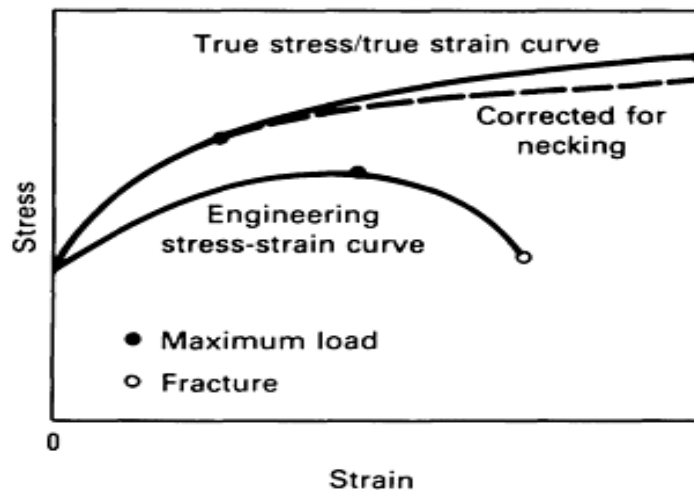
Στη δοκιμή εφελκυσμού η τυπική μέτρηση της παραμόρφωσης είναι η μέτρηση της μηχανικής παραμόρφωσης e , και οι μονάδες είναι inch/inch ή mm/mm. Συχνά ,ωστόσο , δεν εμφανίζονται μονάδες επειδή η παραμόρφωση είναι η αναλογία του μήκους σε ένα δεδομένο σύστημα μέτρησης. [33]

Μαζί με τις προηγούμενες περιγραφές της μηχανικής παραμόρφωσης και της πραγματικής παραμόρφωσης , είναι επίσης δυνατό να αποδοθεί η έννοια της τάσης με 2 διαφορετικούς τρόπους , όπως η μηχανική τάση(engineering stress) και η πραγματική τάση(true stress). Όταν μια εφελκυστική δύναμη , εφελκύει ένα δοκίμιο , η περιοχή της εγκάρσιας τομής(cross sectional area) του δοκιμίου μειώνεται(επειδή ο συνολικός όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός). Ως εκ τούτου , επειδή η διατομή του δοκιμίου γίνεται μικρότερη κατά την διάρκεια της δοκιμής , η τιμή της τάσης εξαρτάται από το αν υπολογίζεται με βάση την αρχική διατομή του δοκιμίου ή με βάση την μειωμένη διατομή λόγω της ασκούμενης τάσης εκείνη την στιγμή. Έτσι στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν 2 τρόποι για να καθοριστεί η τάση: [33]

1. Μηχανική τάση: Η δύναμη σε οποιαδήποτε στιγμή κατά την διάρκεια της δοκιμής διαιρούμενη με την αρχική διατομή του δοκιμίου $s = F / A_0$ όπου F είναι η ασκούμενη δύναμη εφελκυστική πάνω στο δοκίμιο και A_0 η αρχική διατομή του δοκιμίου όπως προαναφέρθηκε. [33]
2. Πραγματική τάση: Η δύναμη ανά πάσα στιγμή διαιρούμενη με την στιγμιαία διατομή του δοκιμίου $\sigma = F / A_i$ όπου F η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο και A_i η στιγμιαία διατομή του δοκιμίου. Επειδή ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός $V = A_0 * L_0$ τότε και $V = A_i * L_i$ όπου L_i είναι η στιγμιαία παραμόρφωση. Άρα $V = A_0 * L_0 = A_i * L_i = A_i * (L_0 + \Delta L)$. Οπότε $A_i = A_0 * L_0 / (L_0 + \Delta L) = A_0 / (1 + \Delta L / L_0) = A_0 / (1 + e)$. Άρα $\sigma = F / (A_0 / (1 + e)) = s * (1 + e)$ (Ισχύει μόνο μέχρι την έναρξη σχηματισμού λαιμού) [33]

Συνήθως η μηχανική τάση λαμβάνεται υπόψη πιο συχνά κατά της δοκιμές εφελκυσμού. [33]

Ουσιαστικά οι καμπύλες μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης δεν δίνουν μια πραγματική ένδειξη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης ενός μετάλλου , επειδή βασίζονται εξ'ολοκλήρου στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου και οι διαστάσεις αυτές κανονικά αλλάζουν συνεχώς κατά την διάρκεια της δοκιμής. Ένα όγκιμο μέταλλο στο οποίο ασκείτε εφελκυστική ταση γίνεται ασταθές και δημιουργείται λαιμός κατά την διάρκεια της δοκιμής. Επειδή η περιοχή διατομής του δοκιμίου μειώνεται δραστικά στο στάδιο του λαιμού , το φορτίο που απαιτείται για να συνεχιστεί η παραμόρφωση πέφτει. Η μέση τάση βασισμένη στην αρχική διατομή μειώνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια πτώση στην καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης μετά το σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη εφελκυστική τάση. Ενώ στην περίπτωση της καμπύλης πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης που βασίζεται στις πραγματικές διαστάσεις της περιοχής εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου , η καμπύλη αυξάνει συνεχώς μέχρι την θραύση. Η καμπύλη πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης είναι επίσης γνωστή ως καμπύλη ροής διότι αντιπροσωπεύει τα βασικά χαρακτηριστικά πλαστικής ροής του υλικού (Εικόνα 26). [33]



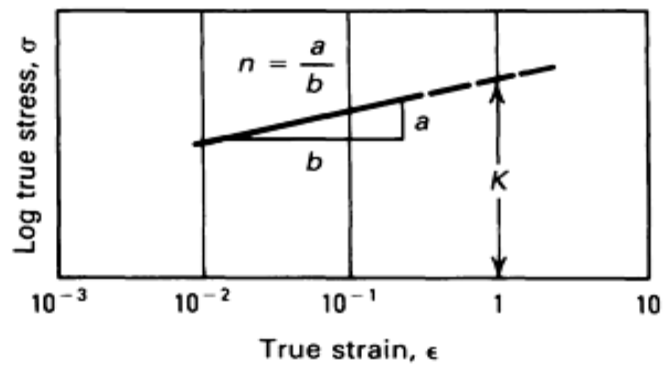
Εικόνα 26. Σύγκριση των καμπύλων πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης και μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης. Η ελαστική περιοχή έχει συμπιεστεί στον άξονα τον y λόγω των σχετικά μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων. [33]

3.3 Μαθηματικές σχέσεις της καμπύλης ροής(flow curve)

Η καμπύλη ροής των περισσότερων μεταλλικών υλικών στην περιοχή της ομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να εκφραστεί από την απλή μαθηματική σχέση: [33]

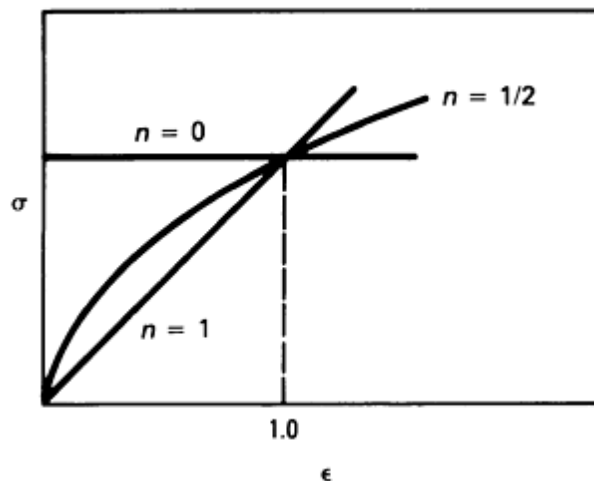
$$\sigma = K * \epsilon^n$$

όπου το n είναι ο συντελεστής ενδοτράχυνσης και K είναι ο συντελεστής αντοχής. Μια λογαριθμική σχέση μεταξύ της πραγματικής τάσης και πραγματικής παραμόρφωσης μέχρι το μέγιστο φορτίο θα οδηγήσει σε μια ευθεία γραμμή εάν η παραπάνω εξίσωση ικανοποιηθεί από τα δεδομένα(εικόνα 27). [33]



Εικόνα 27. Λογαριθμική αναπαράσταση της καμπύλης πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης, με n συντελεστή ενδοτράχυνσης και K συντελεστή αντοχής. [33]

Η κλίση της ευθείας (Εικόνα 27) είναι ο συντελεστής ενδοτράχυνσης n και ο K είναι η πραγματική τάση όταν η παραμόρφωση είναι 1($\epsilon=1$). Ο συντελεστής ενδοτράχυνσης n μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1. Για τα περισσότερα μεταλλικά υλικά το n παίρνει τιμές μεταξύ 0,1 και 0,5. [33]



Εικόνα 28. Διάφορες μορφές της καμπύλης ροής $\sigma = K * \epsilon^n$, ανάλογα με τις τιμές που παίρνει ο συντελεστής ενδοτράχυνσης n [33]

Ο ρυθμός ενδοτράχυνσης $d\sigma/d\varepsilon$ δεν είναι ίδιος με τον συντελεστή ενδοτράχυνσης .
Από τον ορισμό του n : [33]

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Ή

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Οι αποκλίσεις από την εξίσωση $\sigma=K*\varepsilon^n$ συχνά παρατηρούνται σε χαμηλές παραμορφώσεις ($\varepsilon=10^{-3}$) ή σε υψηλές ($\varepsilon \approx 1$). Ένας συνήθης τύπος απόκλισης είναι για την λογαριθμική σχέση της εξίσωσης $\sigma=K*\varepsilon^n$ για να προκύψουν 2 ευθείες γραμμές με διαφορετικές κλίσεις . Μερικές φορές τα δεδομένα που δεν σχετίζονται σύμφωνα με την εξίσωση $\sigma=K*\varepsilon^n$ θα δώσουν μια ευθεία σύμφωνα με την σχέση: [33]

$$\sigma = K*(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$$

όπου ε_0 είναι η τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης που έχει το υλικό πριν υποβληθεί στην δοκιμή εφελκυσμού. [33]

Μια άλλη συνήθης παραλλαγή της $\sigma=K*\varepsilon^n$ είναι αυτή της εξίσωσης του Ludwik: [33]

$$\sigma = \sigma_0 + K*\varepsilon^n$$

όπου σ_0 είναι το όριο διαρροής . Αυτή η εξίσωση μπορεί να είναι πιο ικανοποιητική από την αρχική εξίσωση $\sigma=K*\varepsilon^n$, αφού για τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης ίση με το 0 , η τιμή της πραγματικής τάσης είναι ίση με το όριο διαρροής σ_0 . Έχει αποδειχθεί ότι το σ_0 μπορεί να ληφθεί από την τομή του τμήματος ενδοτράχυνσης της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης και της γραμμής μέτρου ελαστικότητας: [33]

$$\sigma_0 = \left(\frac{K}{E^n}\right)^{\frac{1}{1-n}}$$

Η καμπύλη πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης των μετάλλων , όπως οι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες , αποκλίνει σημαντικά από την εξίσωση ροής $\sigma=K*\varepsilon^n$, σε χαμηλές παραμορφώσεις και μπορεί να εκφραστεί : [33]

$$\sigma = K*\varepsilon^n + e^{K1} + e^{K1} * e^{n1*\varepsilon}$$

όπου e^{K1} είναι κατά προσέγγιση ίσο με το όριο αναλογίας (proportional limit) και $n1$ είναι η κλίση της απόκλισης της τάσης από την εξίσωση $\sigma=K*\varepsilon^n$ σχεδιασμένη κατά ε. [33]

3.4 Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης(strain rate) και της θερμοκρασίας(temperature)

Ο ρυθμός με τον οποίο η παραμόρφωση εφαρμόζεται στο δοκίμιο εφελκυσμού έχει μια σημαντική επίδραση στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης . Ο ρυθμός παραμόρφωσης ορίζεται ως $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ ή $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$. Εκφράζεται σε μονάδες s^{-1} . Το εύρος των ρυθμών παραμόρφωσης συμπεριλαμβάνεται σε διάφορες δοκιμές , οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω. [33]

Range of strain rate	Type of test
10^{-8} to $10^{-5} s^{-1}$	Creep test at constant load or stress
10^{-5} to $10^{-1} s^{-1}$	Tension test with hydraulic or screw driven machines
10^{-1} to $10^2 s^{-1}$	Dynamic tension or compression tests
10^2 to $10^4 s^{-1}$	High-speed testing using impact bars
10^4 to $10^8 s^{-1}$	Hypervelocity impact using gas guns or explosively driven projectiles

Εικόνα 29 . Εύροι ρυθμών παραμόρφωσης σε κοινές δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων [33]

Με την αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης, αυξάνεται και η τάση ροής(flow stress). Επιπλέον , η εξάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης από την αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τάση διαρροής(όριο διαρροής) και η τάση ροής σε χαμηλότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης επηρεάζονται περισσότερο από τον ρυθμό παραμόρφωσης σε σχέση με την μέγιστη εφελκυστική αντοχή. [33]

Αν η ταχύτητα του εφελκυστήρα(crosshead velocity) είναι $v=dL/dt$, τότε ο ρυθμός παραμόρφωσης εκφρασμένος σε όρους συμβατικής μηχανικής παραμόρφωσης είναι : [33]

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d((L - L_0)/L_0)}{dt} = \frac{1}{L_0} * \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0}$$

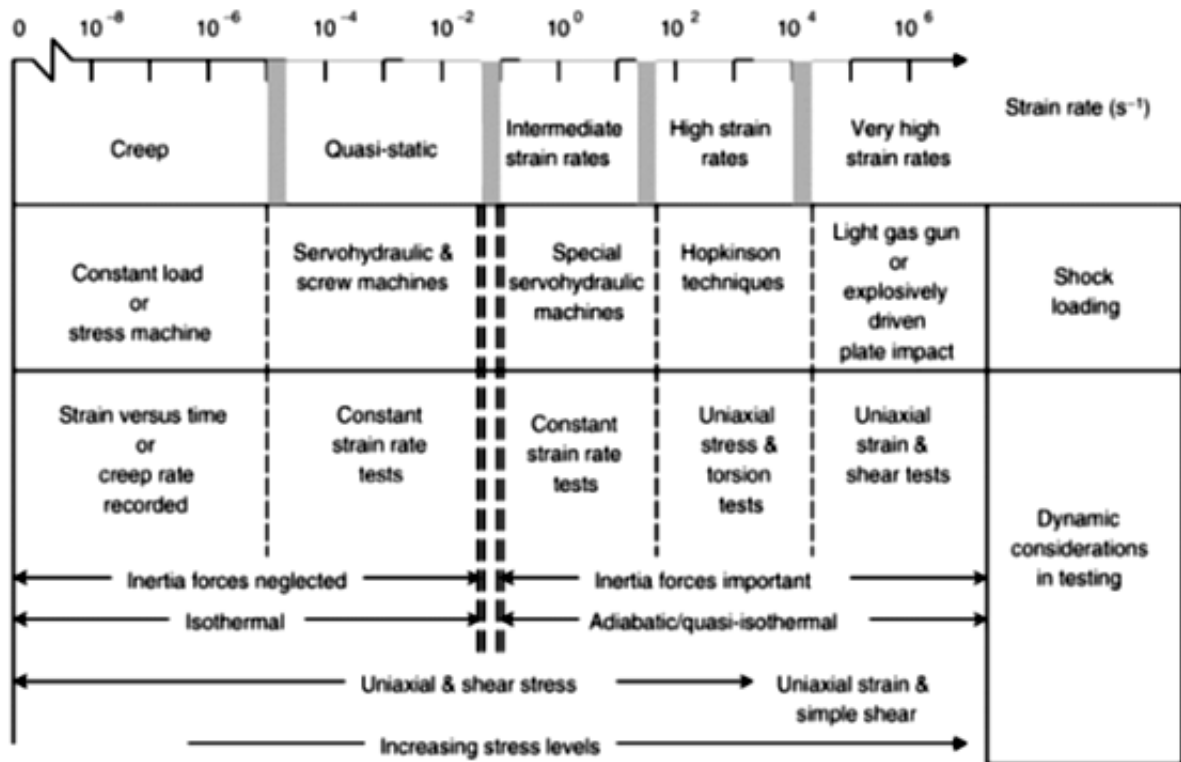
Ο ρυθμός μηχανικής παραμόρφωσης(engineering strain rate) είναι ανάλογος της ταχύτητας του εφελκυστήρα (ταχύτητα που εφαρμόζεται στην μηχανή εφελκυσμού και μετριέται σε mm/min). Σε μια μοντέρνα μηχανή εφελκυσμού , στην οποία η ταχύτητα εφελκυσμού μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια και να ελεγχθεί , είναι απλό να διεξάγονται δοκιμές εφελκυσμού σε ένα σταθερό ρυθμό μηχανικής παραμόρφωσης. [33]

Ο ρυθμός πραγματικής παραμόρφωσης(true strain rate) δίνεται από τον τύπο: [33]

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d(\ln(L/L_0))}{dt} = \frac{1}{L} * \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L}$$

Ο ρυθμός πραγματικής παραμόρφωσης σε σχέση με τον ρυθμό μηχανικής παραμόρφωσης δίνεται από τον τύπο : [33]

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{de}{1+e}$$



Εικόνα 30. Ρυθμοί παραμόρφωσης και συναφή όργανα και πειραματικές συνθήκες [33]

Πολλά από τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα δομικά μέταλλα έχουν πλέγματα bcc (π.χ. χάλυβες, πυρίμαχα μέταλλα) ή fcc (π.χ. αλουμίνιο, χαλκός). Η αντοχή των μετάλλων fcc είναι σχετικά μη ευαίσθητη στη θερμοκρασία δοκιμής. Ωστόσο, οι ιδιότητες των μετάλλων bcc τυπικά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες δοκιμής (π.χ. θερμοκρασία). [33]

Αυτή η ανόμοια συμπεριφορά σχετίζεται με την φύση της κίνησης των διαταραχών με τα μεμονωμένα κρυσταλλικά πλέγματα. Τα εδροκεντρωμένα μέταλλα FCC είναι περισσότερο 'closely packed' (δηλαδή υπάρχει μικρότερη απόσταση μεταξύ των ατόμων σε μια μοναδιαία κυψελίδα) από τα χωροκεντρωμένα μέταλλα BCC. Ένα κοινό σύστημα ολίσθησης διαταραχών (δηλαδή {111}, <110>) επικρατεί σε όλες τις τιμές θερμοκρασίας για τα εδροκεντρωμένα μέταλλα. Ωστόσο οι διαταραχές στα χωροκεντρωμένα μέταλλα μετακινούνται σε διαφορετικά συστήματα ολίσθησης (δηλαδή {110} <111>, {112} <111> ή {123} <111> για α-σίδηρο), και εξαρτώνται από την θερμοκρασία. [33]

Στα χωροκεντρωμένα μέταλλα μια ουσιώδης αύξηση στην τάση ροής (flow stress) (ή στην αντοχή) μπορεί να παρατηρηθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες από το 1/5 της θερμοκρασίας τήξης τους. Υπό αυτές τις συνθήκες, η εσωτερική αντίσταση στην κίνηση διαταραχών μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Εάν τα εμπόδια στην κίνηση διαταραχών θεωρηθούν περαιτέρω, αυτά μπορούν να διαχωριστούν σε αθερμικά (δηλ. Μη επηρεασμένα από θερμοκρασία) και θερμικά (δηλ. Εξαρτώμενα από θερμοκρασία) συστατικά. Αθερμικά εμπόδια όπως η μεγάλου εύρους αλληλεπίδραση διαταραχών, είναι υπερβολικά μεγάλα για να ξεπεραστούν με ολίσθηση διαταραχών που χρησιμοποιούν μόνο θερμικές διακυμάνσεις και η εφαρμοζόμενη τάση για να μετακινηθούν από μία θέση σε μια άλλη. Σε αντίθεση με τα θερμικά εμπόδια όπως διαλυμένα άτομα και κατακρημνίσματα, τα οποία είναι προσπελάσιμα από τις διαταραχές με την βοήθεια αυτής της θερμικής ενέργειας και της εφαρμοζόμενης τάσης. [33]

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η θερμική ενεργοποίηση των διαταραχών είναι ελάχιστη. Ως εκ τούτου μια μεγάλη εφαρμοζόμενη τάση απαιτείται για παραμόρφωση. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η θερμική ενεργοποίηση θα βοηθήσει στην κίνηση των διαταραχών γύρω από τα θερμικά εμπόδια. Η εφαρμοζόμενη τάση που απαιτείται σε αυτήν την περίπτωση για πλαστική παραμόρφωση είναι μικρότερη, γεγονός που μειώνει την μετρήσιμη αντοχή. Πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, η θερμική ενεργοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της κινητήριας δύναμης για την κίνηση των διαταραχών, έτσι ώστε η αντοχή του υλικού θα καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τα αθερμικά εμπόδια. [33]

Η προηγούμενη συζήτηση υποθέτει ότι η πλαστική ροή θα λάβει χώρα και ότι υπάρχει μια σταθερότητα στον μηχανισμό της θραύσης. Μια τέτοια υπόθεση δεν ισχύει απαραίτητα για τα μέταλλα BCC. Αυτά τα μέταλλα δείχνουν μια μετάβαση στο είδος της θραύσης από την όλκιμη στην ψαθυρή με την μείωση της θερμοκρασίας. Ωστόσο το όριο διαρροής θα αυξηθεί με την μείωση της θερμοκρασίας όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. [33]

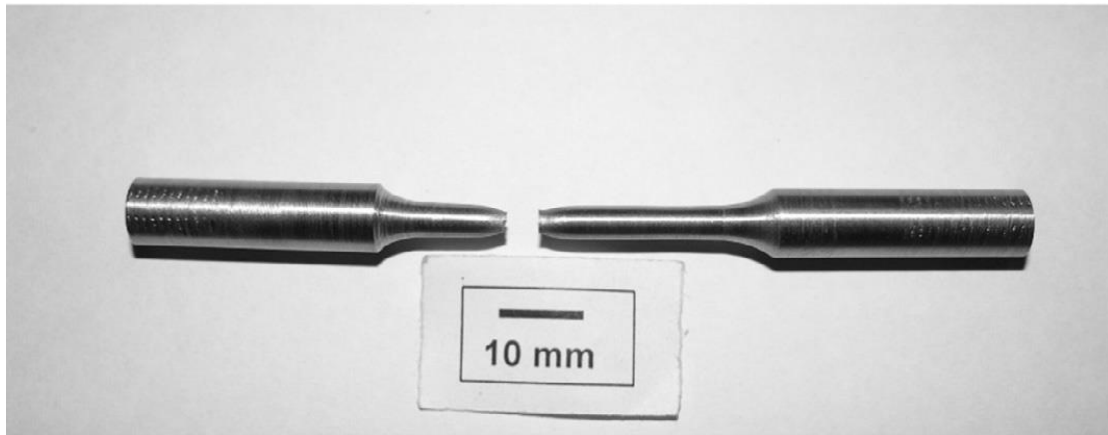
4. ΘΡΑΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Όταν ένα μεταλλικό σώμα υποβάλλεται σε μια τάση , αυτό αντέχει την εφαρμοζόμενη τάση , το οποίο μπορεί να γίνει κατανοητό από ένα τυπικό ‘τεστ’ εφελκυσμού. Όταν το σώμα δεν είναι πλέον σε θέση να αντέξει αυτήν την τάση , αρχίζει να ραγίζει(cracking) , αρχίζουν να δημιουργούνται ρωγμές. Η ρωγμή περνάει μέσα από 2 στάδια: Έναρξη της ρωγμής(Crack Initiation) και Διάδοση της ρωγμής(Crack Propagation). Ο σχηματισμός της ρωγμής , εξαιτίας της απελευθέρωσης τάσεων μέσα σε ένα μεταλλικό σώμα , που τελικά οδηγεί σε διαχωρισμό του σώματος σε 2 ή περισσότερα μέρη, είναι γνωστό ως θραύση. Η πλειονότητα των αστοχιών των εξαρτημάτων είναι λόγω της θραύσης και επομένως η κατανόηση αυτού του φαινομένου αποτελεί σημαντική πτυχή της ανάλυσης αστοχιών. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

Ο τύπος θραύσης ενός μεταλλικού υλικού είναι αποτέλεσμα δύο παραγόντων: της κατάστασης του υλικού και των συνθηκών φόρτισής του. Και οι δύο προσδιορίζουν τον λειτουργικό μηχανισμό θραύσης και επομένως την μακροσκοπική εμφάνιση καθώς και την μικροσκοπική τοπογραφία. Η κατάσταση του υλικού καλύπτει μεταξύ άλλων , τον τύπο του πλέγματος , την μικροδομή(μέγεθος κόκκου και ποσότητας κόκκων, μέγεθος , σχήμα και κατανομή των κατακρημνήσεων) , την ψυχρή κατεργασία , την γήρανση , τα διαλυμένα αέρια , τις εναπομείναντες τάσεις και τον ιστό . Οι συνθήκες φόρτισης περιλαμβάνουν το είδος της τάσης (στατική , δυναμική , εφελκυστική , θλιπτική , διατμητική , στρεπτική , λυγισμός , μονοαξονική ή πολυαξονική) , τον ρυθμό φόρτισης , την θερμοκρασία του υλικού και το περιβάλλον(διαβρωτικό κλπ). Αλλάζοντας ένα από τα παραπάνω μπορεί να έχει συνεχή ή απότομη επίδραση στην τάση παραγωγής ενός συγκεκριμένου τύπου θραύσης. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι θραύσης όπως , ψαθυρή , όλκιμη, θραύση κόπωσης , κτλπ. Κάθε τύπος αφήνει ένα ορισμένο χαρακτηριστικό γνώρισμα θραύσης στην θραυσμένη επιφάνεια , το οποίο οδηγεί στον τρόπο της αστοχίας(mode of failure). Η γνώση του τρόπου της θραύσης βοηθά στην αναζήτηση των αιτιών της αστοχίας. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

4.1 Όλκιμες και ψαθυρές θραύσεις

Οι θραύσεις μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε όλκιμες και ψαθυρές. Μια όλκιμη θραύση συνδέεται με σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Μια αισθητή ποσότητα συνολικής πλαστικής παραμόρφωσης στην μορφή της διάστασης του υλικού (αυξημένο μήκος ή τοπική μείωση της διατομής) μετά από μια δοκιμή εφελκυσμού μπορεί στην πραγματικότητα να παρατηρηθεί στην περίπτωση μιας όλκιμης θραύσης. Μια τυπική θραύση κούπας και κώνου(cup and cone fracture) ενός όλκιμου μετάλλου όπως παρατηρήθηκε σε μια δοκιμή εφελκυσμού , είναι ένα παράδειγμα όλκιμης θραύσης(εικόνα 31). [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



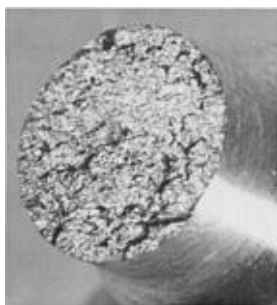
Εικόνα 31. Μια τυπική θραύση τύπου (cup and cone) ενός όλκιμου μετάλλου έπειτα από δοκιμή εφελκυσμού. [40]

Μια αισθητή ποσότητα χείλους διάτμησης (shear lip) όπως φαίνεται στην εικόνα 31 είναι μια ένδειξη ότι η θραύση του δοκιμίου είναι όλκιμη. Μια όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από μια ινώδη επιφάνεια θραύσης (fibrous zone) με ένα προεξέχον χείλος διάτμησης (εικόνα 32). Μια τυπική θραύση κούπας και κώνου ενός μέτρια όλκιμου μετάλλου, μια ρήξη έπειτα από κοίλανση ενός πολύ όλκιμου μετάλλου π.χ χρυσός ή να οδηγηθεί σε ένα σημείο και να διαχωριστεί απλά το μέταλλο με διάτμηση 45° , είναι παραδείγματα όλκιμης θραύσης. [37], [38], [39], [40], [41]



Εικόνα 32. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου εφελκυσμού χάλυβα 4340. Στο κέντρο της επιφάνειας θραύσης είναι η ινώδης επιφάνεια θραύσης (Fibrous zone) και περιμετρικά εκτείνεται το χείλος διάτμησης (Shear lip) [37]

Μια ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή πλαστική παραμόρφωση (micro-deformation) και αμελητέα συνολική παραμόρφωση. Σε μια ψαθυρή θραύση ο γρήγορος ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η ρωγμή οδηγεί σε ολικό κατακερματισμό. Μια τραχειά και κρυσταλλική επιφάνεια θραύσης είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα μιας ψαθυρής θραύσης (εικόνα 33). [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



Εικόνα 33. Ψαθυρή κρυσταλλική θραύση δοκιμίου εφελκυσμού χρυστοσιδήρου [37]

Επίσης ένα όλκιμο μέταλλο μπορεί να αστοχήσει με ψαθυρό τρόπο λόγω των 3 παραγόντων που αναφέρθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο.

- Τριαξονικές τάσεις
- Χαμηλή θερμοκρασία
- Υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης

Πέρα από τους 3 παράγοντες , υπάρχουν πολλοί μεταλλουργικοί παράγοντες και μερικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση. Η ψαθυροποίηση των μετάλλων οφείλεται κυρίως στην επίδραση της παραμόρφωσης , του χρόνου , της θερμοκρασίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι διάφοροι τύποι ψαθυροποίησης των μετάλλων είναι η ψαθυροποίηση απο την επαναφορά (temper embrittlement) , η ψαθυροποίηση απο την επαναφορά μαρτενσίτη (tempered martensite embrittlement) , η ψαθυροποίηση λόγω του υδρογόνου (hydrogen embrittlement) κ.α [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

5. ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Θραυστογραφία(Fractography) είναι η διερεύνηση των επιφανειών θραύσης με οπτικά μέσα και με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης με σκοπό τον προσδιορισμό του τύπου της θραύσης , του σημείου από όπου προήλθε η θραύση , της κατεύθυνσης της διάδοσης της ρωγμής, του μηχανισμού αστοχίας, της ύπαρξης ελαττωμάτων στο υλικό, της περιβαλλοντικής αλληλεπίδρασης και της φύσης των τάσεων. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

5.1 Μακροσκοπικά και μικροσκοπικά γνωρίσματα της θραύσης

Ο κάθε τύπος θραύσης χαρακτηρίζεται από ολοκληρή σειρά χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Ιδιαίτερα ενημερωτικά είναι :

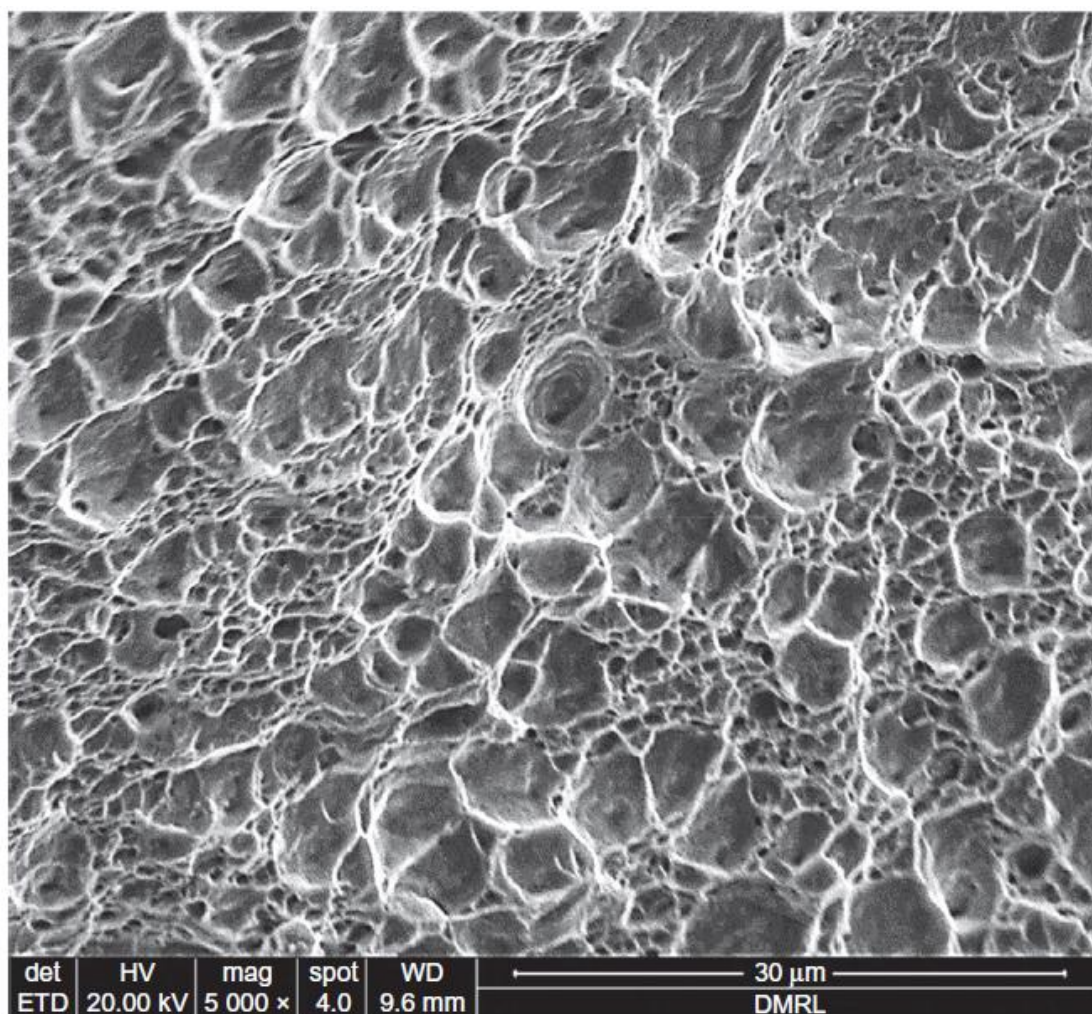
- Το μονοπάτι που ακολουθεί η ρωγμή μέσα στο υλικό(σημείο έναρξης , προσανατολισμός της ρωγμής ή των ρωγμών που αποτελούν την επιφάνεια θραύσης στην επιφάνεια και στον άξονα του υλικού κ.α)
- Ο βαθμός της μακροσκοπικής παραμόρφωσης του υλικού
- Η δομή και η εμφάνιση της επιφάνειας θραύσης μακροσκοπικά(λεία ή τραχειά , αστραφτερή ή ‘ματ’ , μαυρισμένη ή ξεθωριασμένη, γραμμές , σκαλοπάτια(steps), επικαλύψεις(coatings) ομοιόμορφες ή διαφορετικές από περιοχή σε περιοχή) και μικροσκοπικά(κοιλώματα(dimples) , σχισμοί(cleavage), ραβδώσεις κόπωσης(fatigue striations) , εκτεθειμένα όρια κόκκων , κ.α)

Η μικροσκοπική τοπογραφία αναγνωρίζεται συνήθως με την χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Scanning Electron Microscopy) σε μεγεθύνσεις από τα 500 στα 5000x. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

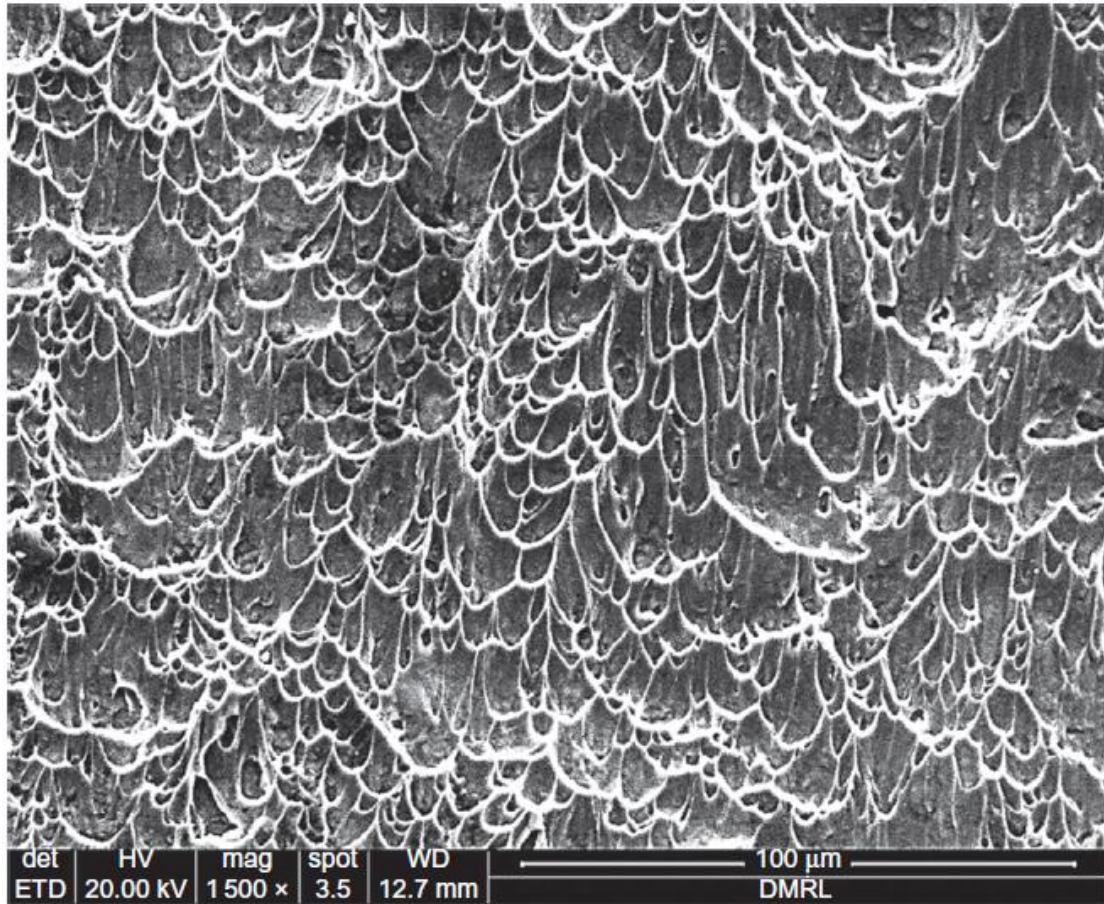
5.2 Θραυστογραφία ψαθυρών και όλκιμων θραύσεων

Η επιφάνεια θραύσης μιας όλκιμης θραύσης δείχνει θαμπή και ινώδη όταν εξετάζεται οπτικά ή στο στερεοσκόπιο. Η επιφάνεια θραύσης μιας όλκιμης θραύσης όταν εξετάζεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρουσιάζεται ως μια επιφάνεια με κοιλώματα ή ‘λακκούβες’(dimples). Τα κοιλώματα φαίνονται σαν ένα σύνολο από φωλιές φιλιπίνων(πτηνά) όταν κανείς τις παρατηρεί κάθετα σε σχέση με τη φωλιά. Η απομακρυσμένη περιοχή δείχνει πάντα τα αδιάλυτα ή τα κατακρημνισμένα σωματίδια από όπου προέρχονται τα κενά. Τα κοιλώματα σχηματίζονται από την έναρξη και την συνένωση των μικρο-κενών(coalescence of microvoids) γύρω από τα σωματίδια. Με συνεχή παραμόρφωση τα κενά αυξάνονται σε μέγεθος και τελικά οι διασυνδεδετικοί σύνδεσμοι του υλικού διαχωρίζονται με αποτέλεσμα να σχηματίζονται

κοιλώματα. Η πυκνότητα , το μέγεθος , το σχήμα και το βάθος των κοιλωμάτων που παρατηρούνται στην επιφάνεια θραύσης, αναλογούν στο μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που υπέστη το μέταλλο πριν από την θραύση. Τα πολύ όλκιμα μέταλλα παρουσιάζουν μικρό αριθμό από μεγάλα σε μέγεθος και βαθιά κοιλώματα. Υλικά με σχετικά μικρότερη ολκιμότητα παρουσιάζουν μεγαλύτερο αριθμό από μικρότερα σε μέγεθος και ρηχότερα κοιλώματα. Τα εν λόγω στοιχεία δείχνουν ότι η ποσότητα πλαστικής παραμόρφωσης που απαιτείται για την διαδικασία του διαχωρισμού είναι σχετικά μικρότερη. Στις επίπεδες περιοχές της όλκιμης θραύσης παρατηρούνται σχεδόν ισομετρικά κοιλώματα (equiaxed dimples) (Εικόνα 34), ενώ στα χείλη διάτμησης , στις υψηλά παραμορφωμένες ζώνες, στον λυγισμό και στις θραύσεις διάτμησης παρατηρούνται επιμηκυμένα κοιλώματα (elongated dimples) (Εικόνα 35). [37] , [38] , [39] , [40] , [41]

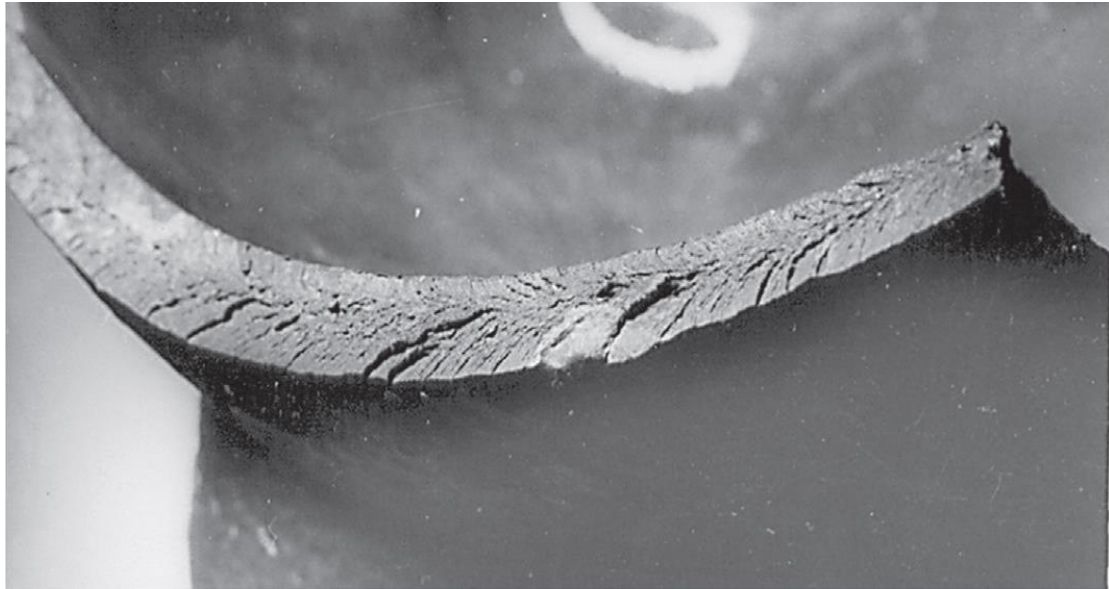


Εικόνα 34. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει τα σχεδόν ισομετρικά κοιλώματα(equiaxed dimples) μιας όλκιμης θραύσης [40]



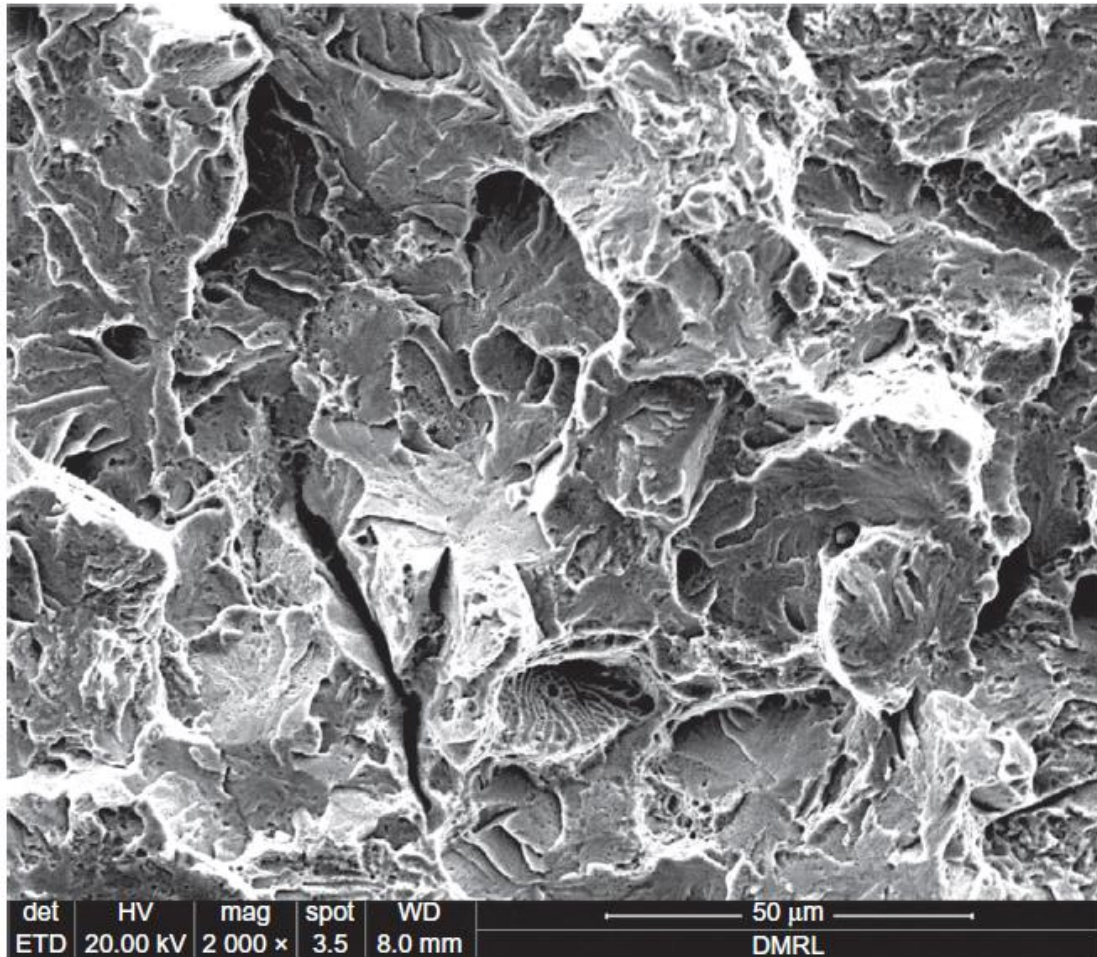
Εικόνα 35. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει τα επιμηκωμένα κοιλώματα(elongated dimples) μιας όλκιμης θραύσης [40]

Οι ψαθυρές θραύσεις έχουν μια κρυσταλλική και έντονη εμφάνιση όταν παρατηρούνται οπτικά ή στο στερεοσκόπιο. Η επιφάνεια θραύσης δείχνει σταθερά ποια είναι τα ‘chevron marks’ που δείχνουν προς την προέλευση της θραύσης. Τα ‘chevron marks’ αποκαλούνται επίσης και ως ‘Herringbone Pattern’(εικόνα 36). [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



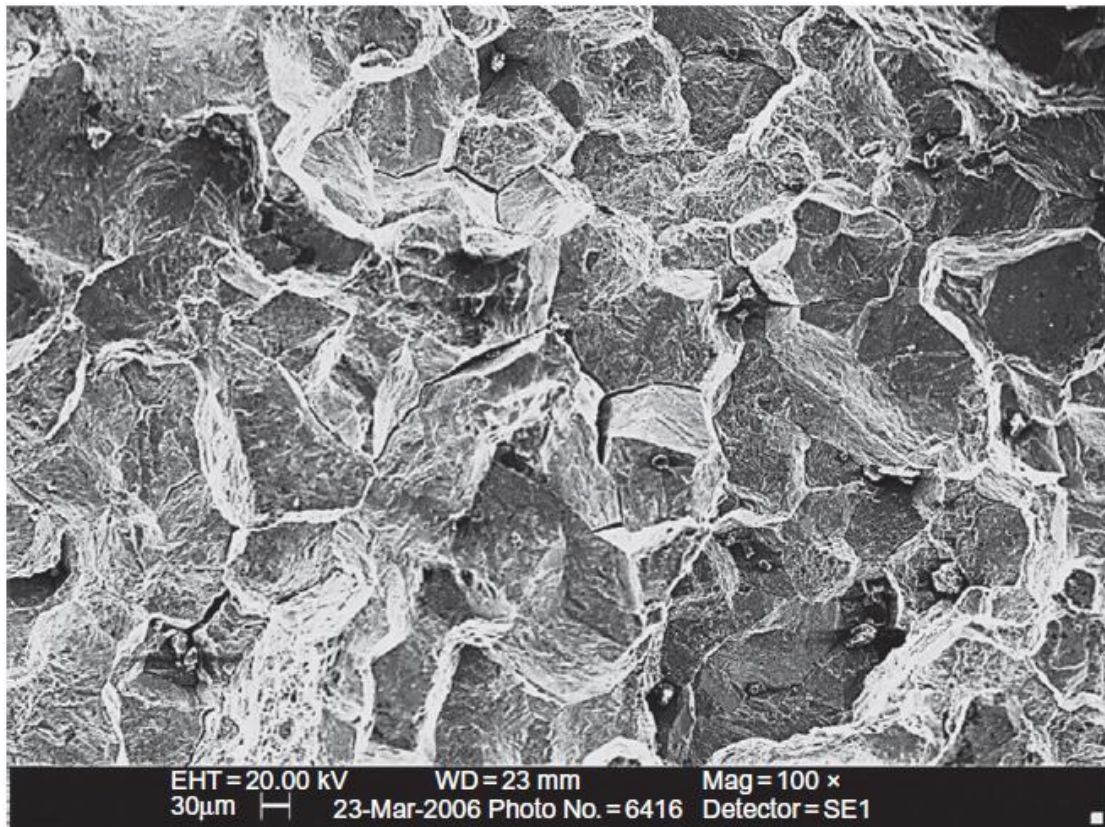
**Εικόνα 36. Chevron marks ή Herringbone pattern σε μια επιφάνεια θραύσης.
[40]**

Η επιφάνεια θραύσης μιας ψαθυρής θραύσης όταν αυτή εξετάζεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρουσιάζει έναν διακρυσταλλικό σχισμό(transgranular cleavage) ή έναν περικρυσταλλικό σχισμό(intergranular cleavage). Ένας διακρυσταλλικός σχισμός σχηματίζεται από την διάδοση των ρωγμών κατά μήκος πολύ καλά καθορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Πολλά τμήματα ρωγμών τύπου σχισμού μοιάζουν με παραποτάμους , που τελικά ενώνονται με τον κύριο ποταμό (κύρια ρωγμή) και σχηματίζουν αυτό που αποκαλείται ‘river pattern’. Μια τυπική θραύση διακρυσταλλικού σχισμού , η οποία δείχνει την κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής , παρουσιάζεται στην εικόνα 37. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



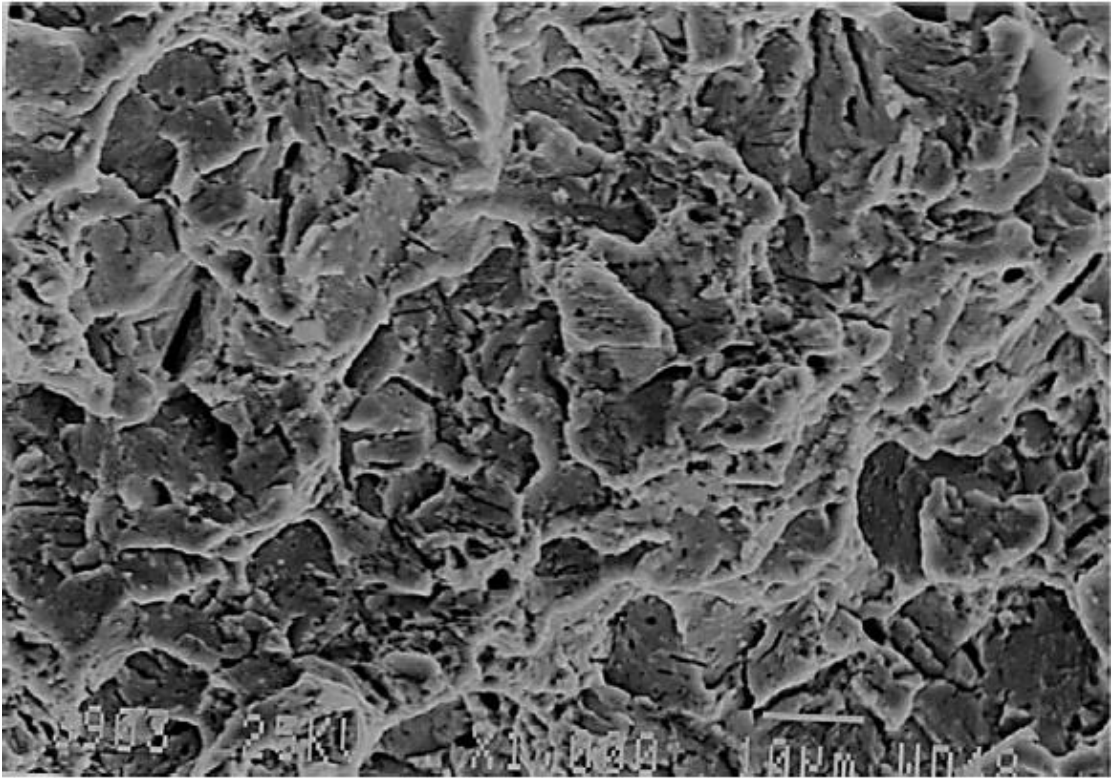
Εικόνα 37. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια θραύση διακρυσταλλικού σχισμού(transgranular cleavage fracture) [40]

Λόγω μεταλλουργικών ή περιβαλλοντικών παραγόντων , όταν τα όρια κόκκων γίνονται ένα αδύναμο μονοπάτι για την διάδοση ρωγμών , προκύπτει μια περικρυσταλλική θραύση(intergranular fracture). Ο διαχωρισμός ακαθαρσιών και καρβονιτριδίων , ο σχηματισμός κοιλοτήτων και ρωγμών εξαιτίας της έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία και η διάβρωση των ορίων των κόκκων είναι όλοι λόγοι για ένα μέταλλο να χάνει την συνεκτική του αντοχή και να αστοχεί με έναν περικρυσταλλικό τρόπο (Εικόνα 38). [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



Εικόνα 38. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια περικρυσταλλική θραύση(intergranular fracture). [40]

Ορισμένα μέταλλα , τα οποία δεν δείχνουν διάδοση των ρωγμών κατά μήκος των πολύ καλά καθορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων , καταλήγουν σε αυτό που ονομάζεται θραύση ημι-σχισμού(quasi-cleavage fracture). Η επιφάνεια θραύσης θα παρουσιάσει κάποια ποσότητα όλκιμης θραύσης με χαρακτηριστικά κοιλώματα(dimples) μαζί με μια ποσότητα θραύσης σχισμού(cleavage fracture). Μια τυπική θραύση ημι-σχισμού παρουσιάζεται στην εικόνα 39. Σε περίπτωση μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση λόγω φυσικών παραγόντων, μια θραύση ημι-σχισμού θα παρουσιαστεί. [37] , [38] , [39] , [40] , [41]



Εικόνα 39. Μια τυπική θραυστογραφία SEM που δείχνει μια θραύση ημισχισμού(quasi-cleavage fracture). [40]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με σκοπό την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων του ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα 321 της σειράς AISI 300 σε κρυογενικές θερμοκρασίες, κόπηκαν δοκίμια εφελκυσμού μορφής ‘dog-bone’ από ελασμένη πλάκα(plate) πάχους 3mm σε ανοπτημένη κατάσταση(annealed condition). Οι διαστάσεις των δοκιμίων και η χημική σύσταση του υλικού παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 1. Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού μορφής ‘dog-bone’ του 321 με βάση το πρότυπο ASTM E 8M-04.

Ωφέλιμο Μήκος(Gauge Length)	75mm
Ωφέλιμο πλάτος(Width of reduced parallel section or gauge length)	12,5mm
Πάχος(thickness)	3mm
Πλάτος τμήματος , το οποίο πιάνουν οι δαγκάνες(width of grip section)	35mm
Μήκος τμήματος , το οποίο πιάνουν οι δαγκάνες(length of grip section)	40mm

Πίνακας 2. Η μέση χημική σύσταση του υλικού 321(AISI TYPE 321 STAINLESS STEEL) .

AISI 300 type:	Χημική Σύσταση (weight%)						
	C	Cr	N	Mn	Ni	Ti	Fe
321	0,06	18	0,06	1,5	10	0,6	Balanced

2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν σε εφελκυστήρα της INSTRON με ταχύτητα του εφελκυστήρα(crosshead velocity) $v=dL/dt=100\text{mm}/\text{min}$. Ταχύτητα εφελκυστήρα $v=100\text{mm}/\text{min}$ σημαίνει ρυθμός παραμόρφωσης(strain rate) του δοκιμίου $de/dt=v/L_0=2*10^{-2} \text{ s}^{-1}=0,02 \text{ s}^{-1}$

Όπου L_0 =ωφέλιμο μήκος=75mm

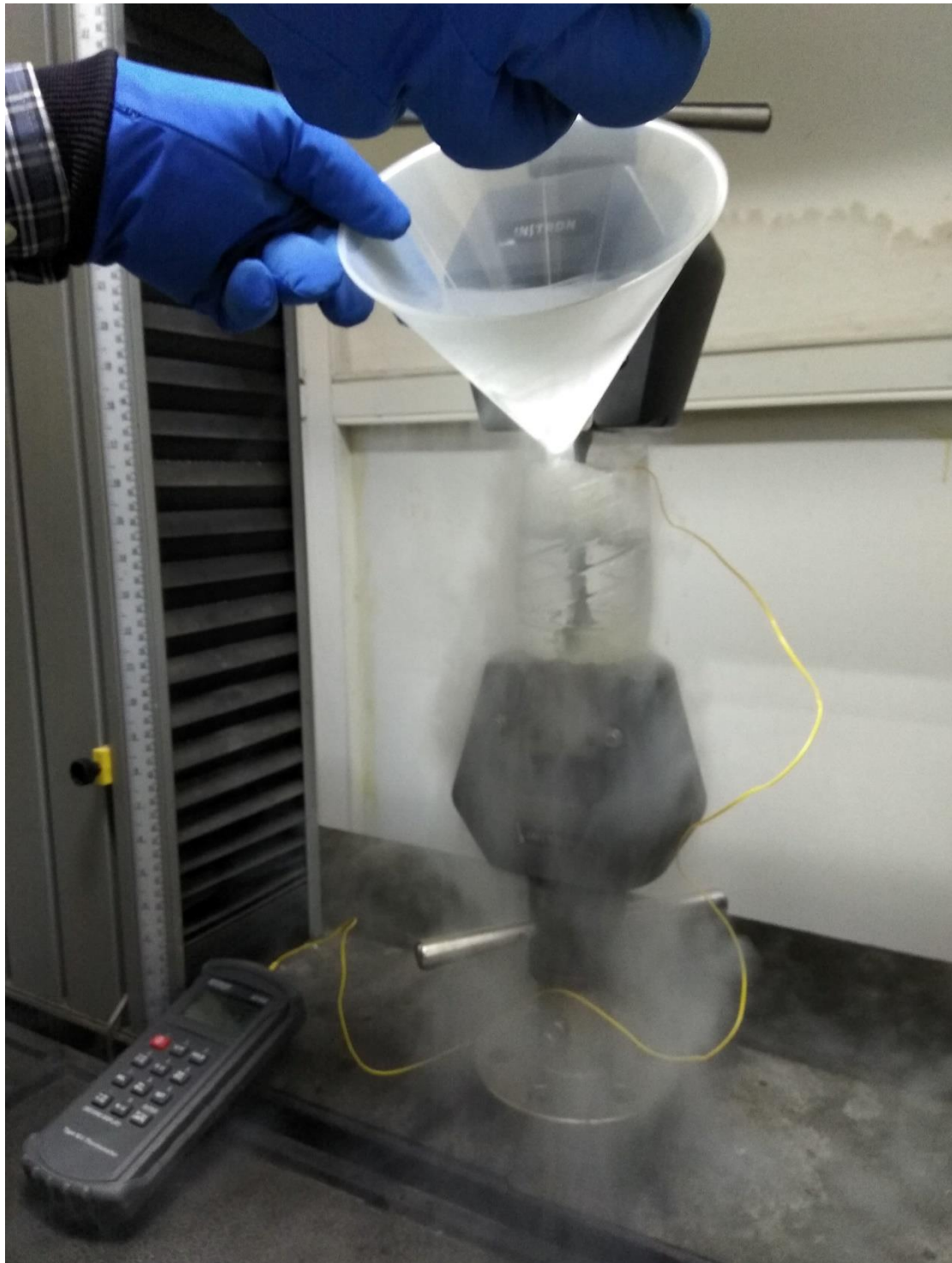
Η πρώτη δοκιμή έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος(25°C), ενώ οι υπόλοιπες δοκιμές έγιναν στις θερμοκρασίες των -50°C και -190°C. Σε κάθε θερμοκρασία δοκιμής έγιναν 3 επαναλήψεις. Στην δοκιμή που έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το δοκίμιο τοποθετήθηκε στις δαγκάνες του εφελκυστήρα και εφελκυστήκε με 100mm/min έως την θραύση του.

Στις δοκιμές που έγιναν στις κρυογενικές θερμοκρασίες υπήρξε μια διαφορετική πειραματική διάταξη από αυτήν στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα δοκίμια εγκυβωτίστηκαν σε πλαστικά μπουκάλια(PET) και πιο συγκεκριμένα το ωφέλιμο μήκος των δοκιμίων. Ο σκοπός ήταν να υπάρχει ένα δοχείο γύρω από το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου, το οποίο θα γέμιζε με κάποιο κρυογενικό υγρό για να μπορέσει να χαμηλώσει την θερμοκρασία του δοκιμίου πριν την έναρξη του εφελκυσμού και να την διατηρήσει και κατά την διάρκεια του εφελκυσμού έως και την θραύση του. Τα 'grips' των δοκιμίων ήταν εκτός πλαστικού μπουκαλιού έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στις δαγκάνες του εφελκυστήρα. Το μπουκάλι κάλυπτε μόνο το ωφέλιμο μήκος και αυτό πραγματοποιήθηκε με εποξική κόλλα BISON, η οποία χρησιμοποιήθηκε για να κολληθεί το τέλος του ωφέλιμου μήκους με το κάτω μέρος του μπουκαλιού. Το πάνω μέρος του μπουκαλιού ήταν ανοιχτό με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να διοχετευτεί με χωνί το κρυογενικό υγρό. Για τους -50°C χρησιμοποιήθηκε ως κρυογενικό υγρό το μίγμα αιθανόλης και υγρού αζώτου, ενώ για τους -190°C χρησιμοποιήθηκε σκέτο υγρό άζωτο. Η ανάμιξη υγρού αζώτου και αιθανόλης έγινε σε διαφορετικό δοχείο και στην συνέχεια μεταφέρθηκε στο εγκυβωτισμένο δοκίμιο. Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με τη βοήθεια θερμομέτρου και θερμοστοιχείων τα οποία ήταν τοποθετημένα καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής μέσα στο εγκυβωτισμένο δοκίμιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε εικόνες το εγκυβωτισμένο δοκίμιο στη μηχανή του εφελκυσμού, τα θερμοστοιχεία και το θερμομέτρο, το δοχείο ανάμειξης αιθανόλης και υγρού αζώτου και το χωνί που χρησιμοποιήθηκε για να χυθεί το υγρό στο μπουκάλι (Εικόνες 40-42).



Εικόνα 40. Εγκυβωτισμένο δοκίμιο πάνω στη μηχανή εφελκυσμού. Ο πυθμένας του μπουκαλιού είναι κολλημένος στο τέλος του ωφέλιμου μήκους, κοντά στο καμπύλο τμήμα του δοκιμίου(radius). Τα grips του δοκιμίου βρίσκονται εκτός μπουκαλιού και είναι τοποθετημένα στις δαγκάνες της μηχανής.



Εικόνα 41. Το χωνί με το οποίο μεταφέραμε το μίγμα αιθανόλης και υγρού αζώτου ή σκέτου υγρού αζώτου. Το κίτρινο καλώδιο είναι το θερμοστοιχείο που ήταν βυθισμένο στο μπουκάλι με το δοκίμιο και συνδεδεμένο με θερμόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 42. Το δοχείο στο οποίο γινόταν η ανάμιξη αιθανόλης και υγρού αζώτου προτού μεταφερθεί στο μπουκάλι με το δοκίμιο.

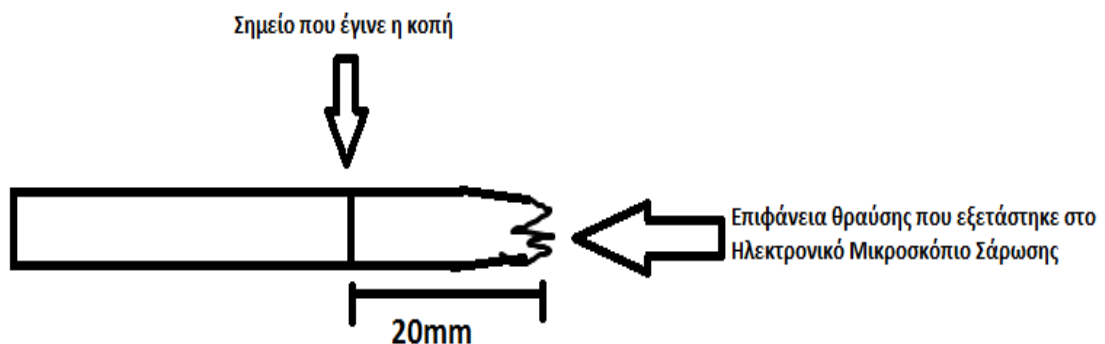
Στην περίπτωση της δοκιμής που έγινε στους -50°C το δοκίμιο αφέθηκε στο μίγμα αιθανόλης και υγρού αζώτου για 3 λεπτά προτού ξεκινήσει ο εφελκυσμός, ενώ στην δοκιμή που έγινε στους -190°C το δοκίμιο αφέθηκε στο υγρό άζωτο για 5 λεπτά προτού ξεκινήσει ο εφελκυσμός. Αυτοί ήταν οι χρόνοι που χρειάστηκε το δοκίμιο για να παγώσει στις αντίστοιχες θερμοκρασίες και υπολογίστηκαν με βάση την θεωρία σώματος αμελητέας αντίστασης αγωγής και συναγωγής με φυσική κυκλοφορία. Αφού τα δοκίμια αφέθηκαν σε αυτές τις θερμοκρασίες για τους αντίστοιχους χρόνους, εφελκύντηκαν με $100\text{mm}/\text{min}$ έως και την θραύση τους. Η θερμοκρασία από το ξεκίνημα έως και την θραύση παρέμενε σταθερή και δεν υπήρχαν απώλειες αφού ο ρυθμός παραμόρφωσης ήταν μεγάλος και ο εφελκυσμός διαρκούσε 30-40 δευτερόλεπτα.

3. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Κοπή

Μετά το τέλος των δοκιμών εφελκυσμού και την παραλαβή των αποτελεσμάτων, τα δοκίμια οδηγήθηκαν στην δισκοτόμο (Struers Discotom) με σκοπό να κοπούν κάποια δείγματα από το ωφέλιμο μήκος και να προετοιμαστούν μεταλλογραφικά για να παρατηρηθεί η μικροδομή τους και η επιφάνεια θραύσης τους στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η κοπή έγινε εγκάρσια (cross-section) στο ωφέλιμο μήκος και 20mm από την θραύση. Κατά τη διάρκεια της κοπής των δοκιμών στη δισκοτόμο γινόταν έκπλυση του κοπτικού άκρου με νερό, σαπούνι και λάδι, ώστε να μην υπερθερμαίνεται.

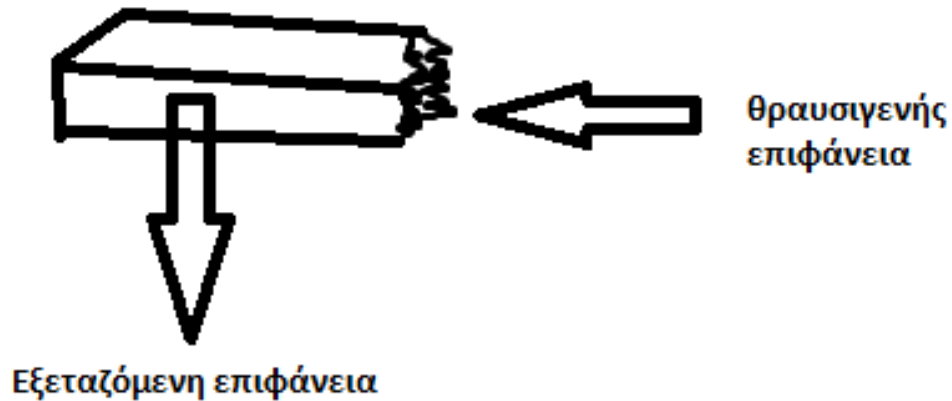
Μετά την κοπή τα δείγματα οδηγήθηκαν στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, ώστε να παρατηρηθεί η θραυσιγενής επιφάνεια και στην συνέχεια έγινε η μεταλλογραφική προετοιμασία ώστε να παρατηρηθεί η μικροδομή τους πάλι στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης. Για την εξέταση της θραυσιγενούς επιφάνειας δεν χρειάστηκε καμία προεργασία. Γενικότερα η θραυσιγενής επιφάνεια μετά την κοπή πρέπει να είναι απαλλαγμένη από σκόρες, υγρασία, χτυπήματα, πραιομορφώσεις, για αυτό και θα πρέπει να προφυλαχθεί και να οδηγηθεί άμεσα στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης, ώστε να παρατηρηθεί χωρίς περαιτέρω αλλαγές πέρα από την επίδραση του εφελκυσμού.



Εικόνα 43. Σχηματική αναπαράσταση κοπής, ωφέλιμου μήκους δοκιμίου και θραυσιγενούς επιφάνειας.

Εγκυβωτισμός

Αφού εξετάστηκε η θραυσιγενής επιφάνεια των δειγμάτων των δοκιμίων , τα δείγματα εγκυβωτίστηκαν με ρητίνη και σκληρυντή , για να μπορέσουν να λειανθούν και να στιλβωθούν στην συνέχεια εύκολα και χωρίς τον φόβο να δημιουργηθούν επίπεδα στην επιφάνεια που θα εξεταζόταν. Η μη εγκυβωτισμένη επιφάνεια ήταν η εξεταζόμενη επιφάνεια και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 44. Σχηματική αναπαράσταση δείγματος δοκιμίου στο οποίο παρουσιάζεται η θραυσιγενής επιφάνεια και η εξεταζόμενη επιφάνεια.

Λείανση

Αφού έγινε ο εγκυβωτισμός και στερεοποιήθηκε η ρητίνη , ξεκίνησε η διαδικασία της λείανσης της εξεταζόμενης επιφάνειας των δειγμάτων σε οριζόντιο υδρόψυκτο περιστρεφόμενο τροχό. Συγκεκριμένα η λείανση έγινε σε μηχανή STRUERS DP-U2 με δίσκο STRUERS DEPK.1. Τα χαρτιά λείανσης καρβιδίου του πυριτίου(SiC) ήταν 400 , 800 , 1200 , 2000 κόκκοι/in² και χρησιμοποιήθηκαν με την εξής σειρά:

1. Χαρτί λείανσης 400 , 250-300 στροφές/λεπτό
2. Χαρτί λείανσης 800 , 250-300 στροφές/λεπτό
3. Χαρτί λείανσης 1200, 250-300 στροφές/λεπτό
4. Χαρτί λειανσης 2000, 250-300 στροφές/λεπτό

Κατά την μετάβαση από το ένα χαρτί στο άλλο η επιφάνεια καθαριζόταν με βαμβάκι και νερό , ώστε να απομακρύνονται τα ρινίσματα του υλικού και τα καρβίδια του χαρτιού λείανσης που χρησιμοποιήθηκε , αιθανόλη για να απομακρύνεται το νερό και η υγρασία από την επιφάνεια και τέλος ξήρανση με ρεύμα θερμού αέρα για να εξατμιστεί η αιθανόλη. Τα δείγματα λειαινόνταν με περιστροφή 90° από την προηγούμενη λείανση , ώστε να επιτευχθεί απαλοιφή των γραμμών λείανσης της προηγούμενης κοκκομετρίας.

Στίλβωση

Μετά το πέρας της λείανσης πραγματοποιήθηκε στίλβωση της εξεταζόμενης επιφάνειας των δειγμάτων , ώστε να ελατωθεί το μέγεθος και ο αριθμός των γραμμών λείανσης και να δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη και στιλπνή επιφάνεια. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε οριζόντιος περιστρεφόμενος τροχός στίλβωσης με επιφάνεια από βελούδο και αδαμαντόπαστα Buehler 6 μm και στην συνέχεια οριζόντιος περιστρεφόμενος τροχός στίλβωσης με επιφάνεια από βελούδο και αδαμαντόπαστα 1 μm της ίδιας εταιρείας. Επίσης χρησιμοποιήθηκε υγρό στίλβωσης Lubricant Meta di fluid 40-6032 Buehler καθ' όλη την διάρκεια της στίλβωσης για να απλώνονται οι αδαμαντόπαστες σε όλη την επιφάνεια και να μειώνεται η τριβή. Κατά την αλλαγή από τον δισκο-πάστα 6μm στον δίσκο-πάστα 1μm η επιφάνεια των δειγμάτων πλενόταν και ξηραινόταν όπως και στην διαδικασία της λείανσης. Η στίλβωση ολοκληρώθηκε μετά από έλεγχο στο οπτικό μικροσκόπιο, ώστε να διαπιστωθεί η απαλοιφή των γραμμών λείανσης. Στην συνέχεια τα δείγματα εκπλύθηκαν με νερό και αιθανόλη και ξηράθηκαν με ρεύμα θερμού αέρα.

Ηλεκτροχημική Προσβολή

Μετά το πέρας και της στίλβωσης , η τελευταία διαδικασία πριν από την παρατήρηση των δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης , ήταν η ηλεκτροχημική προσβολή. Τα δείγματα απεγκυβωτίστηκαν από την ρητίνη και προσβλήθηκαν ηλεκτροχημικά σε διάλυμα οξαλικού οξέος 5% για 6-7 λεπτά και με τάση 1,5 V. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε ύστερα από έλεγχο στο οπτικό μικροσκόπιο , ώστε να διαπιστωθεί αν έχει εμφανιστεί μικροδομή χωρίς να υπάρχουν 'καμμένα' σημεία(pits) στους κόκκους του υλικού.

Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης(Scanning Electron Microscopy-SEM)

Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης όπως προαναφέραμε εξετάστηκαν τα δείγματα σχετικά με την θραυστιγενή τους επιφάνεια. Αφού προετοιμάστηκαν στην συνέχεια μεταλλογραφικά με τελευταίο στάδιο, αυτό της ηλεκτροχημικής προσβολής οδηγήθηκαν στο Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ξανά , ώστε να εξεταστεί και να παρατηρηθεί η μικροδομή τους , να δωθούν κάποιες στοιχειακές αναλύσεις και η γενικότερη σύσταση του δοσμένου υλικού.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) είναι μία από τις πιο χρήσιμες τεχνικές όσον αφορά την χρήση ηλεκτρονίων για την μελέτη δειγμάτων. Είναι μια μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλο βάθος πεδίου, υψηλή διακριτική ικανότητα και μεγεθύνσεις έως x300,000. Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης έχει μια στήλη υπό κενό, όπου στο πάνω μέρος της στήλης έχει βολφράμιο στο οποίο εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού και έτσι έχουμε το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Λόγω της μεγάλης θερμικής ενέργειας τα ηλεκτρόνια ιονίζονται και σχηματίζουν μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας 1 – 50 keV, η οποία, αφού περάσει από μία ακολουθία δύο ή τριών φακών εστίασης (συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα) καταλήγει να έχει μία διάμετρο 2-10nm. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται με την βοήθεια ενός πηνίου οδήγησης, έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο την υπό μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Η προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων. Εκπέμπονται επίσης ηλεκτρόνια που έχουν υποστεί

ελαστική σκέδαση ή χαμηλή απώλεια ενέργειας, καθώς και ακτίνες X αλλά προκαλείται και φωταύγεια. Όλα τα σήματα αλλά κυρίως των δευτερογενών και των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ενισχύονται και στην συνέχεια διαμορφώνουν την ένταση της δέσμης η οποία προσπίπτει στην φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια σάρωση η οποία οδηγεί την δέσμη του μικροσκοπίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εμφανίζεται μεγεθυμένη εικόνα στην φθορίζουσα οθόνη της επιφάνειας που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου. [51]-[53]

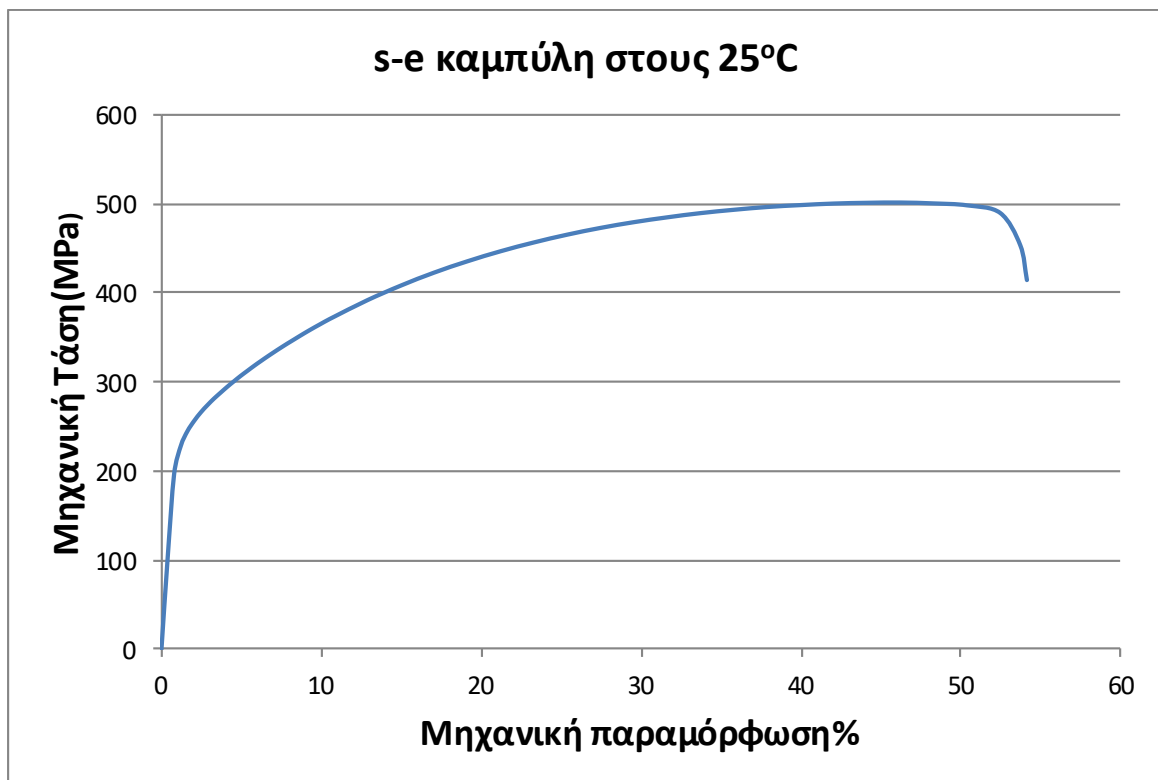
- Δευτερογενή ηλεκτρόνια (Secondary Electrons, SE): Προέρχονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων, σε βάθος 1-10 nm. Έχουν ενέργεια 50 eV και η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και τις ανωμαλίες της επιφάνειας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται αφορούν την τοπογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας του δοκιμίου. [51]-[53]

- Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (Backscattered Electrons, BE): Προέρχονται από τις ελαστικές συγκρούσεις μεταξύ των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων των επιφανειακών στρωμάτων, βάθους 0.1-1 μm . Η ενέργειά τους κυμαίνεται από 5 keV έως 50 keV και η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των στοιχείων της επιφάνειας και από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό. Οι πληροφορίες που συλλέγονται μέσω των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων αφορούν τη χημική σύσταση, τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και την τοπογραφία της αναλυόμενης επιφάνειας. [51]-[53]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Δοκιμή στους 25°C και με ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹

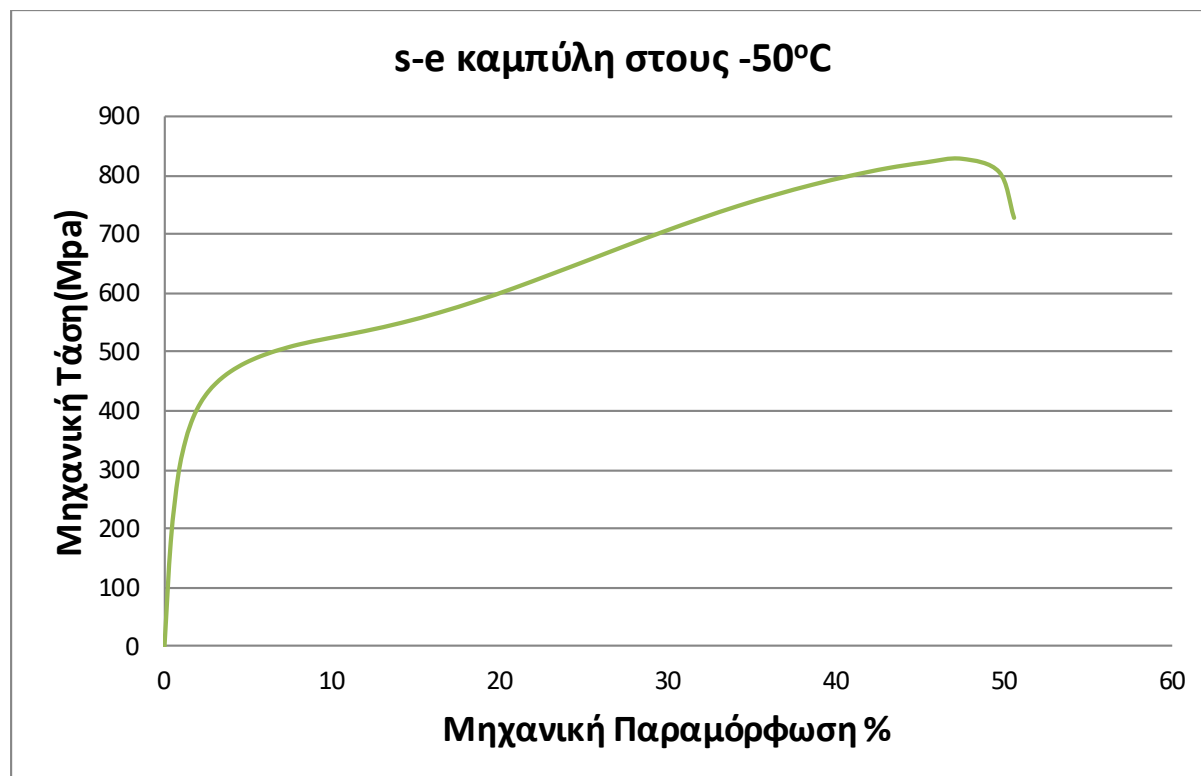


Διάγραμμα 1. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους 25°C

Πίνακας 3. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους 25°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹.

Συμβατικό όριο διαρροής 0,2%(Mpa)	Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή(Mpa)	Ολκιμότητα %	Δυσθραυστότητα(mJ/mm ³)
220	501	54	235

Δοκιμή στους -50°C και με ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹

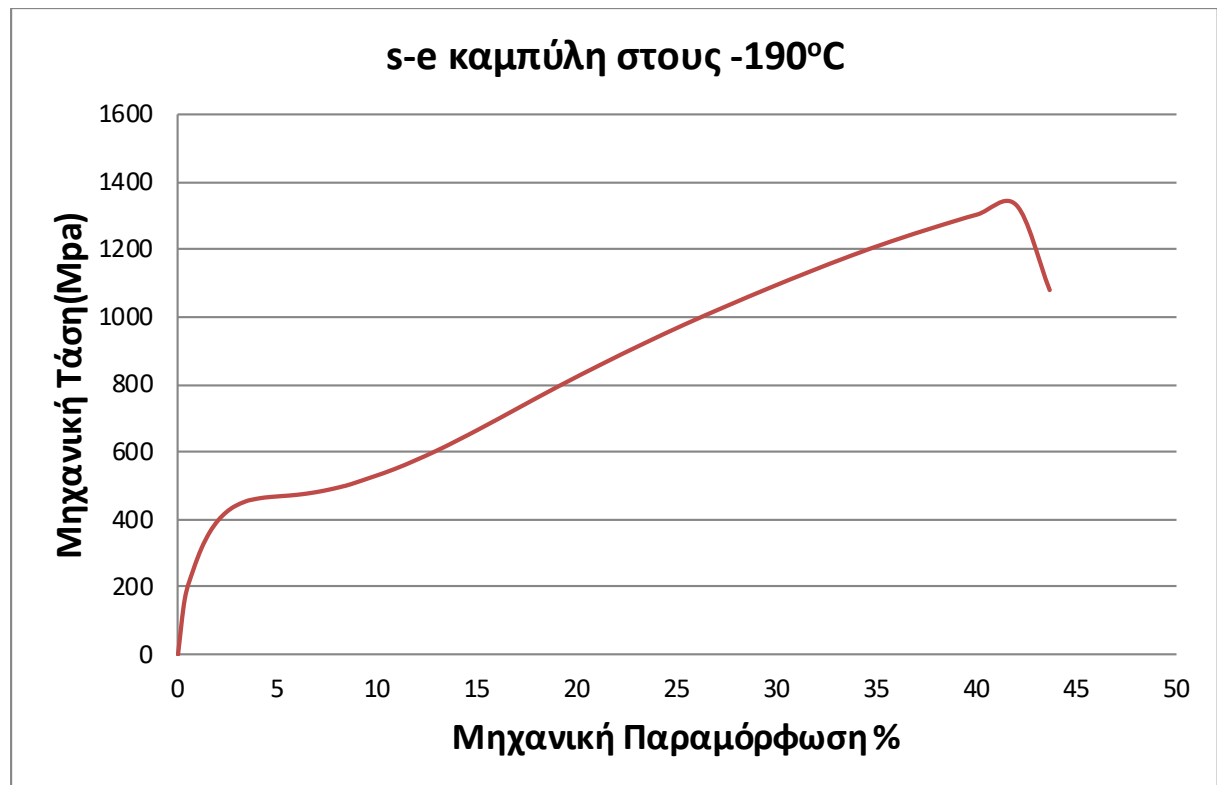


Διάγραμμα 2. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους -50°C

Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους -50°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹.

Συμβατικό όριο διαρροής 0,2%(Μpa)	Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή(Μpa)	Ολκιμότητα %	Δυσθραυστότητα(mJ/mm ³)
290	828	50	327

Δοκιμή στους -190°C και με ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹

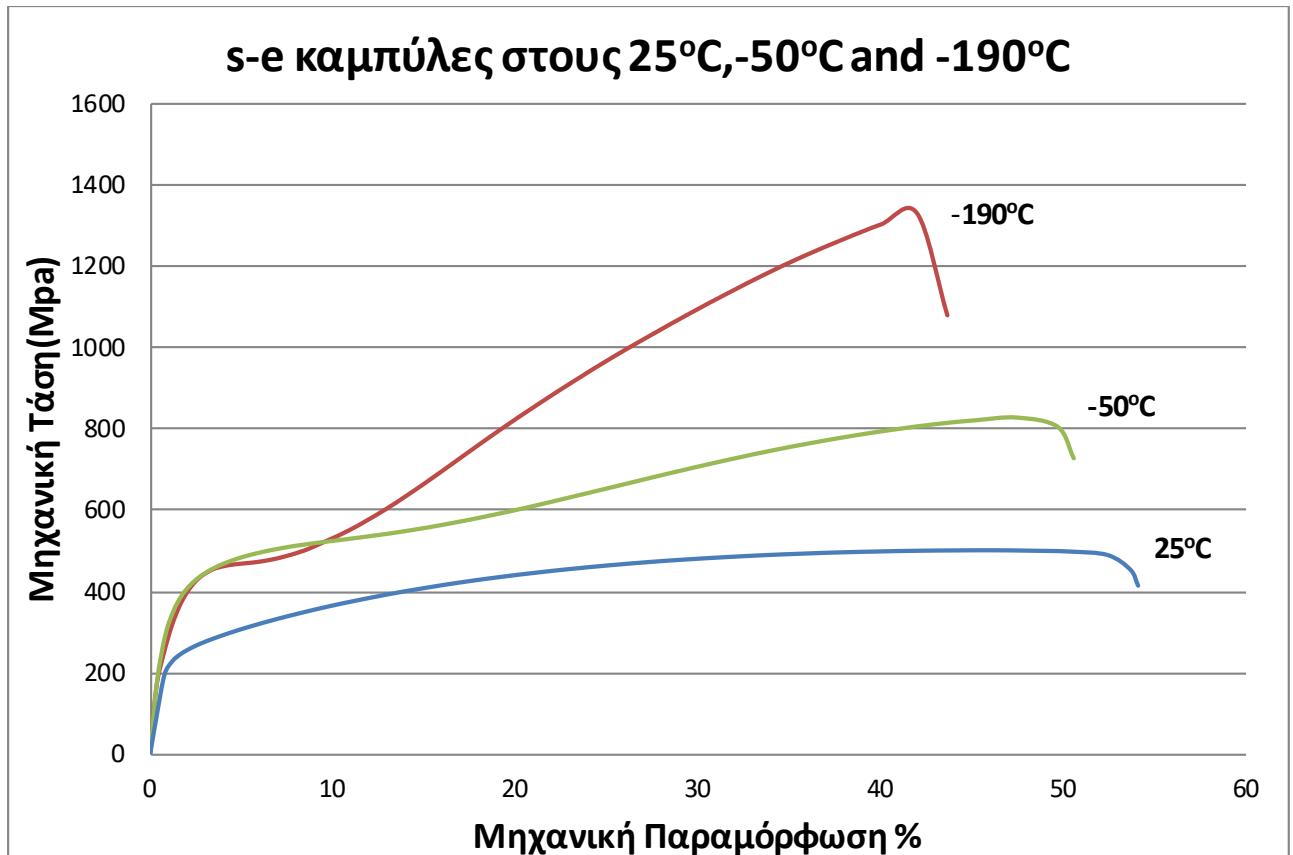


Διάγραμμα 3. Καμπύλη μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης στους -190°C

Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες SS321 στους -190°C και ρυθμό παραμόρφωσης 0,02 s⁻¹.

Συμβατικό όριο διαρροής 0,2%(ΜΡα)	Μέγιστη Εφελκυστική Αντοχή(ΜΡα)	Ολκιμότητα %	Δυσθραυστότητα(mJ/mm ³)
240	1331	44	374

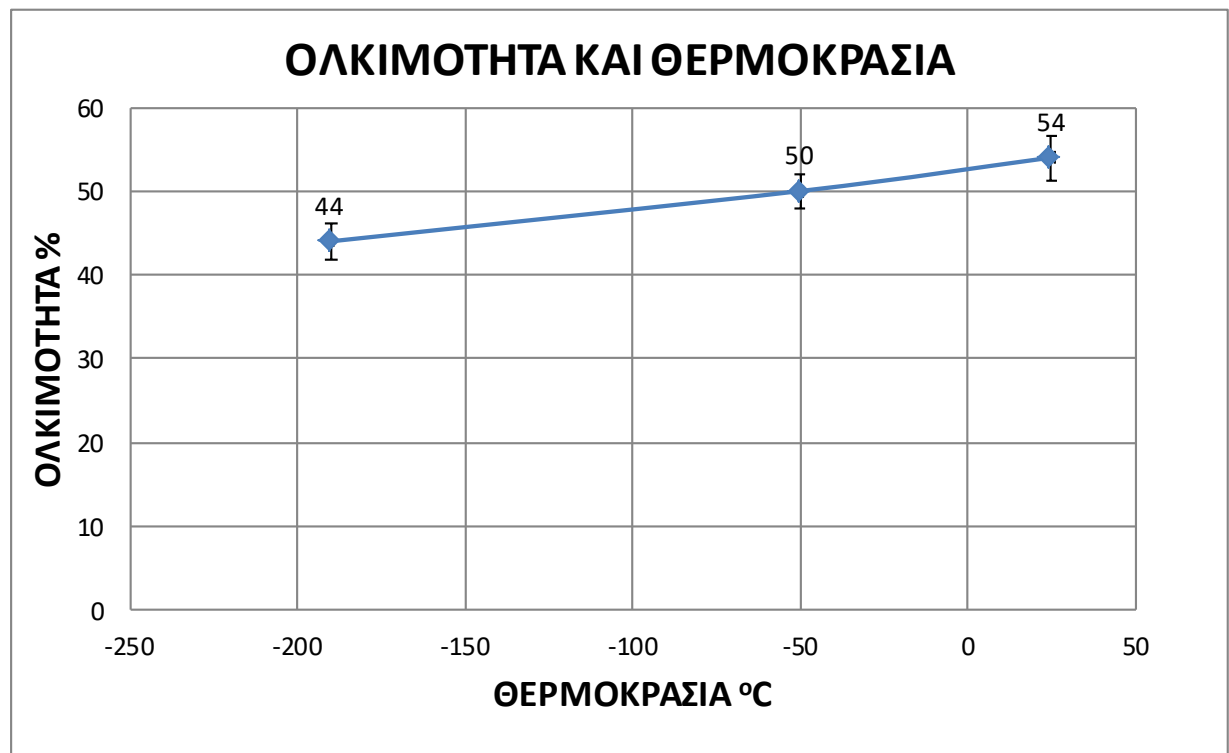
Συγκριτικό διάγραμμα με τις παραπάνω καμπύλες εφελκυσμού



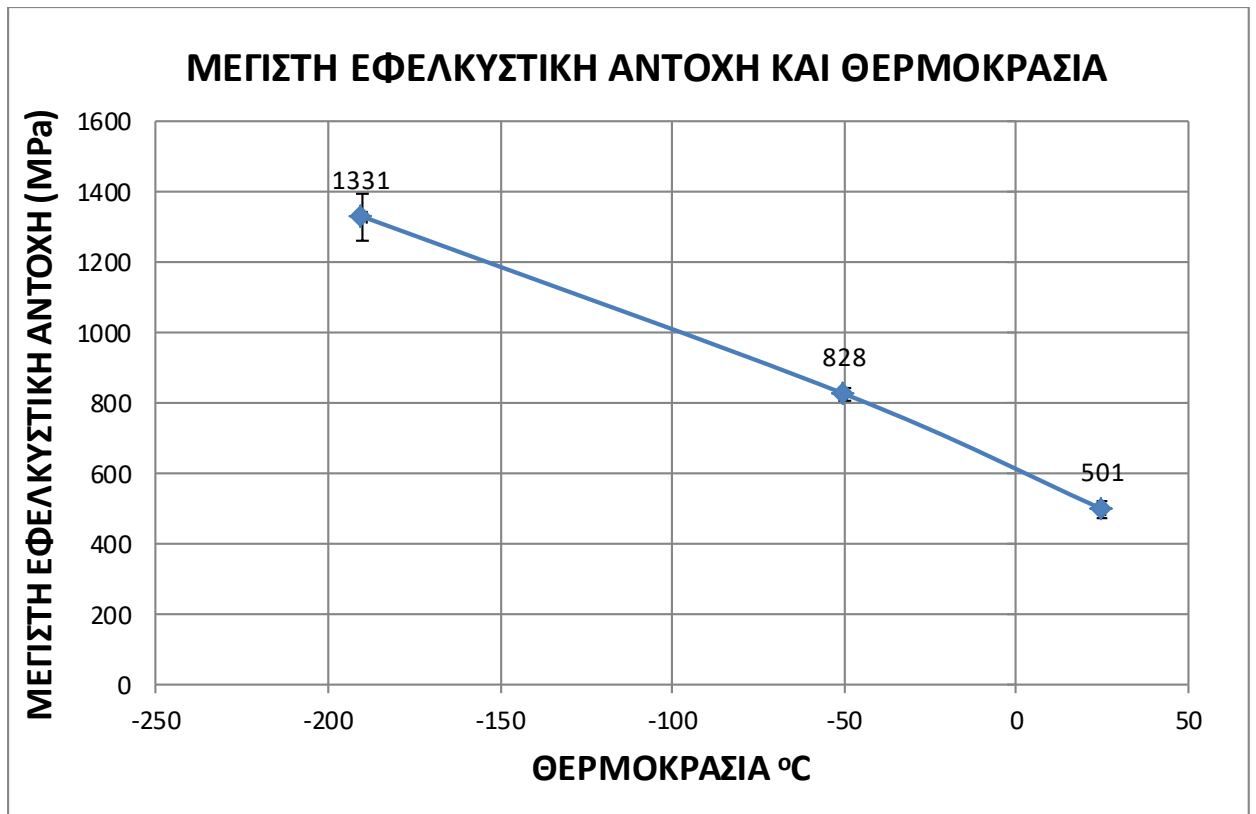
Διάγραμμα 4. Καμπύλες μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης του SS321 στις θερμοκρασίες δοκιμών.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4 η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την ολκιμότητα και την μέγιστη εφελκυστική αντοχή του ανοξειδώτου ωστενιτικού χάλυβα 321. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής(UTS) και μείωση της ολκιμότητας με την πτώση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα από τους 25°C στους -50° η αντοχή(UTS) αυξάνεται περίπου κατά 65% , δηλαδή από τα 501Μpa φτάνει στα 828Μpa, ενώ από τους -50° στους -190°C η αντοχή(UTS) αυξάνεται περίπου κατά 61% , δηλαδή από τα 828Μpa στα 1331Μpa. Γενικότερα το ποσοστό αύξησης της αντοχής από τους 25°C στους -190°C είναι περίπου στα 165% , δηλαδή από τα 501Μpa στα 1331 Μpa (Διάγραμμα 6). Από την άλλη η ολκιμότητα από τους 25°C στους -50°C δεν έχει τεράστια μείωση, από το 54% ολκιμότητα μειώνεται κατά 4% , δηλαδή φτάνει στα 50% , ενώ από τους -50°C στους -190°C η ολκιμότητα μειώνεται κατά 6% , δηλαδή από τα 50% ολκιμότητα πέφτει στα 44% ολκιμότητα. Συνολικά η ολκιμότητα από τους 25°C στους -190°C , μειώνεται κατά 10% δηλαδή από 54% στο 44% ολκιμότητα (Διάγραμμα 5).

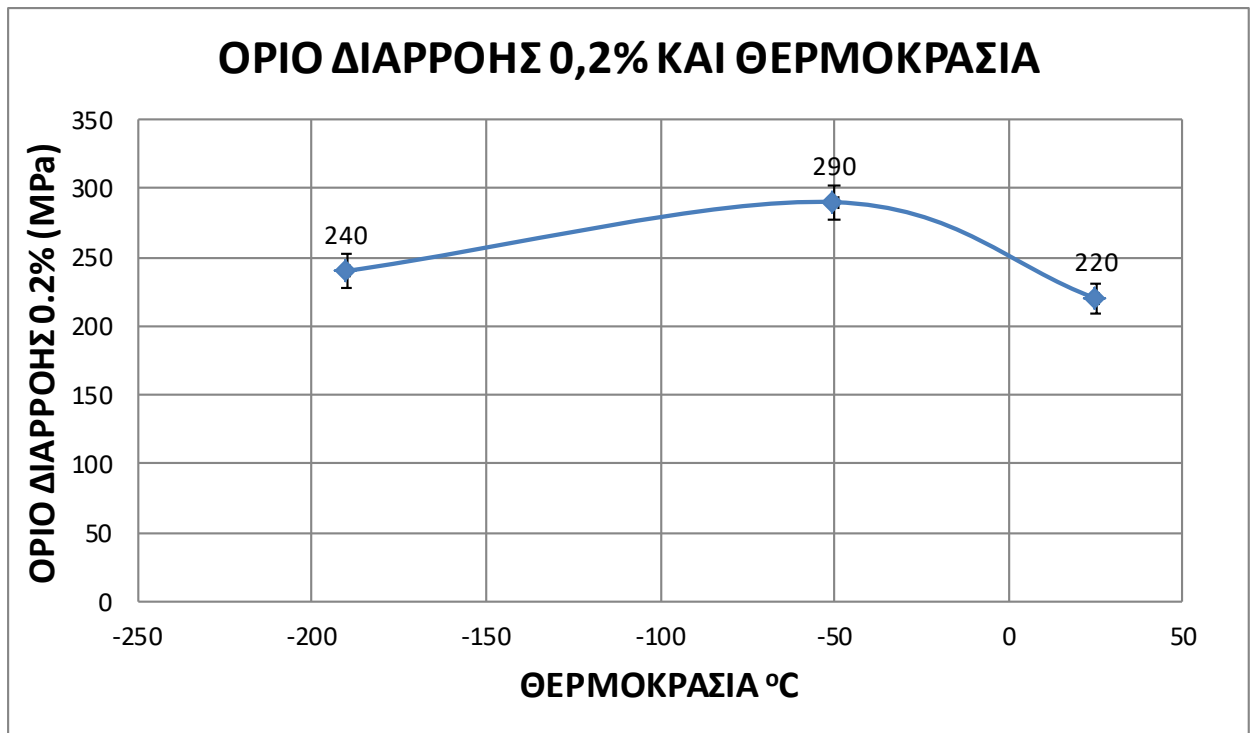
Η τεράστια αύξηση στις τιμές της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής πιθανώς να οφείλεται στο μετασχηματισμό του ωστενίτη γ σε μαρτενσίτη ϵ και α' , όπως επίσης και αυτή η μείωση στην ολκιμότητα. Βέβαια η μεγαλύτερη μείωση στην ολκιμότητα παρατηρείται από τους -50° στους -190°C , διότι μάλλον στους -190°C έχει αυξηθεί το ποσοστό μετασχηματισμού σε α' μαρτενσίτη. Ο α' μαρτενσίτης BCC δομής είναι σαφώς πιο ψαθυρός από τον ωστενίτη γ -FCC και τον ϵ -μαρτενσίτη δομής HCP. Πιθανώς λόγω της αύξησης της ποσότητας του α' μαρτενσίτη η αντοχή στους -190°C έχει αυξηθεί στα 1331 Mpa, το οποίο θα αποσαφηνιστεί παρακάτω με τη μελέτη της μικροδομής.



Διάγραμμα 5. Η ολκιμότητα του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία



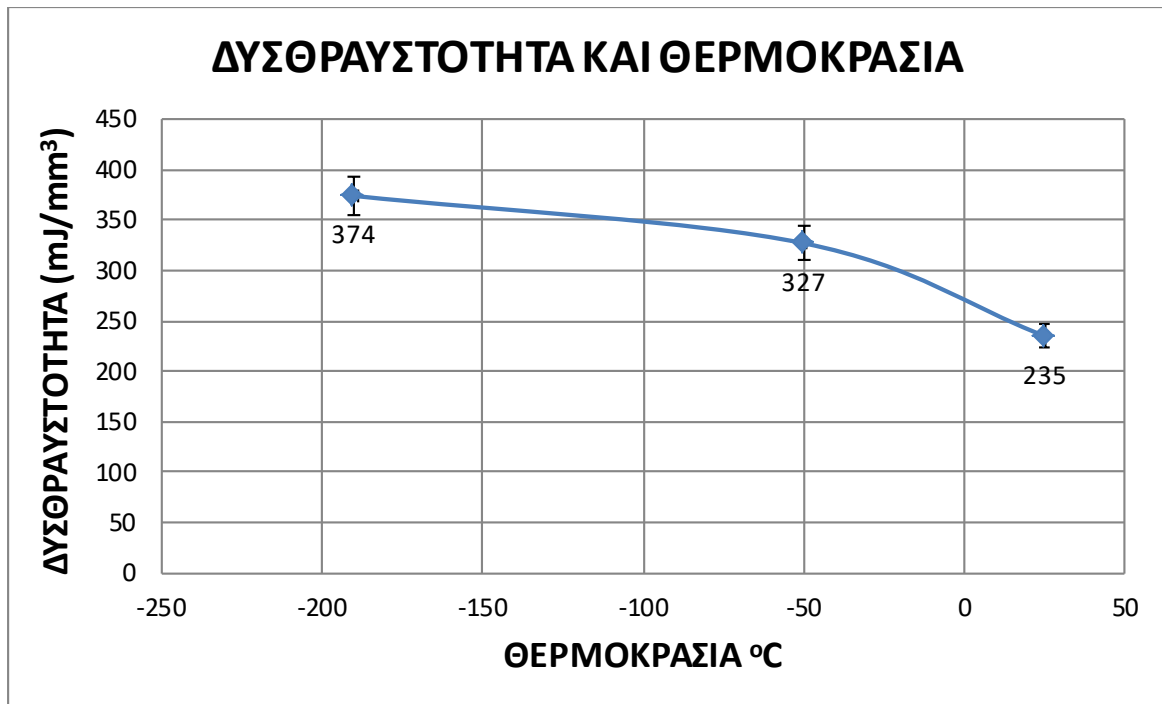
Διάγραμμα 6. Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.



Διάγραμμα 7. Το όριο διαρροής 0,2% του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Όσον αφορά το συμβατικό όριο διαρροής 0,2% ή όριο διαρροής με την πτώση της θερμοκρασίας από τους 25°C στους -50°C αυξάνεται κατά 32% περίπου, δηλαδή από τα 220 Mpa στα 290 Mpa, ενώ από τους -50°C στους -190°C μειώνεται κατά 17,2% περίπου, δηλαδή από τα 290 Mpa πέφτει στα 240 Mpa. Άρα υπάρχει μια αυξομείωση του ορίου διαρροής που φαίνεται και στο διάγραμμα 7. Γενικότερα από τους 25°C στους -190°C το όριο διαρροής αυξάνεται κατά 9,1%, δηλαδή από τα 220 Mpa στα 240 Mpa. Οι μεταβολές που γίνονται στο όριο διαρροής είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις μεταβολές που γίνονται στη μέγιστη εφελκυστική αντοχή.

Μια ακόμα ιδιότητα που μετρήθηκε από τις καμπύλες μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης ήταν η δυσθραυστότητα (toughness). Η δυσθραυστότητα όπως έχει αναφερθεί και στο θεωρητικό μέρος είναι η ενέργεια που απορροφάει ο όγκος του δοκιμίου που εφελκύεται μέχρι και τη θραύση του και είναι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη στο διάγραμμα μηχανικής τάσης-μηχανικής παραμόρφωσης.



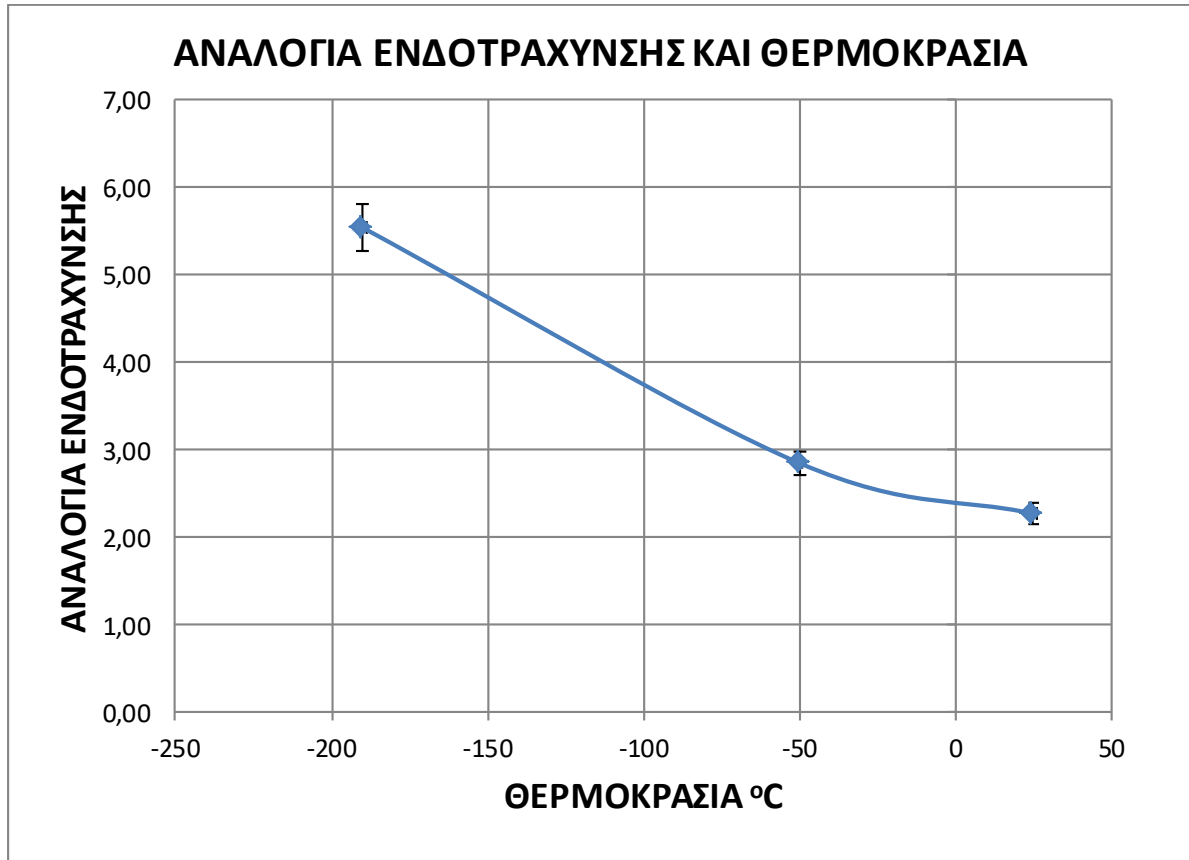
Διάγραμμα 8. Η δυσθραυστότητα του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Από το διάγραμμα 8 παρατηρείται αύξηση της δυσθραυστότητας με την μείωση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα από τους 25°C στους -50°C η δυσθραυστότητα αυξάνεται κατά 39,1% δηλαδή από τα 235 mJ/mm³ αυξάνει στα 327 mJ/mm³, ενώ από τους -50°C στους -190°C αυξάνεται κατά 14,4%, δηλαδή από τα 327 mJ/mm³ στα 374 mJ/mm³. Γενικότερα η δυσθραυστότητα από τους 25°C στους -190°C αυξάνεται κατά 59,1%, δηλαδή από τα 235 mJ/mm³ στα 374 mJ/mm³. Ο λόγος που η δυσθραυστότητα αυξήθηκε με την πτώση της θερμοκρασίας, ήταν η σημαντική αύξηση(165%) της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής. Η Δυσθραυστότητα είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού της ολκιμότητας και της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής. Στο συγκεκριμένο πείραμα την μεγαλύτερη επίδραση στην δυσθραυστότητα την είχε η μέγιστη εφελκυστική αντοχή και όχι η ολκιμότητα. Η ολκιμότητα είχε μια μικρή μείωση(10%), δηλαδή ο 321 διατήρησε την ολκιμότητα του σε ικανοποιητικό βαθμό ακόμα και στην θερμοκρασία των -190°C. Αν είχε επέλθει μεγαλύτερη μείωση στην ολκιμότητα τότε ο 321 στην θερμοκρασία των -190°C θα παρουσίαζε πολύ μικρότερη δυσθραυστότητα.

Για την μέτρηση της ενδοτράχυνσης του 321 στις 3 διαφορετικές θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκε η αναλογία ενδοτράχυνσης(Strain Hardening Ratio)=Ultimate Tensile Strength/Yield Strength. Παρακάτω παρουσιάζονται τα όρια αναλογίας ενδοτράχυνσης για τις 3 θερμοκρασίες.

Πίνακας 6. Αναλογία ενδοτράχυνσης του 321 στις θερμοκρασίες δοκιμών.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ °C	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ
-190	5,55
-50	2,86
25	2,28



Διάγραμμα 9. Αναλογία Ενδοτράχυνσης του 321 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

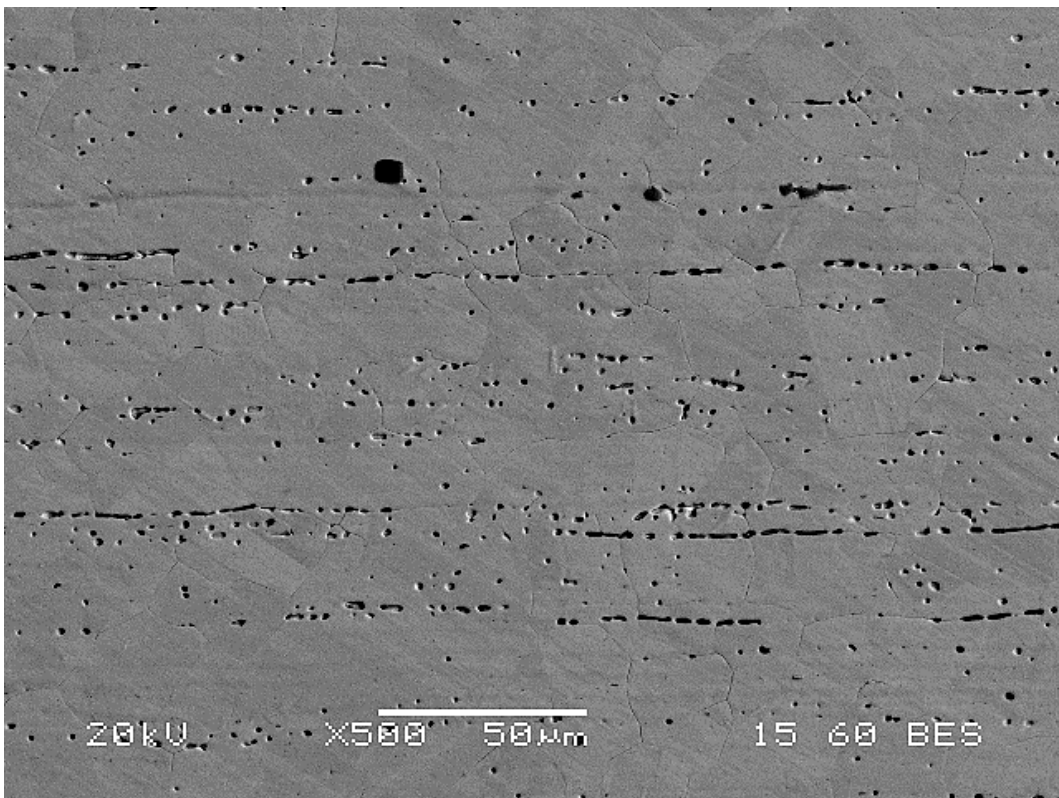
Από τον πίνακα 6 και το διάγραμμα 9 παρατηρείται αύξηση της αναλογίας ενδοτράχυνσης με την πτώση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα ο 321 ενδοτραχύνεται σε μεγαλύτερο βαθμό με την πτώση της θερμοκρασίας από τους -50°C στους -190°C . Μεγάλο ρόλο στην ενδοτράχυνση του κράματος παίζει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη γ σε ϵ και α' μαρτενσίτη, αλλά και η ανάπτυξη διδυμών (deformation twins) κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης.

Η σύνδεση μεταξύ μηχανικών ιδιοτήτων και μικροδομής, όπως και η επιβεβαίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση την μικροδομή γίνονται παρακάτω.

2. ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Μικροδομή ‘As-received’

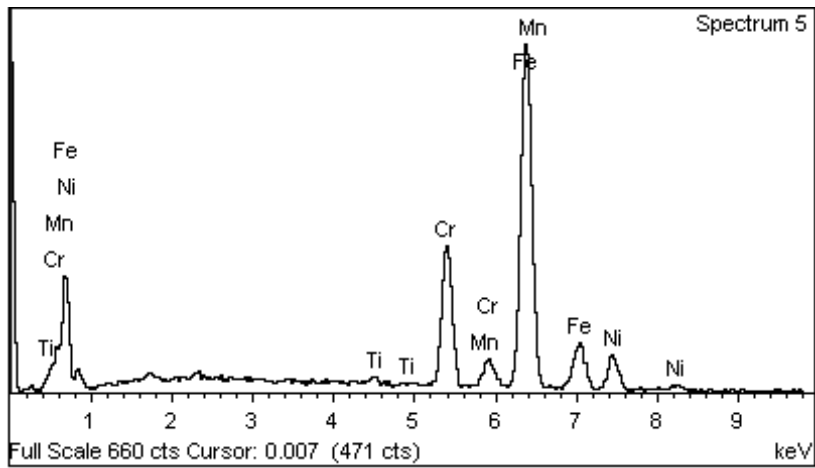
Η μικροδομή του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 321 στην ανοπτημένη του κατάσταση(As-received plate) είναι ωστενιτική με μεγάλους διδύμους που έχουν προκύψει από την ανόπτηση και αρκετό ποσοστό δ-φερρίτη που έχει προκύψει από την χύτευση-στερεοποίηση. Επίσης λόγω της παρουσίας του τιτανίου, έχουν σχηματιστεί αρκετά καρβονιτρίδια: TiC και TiN. Η μικροδομή του ‘As-received’ 321 παρουσιάζεται παρακάτω αναλυτικά μαζί με τις στοιχειακές αναλύσεις του EDS(Energy Dispersive Spectroscopy).



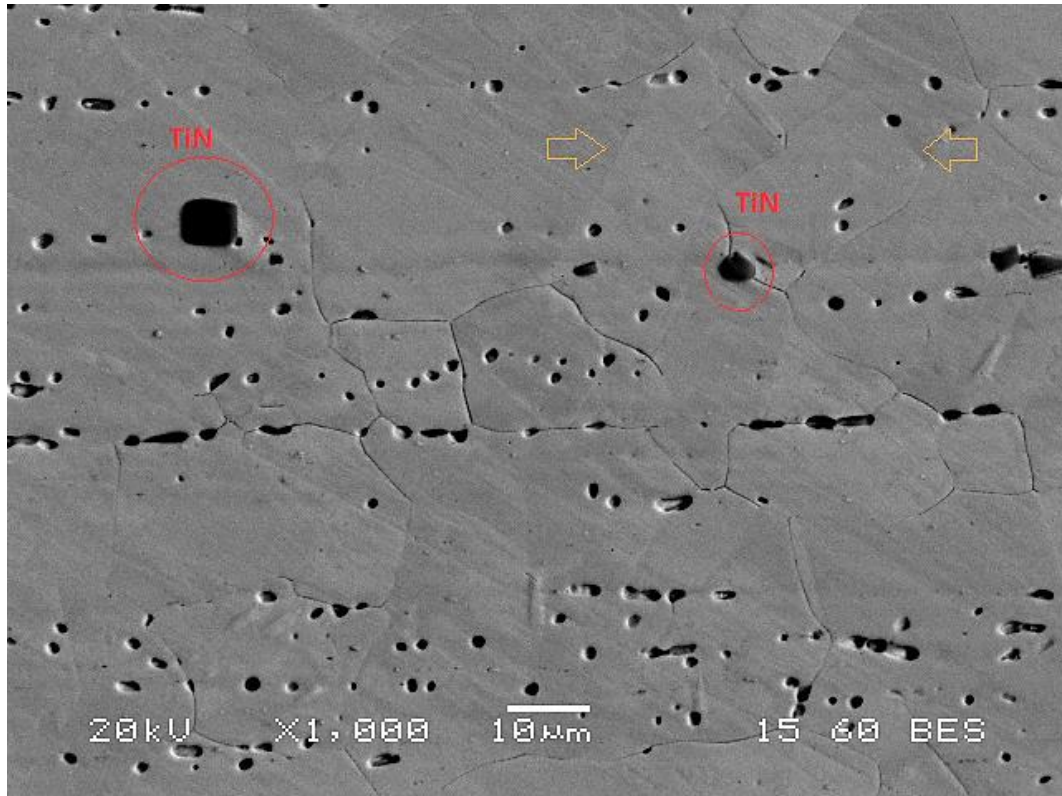
Εικόνα 45. Μικρογραφία SEM x500 του ‘As-received’ δείγματος 321.

Στην εικόνα 45 παρατηρείται μια ωστενιτική μικροδομή με διδυμίες(ανόπτησης) και τον δ-φερρίτη να βρίσκεται σε παράλληλες ζώνες. Επίσης τα μεγάλα γωνιώδη κατακρημνίσματα είναι κυρίως TiN.

Η χημική σύσταση αυτής της μικροδομής(εικόνα 45) και γενικότερα του δοσμένου υλικού μετρήθηκε από το EDS :

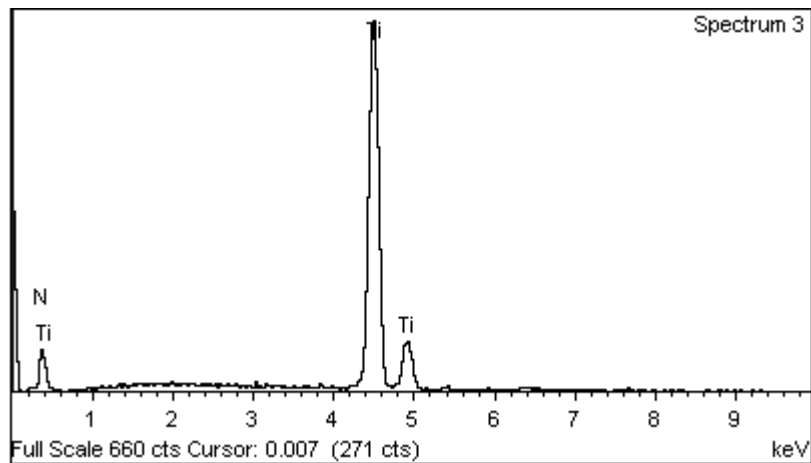


Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.59	0.68
Cr K	18.10	19.25
Mn K	1.44	1.45
Fe K	69.74	69.07
Ni K	10.14	9.55
Totals	100.00	



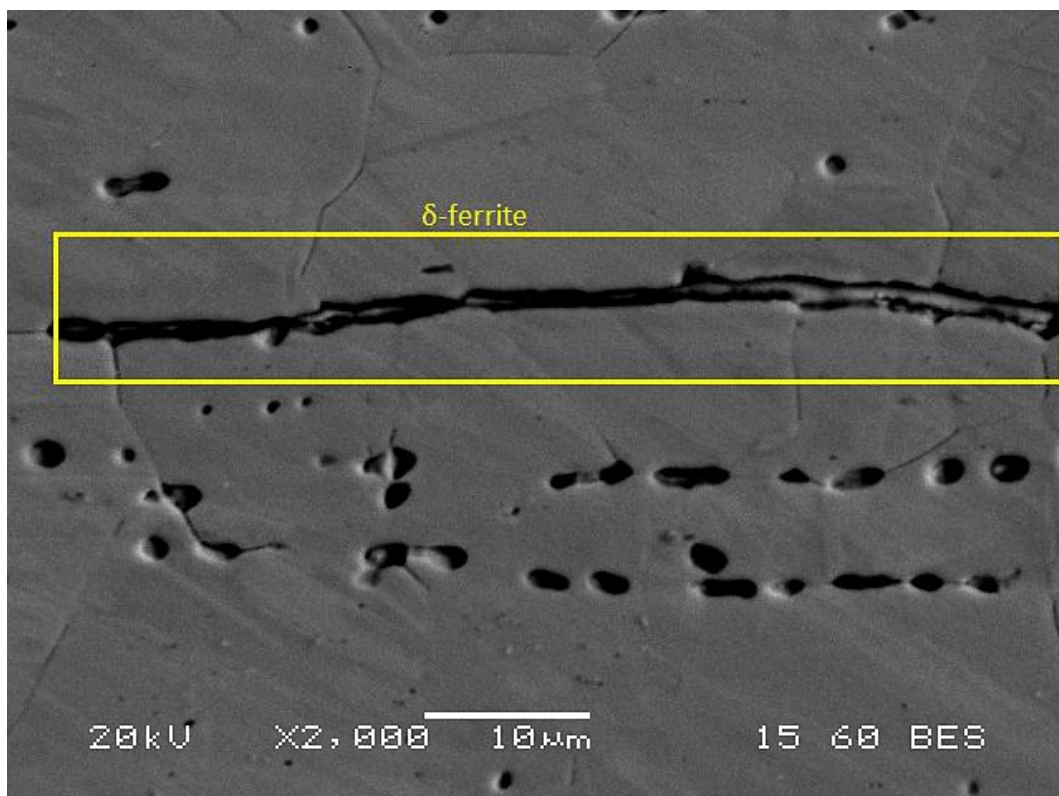
Εικόνα 46. Μικρογραφία SEM x1000 του 'As-received' δειγµατός 321.

Τα κυκλωµένα με κόκκινο χρώµα κατακρηµνίσµατα(εικόνα 46) είναι TiN και αυτό επιβεβαιώνεται από το EDS:



Element	Weight%	Atomic%
N K	14.57	36.84
Ti K	85.43	63.16
Totals	100.00	

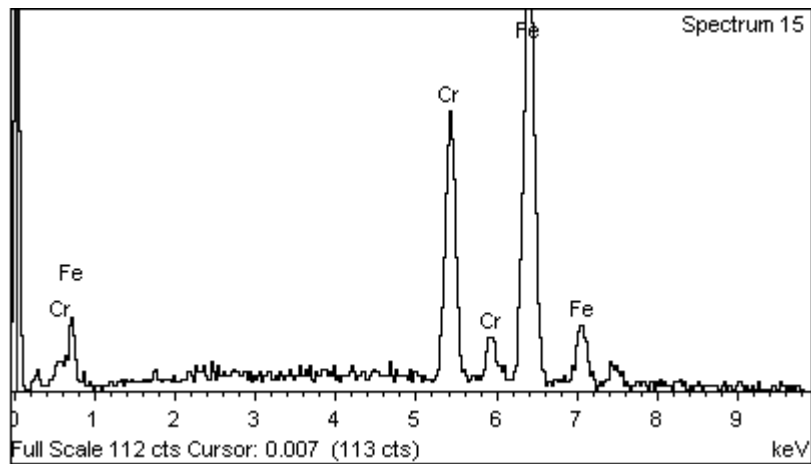
Τα πορτοκαλί βέλη(εικόνα 46) δείχνουν τους μεγάλους διδύμους ανόπτησης που υπάρχουν στο υλικό.



Εικόνα 47. Μικρογραφία SEM x2000 του ‘As-received’ δείγματος 321.

Από την παραπάνω μικρογραφία(εικόνα 47) παρατηρείται ο δ-φερρίτης ο οποίος βρίσκεται σε ζώνη και εκτείνεται στους ωστενιτικούς κόκκους. Ο δ-φερρίτης εμφανίζεται σε ζώνες, λόγω της έλασης που είχε υποστεί το υλικό.

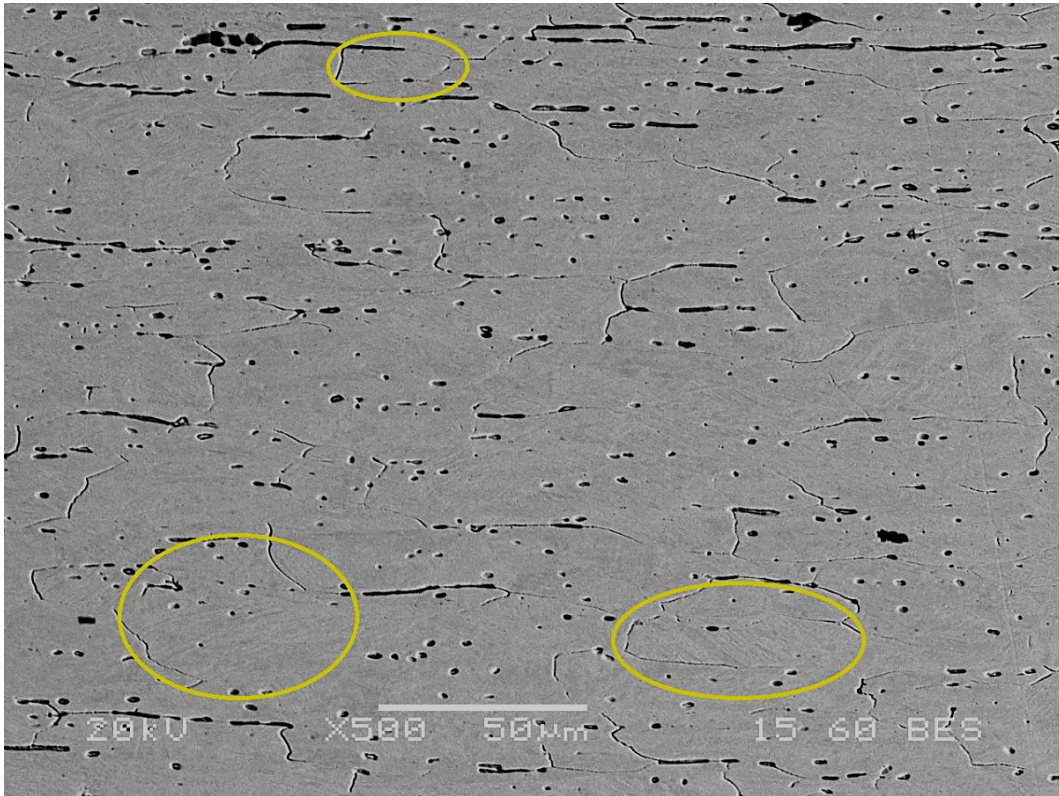
Μέσα από το EDS διαπιστώνεται ό,τι πρόκειται για δ-φερρίτη:



Element	Weight%	Atomic%
Cr K	27.92	29.38
Fe K	72.08	70.62
Totals	100.00	

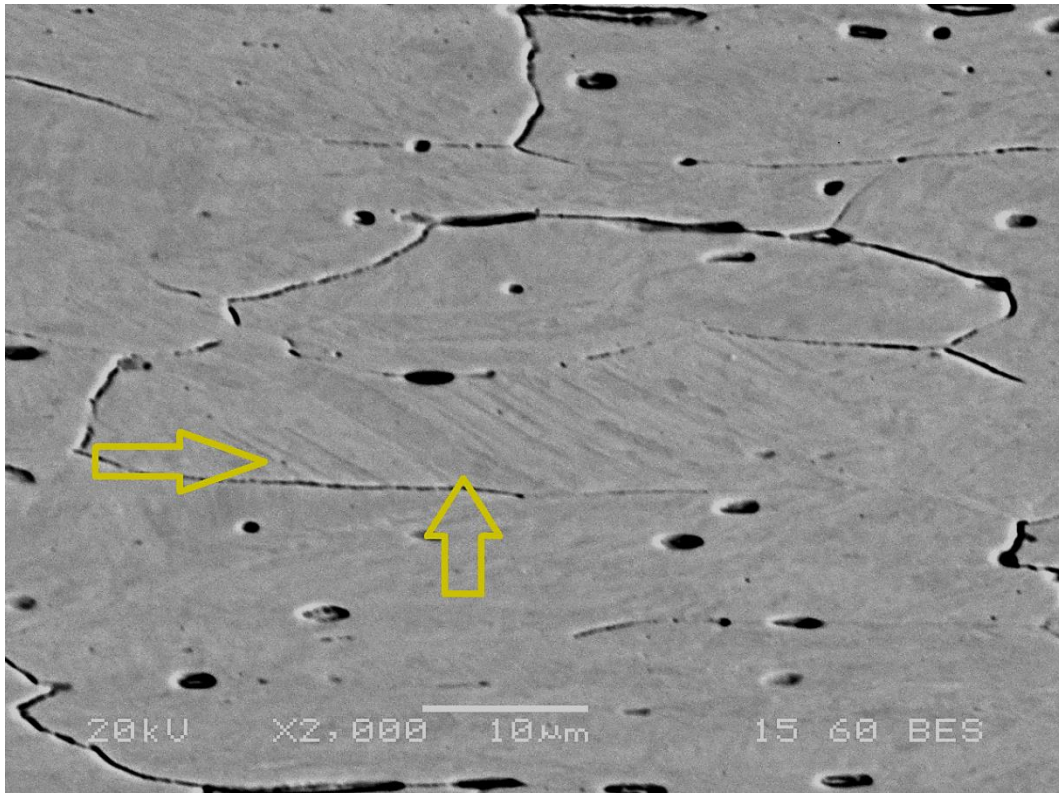
Από την ανάλυση παρατηρείται ότι το ποσοστό του χρωμίου είναι περίπου 28% και του σιδήρου 72%. Δεν παρατηρείται ποσοστό νικελίου ή άλλων στοιχείων, άρα πρόκειται για στερεό διάλυμα Fe-Cr (BCC), δηλαδή δ-φερρίτης.

Μικροδομή ύστερα από εφελκυσμό στους 25°C



Εικόνα 48. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους 25°C.

Παρατηρείται μια πλήρης ωστενιτική μικροδομή με επιμηκυμένους κόκκους. Κάποιοι κόκκοι εμφανίζουν διδυμίες λόγω παραμόρφωσης (deformation twins) και υποδεικνύονται από τους κίτρινους κύκλους (εικόνα 48).

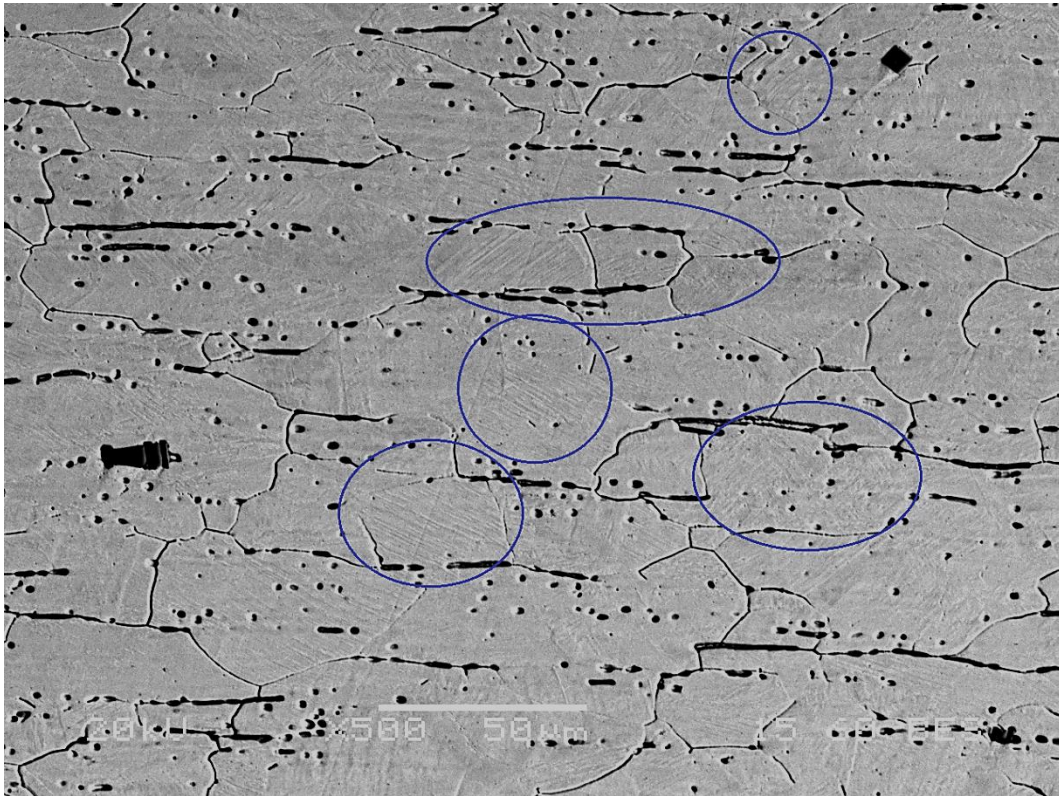


Εικόνα 49. Μικρογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους 25°C

Τα κίτρινα βέλη(εικόνα 49) υποδεικνύουν τις διδυμίες που αναπτύχθηκαν λόγω παραμόρφωσης μέσα στον επιμηκυμένο ωστενιτικό κόκκο. Οι δίδυμοι λόγω παραμόρφωσης και η ωστενιτική μικροδομή είναι ο λόγος για την υψηλή ολκιμότητα(54%) του δοκιμίου που εφελκύστηκε στους 25°C. Οι δίδυμοι λόγω παραμόρφωσης μπορούν να διευκολύνουν την διαδικασία της παραμόρφωσης εισάγοντας πρόσθετα συστήματα ολίσθησης ή διευκολύνοντας τη μεταφορά μεταξύ υπάρχοντων συστημάτων ολίσθησης μέσω των αλληλεπιδράσεων διαταραχών-διδύμων, με αποτέλεσμα να αυξάνει η ολκιμότητα του υλικού.

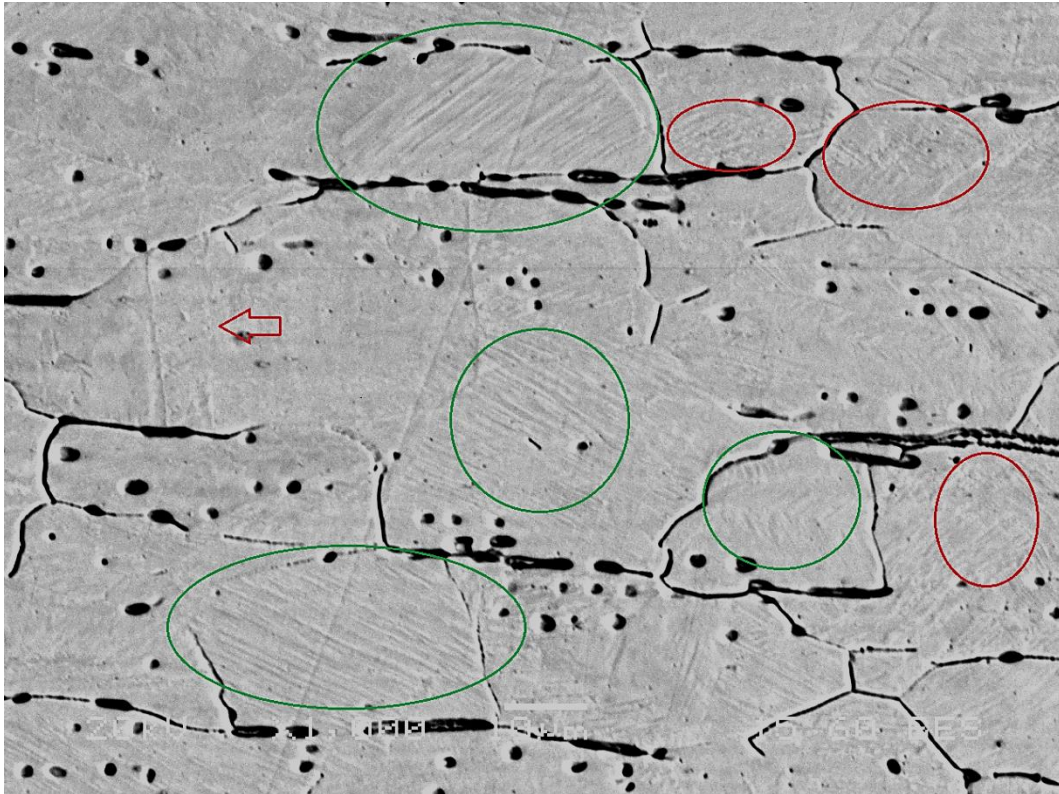
Η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης του συγκεκριμένου χάλυβα 321 στη θερμοκρασία περιβάλλοντος(25°C) είναι με βάση την εξίσωση (2) της θεωρίας $26,72\text{mJ/m}^2 (>18\text{mJ/m}^2)$. [54] Άρα οι κυρίαρχοι μηχανισμοί παραμόρφωσης του υλικού, είναι η ανάπτυξη διδυμών και η ολίσθηση διαταραχών, που επιβεβαιώνεται από την μικροδομή. Η πιθανότητα ύπαρξης ϵ και α' μαρτενσίτη σε αυτή τη μικροδομή είναι πολύ χαμηλή, επειδή η θερμοκρασία είναι υψηλή, δηλαδή η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης(SFE) είναι υψηλή, επομένως δεν υπάρχει κάποια σύνδεση με την μέγιστη εφελκυστική αντοχή(UTS) του 321 στους 25°C(501Mpa).

Μικροδομή ύστερα από εφελκυσμό στους -50°C



Εικόνα 50. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους -50°C.

Στη μικροδομή του δείγματος του δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους -50°C παρατηρούνται ωστενιτικοί κόκκοι που δεν έχουν μετασχηματιστεί και ωστενιτικοί κόκκοι που έχουν μετασχηματιστεί. Κάποιοι από τους κόκκους που έχουν μετασχηματιστεί μερικώς ή ολικώς υποδεικνύονται από τους μπλέ κύκλους(εικόνα 50). Οι μετασχηματισμένοι κόκκοι εμφανίζουν κυρίως ζώνες παραμόρφωσης(deformation bands), οι οποίες ενδείκνυται να είναι πλακίδια ε-μαρτενσίτη ή δίδυμοι λόγω παραμόρφωσης(deformation twins) ή και τα 2.



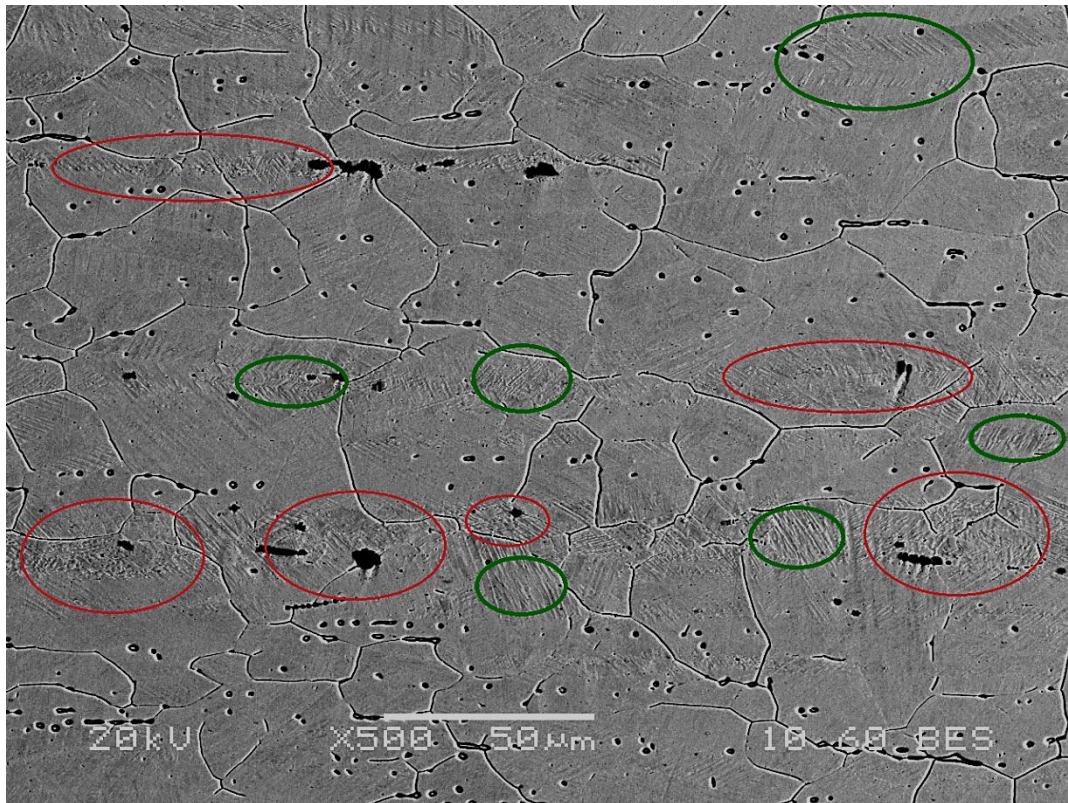
Εικόνα 51. Μικρογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκύστηκε στους -50°C .

Στην εικόνα 51 παρατηρούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι ζώνες παραμόρφωσης(ε μαρτενσίτης και δίδυμοι παραμόρφωσης) και υποδεικνύονται από τους πράσινους κύκλους. Συγκεκριμένα παρατηρούνται πλακίδια παράλληλα μεταξύ τους αλλά και υπο οξεία γωνία μεταξύ τους. Τα υπο οξεία γωνία μεταξύ τους πλακίδια είναι και με βάση την βιβλιογραφία ε μαρτενσίτης. Επίσης παρατηρείται α' μαρτενσίτης σε κάποιους κόκκους και σε τριπλά σημεία των ορίων των κόκκων, ο οποίος υποδεικνύεται από τους κόκκινους κύκλους και είναι μορφολογίας 'blocky'. Πιθανώς να υπάρχει α' μαρτενσίτης και ανάμεσα στις ζώνες παραμόρφωσης, δηλαδή ανάμεσα ή πάνω στα πλακίδια ε μαρτενσίτη αλλά και στις διεπιφάνειες των διδύμων παραμόρφωσης. Ακόμα παρατηρείται α' μαρτενσίτης πάνω σε δίδυμο ανόπτησης, ο οποίος υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος. Οι ζώνες παραμόρφωσης(ε μαρτενσίτης, δίδυμοι παραμόρφωσης) μαζί με τον α' μαρτενσίτη δικαιολογούν την αύξηση στην εφελκυστική αντοχή(UTS) του 321 στους -50°C (828Mpa), αλλά και την ελαφριά μείωση στην ολκιμότητα(50%).

Η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης του συγκεκριμένου χάλυβα 321 στη θερμοκρασία των -50°C είναι με βάση την εξίσωση (2) της θεωρίας $23,22\text{mJ}/\text{m}^2(>18\text{mJ}/\text{m}^2)$. [54] Άρα φαίνεται να κυριαρχούν οι μηχανισμοί παραμόρφωσης της ανάπτυξης διδύμων και της ολίσθησης διαταραχών, που επιβεβαιώνονται από αυτήν την μικροδομή. Βέβαια, υπάρχει και μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, όπως προαναφέρθηκε. Με βάση την ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης ο μαρτενσίτης α' της εικόνας 51, προκύπτει κυρίως από τον μηχανισμό

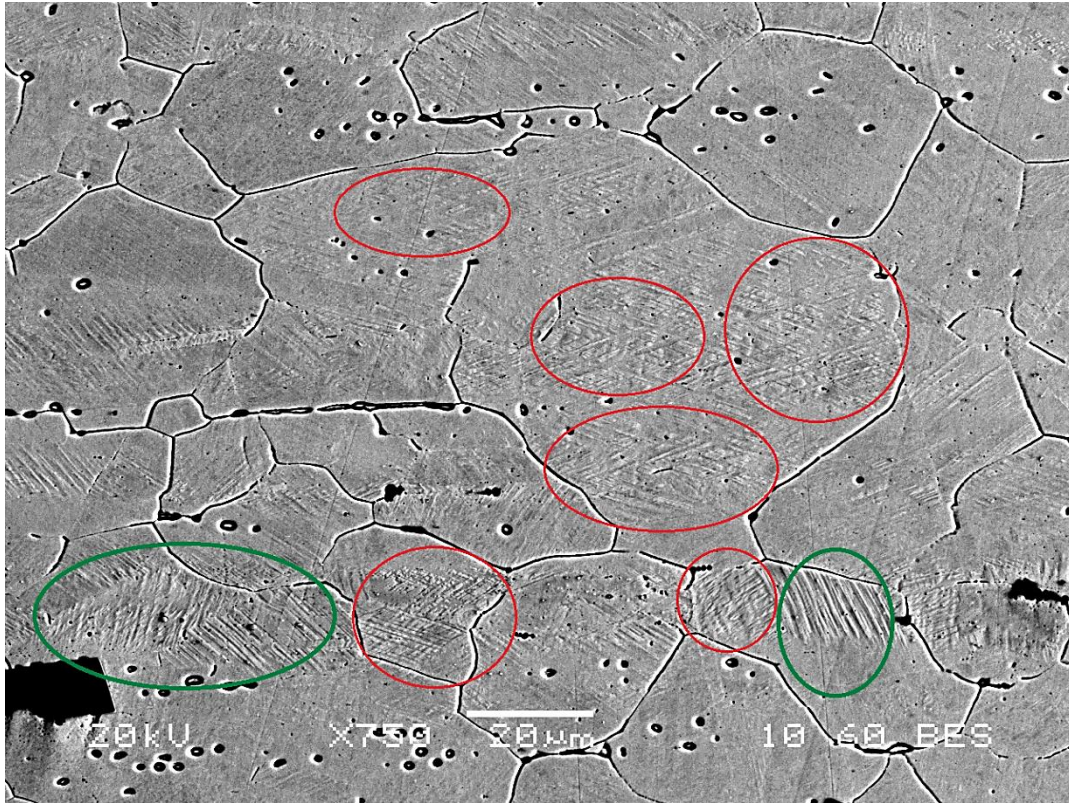
$\gamma \rightarrow \text{twinning} \rightarrow \alpha'$. Η πιθανότητα ύπαρξης μαρτενσίτη ϵ και α' σε αυτή την μικροδομή είναι μεγαλύτερη, επειδή η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, δηλαδή η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης(SFE) είναι χαμηλότερη, επομένως υπάρχει σύνδεση με την μέγιστη εφελκυστική αντοχή(UTS) του 321 στους -50°C .

Μικροδομή ύστερα από εφέλκυσμό στους -190°C



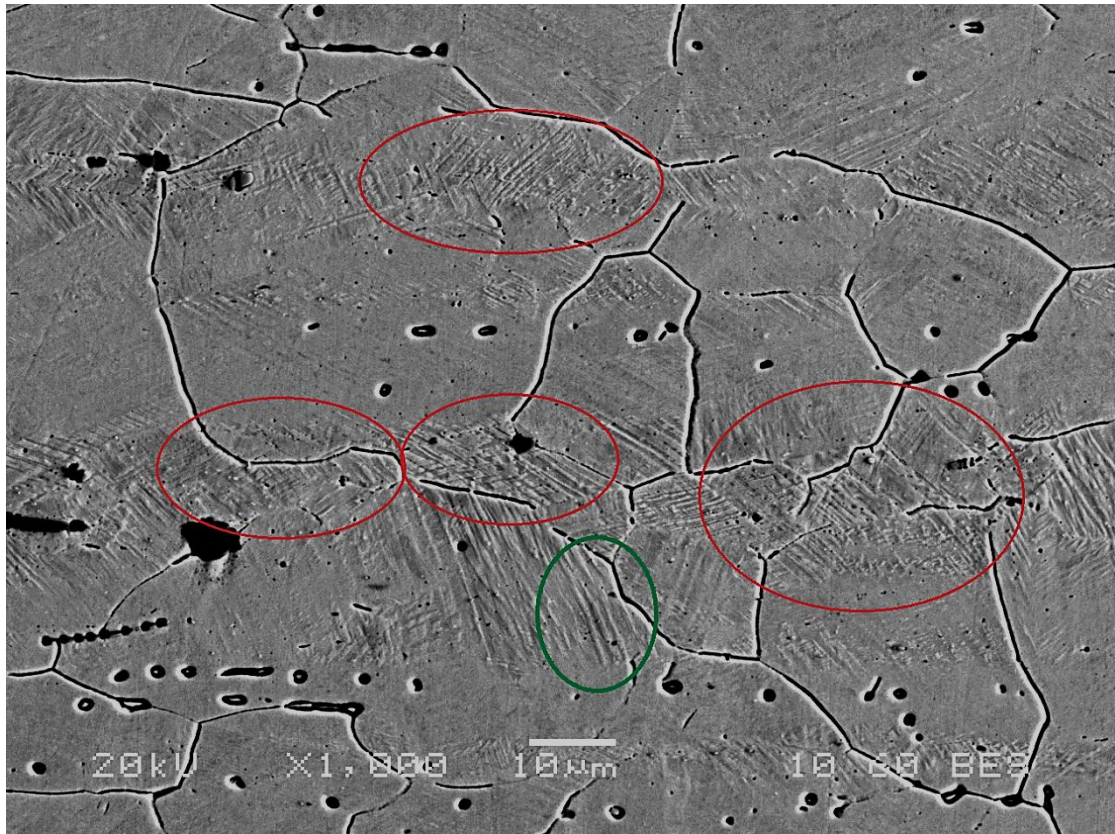
Εικόνα 52. Μικρογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφέλκυστηκε στους -190°C

Στην εικόνα 52 παρατηρείται αύξηση στη ποσότητα του α' μαρτενσίτη ο οποίος υποδεικνύεται με τους κόκκινους κύκλους. Επίσης παρατηρούνται και κάποιες περιοχές κόκκων που εμφανίζουν ζώνες παραμόρφωσης(ϵ μαρτενσίτης, δίδυμοι παραμόρφωσης). Σε πολλούς κόκκους παρατηρείται συνύπαρξη α' μαρτενσίτη και ϵ μαρτενσίτη ή διδύμων παραμόρφωσης.

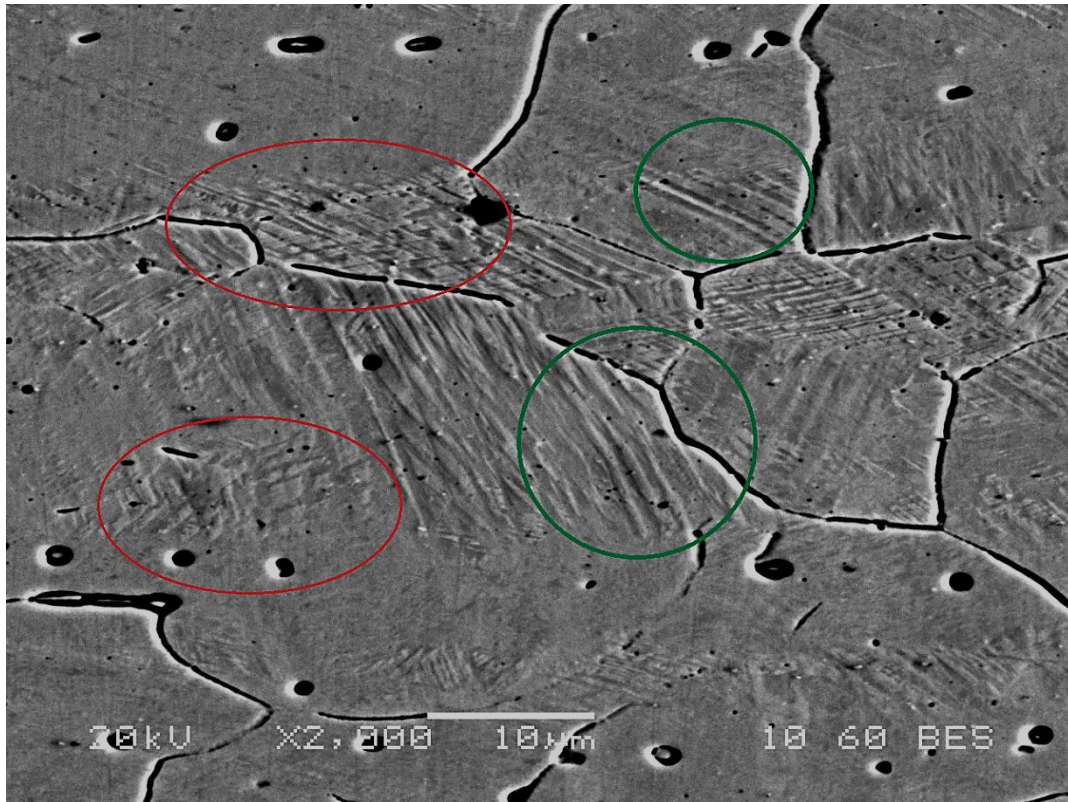


Εικόνα 53. Μικρογραφία SEM x750 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους -190°C

Σε άλλη περιοχή του δείγματος παρατηρείται μεγαλύτερη ποσότητα α' μαρτενσίτη σε αρκετούς κόκκους(εικόνα 53). Ο α' μαρτενσίτης υποδεικνύεται με τους κόκκινους κύκλους. Επίσης στην εικόνα 53 όπως και στην εικόνα 52 παρατηρούνται ζώνες παραμόρφωσης, οι οποίες είναι κυρίως πλακίδια υπο οξεία γωνία μεταξύ τους, άρα πρόκειται για πλακίδια ε μαρτενσίτη. Σε κάποιους κόκκους παρατηρείται συνύπαρξη ε μαρτενσίτη και α' μαρτενσίτη. Οι ζώνες παραμόρφωσης(deformation bands) υποδεικνύονται και σε αυτήν την περίπτωση από τους πράσινους κύκλους(εικόνες 53 και 52).



Εικόνα 54. Μικρογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους -190°C.



Εικόνα 55. Μικρογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους -190°C.

Στις εικόνες 54 και 55 παρατηρείται σε μεγαλύτερη μεγένθυση ο α' μαρτενσίτης και οι ζώνες παραμόρφωσης(ε, deformation twins) , τα οποία υποδεικνύονται με κόκκινους και πράσινους κύκλους αντίστοιχα. Ο α' μαρτενσίτης παρατηρείται ότι φυτρώνει ανάμεσα στα πλακίδια ε ή στους δίδυμους παραμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 55. Ο α' έχει μορφολογία 'blocky'.

Άρα στις εικόνες 52-55 παρατηρείται μεγαλύτερη ποσότητα α' μαρτενσίτη και κόκκων με ζώνες παραμόρφωσης σε σχέση με τις μικροδομές των δειγμάτων στους 25°C και -50°C. Οι περισσότερες περιοχές με ζώνες παραμόρφωσης(ε,deformation twins) μετασχηματίζονται σε α' μαρτενσίτη με την μείωση της θερμοκρασίας στους -190°C. Από την βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι, ο ε μαρτενσίτης και οι δίδυμοι παραμόρφωσης αποτελούν πρόδρομοι του α' μαρτενσίτη. Η τεράστια αύξηση στη μέγιστη εφελκυστική αντοχή(1331Mpa), καθώς και η μείωση στην ολκιμότητα(44%) στους -190°C, οφείλονται κυρίως στον α' μαρτενσίτη.

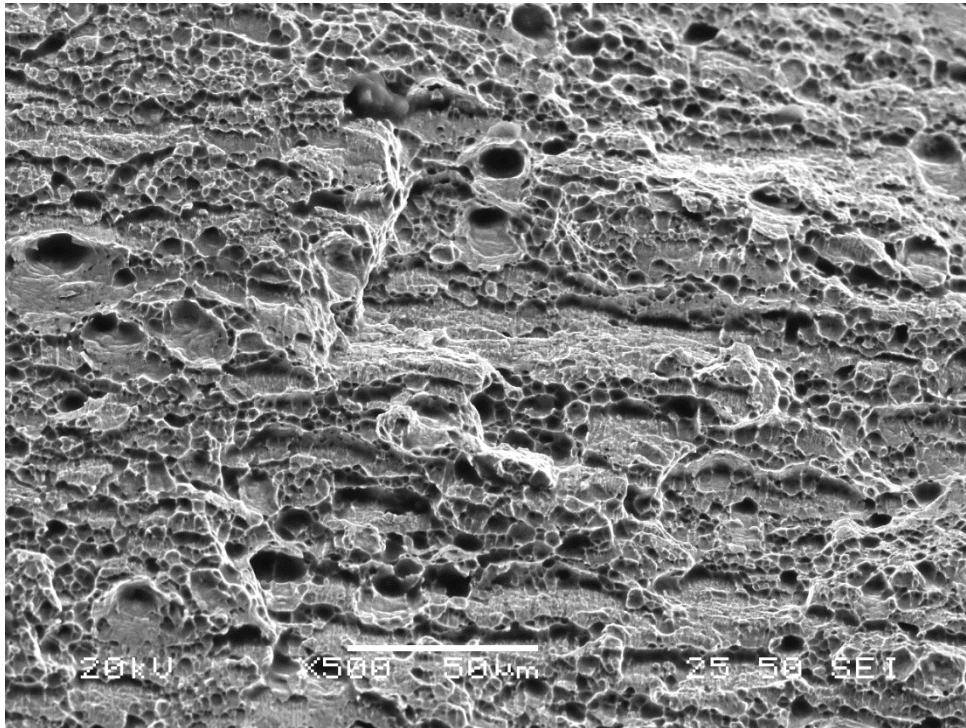
Η ενέργεια σφαλμάτων συσώρευσης του συγκεκριμένου χάλυβα 321 στη θερμοκρασία των -190°C είναι με βάση την εξίσωση (2) της θεωρίας $16,22\text{mJ/m}^2 (<18\text{mJ/m}^2)$. [54] Άρα ο κυρίαρχος μηχανισμός παραμόρφωσης του υλικού, είναι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, το οποίο επιβεβαιώνεται από τις μικροδομές(εικόνες 52-55). Με βάση την ενέργεια σφαλμάτων συσώρευσης ο

μαρτενσίτης α' των εικόνων 52-55, προκύπτει κυρίως από τον μηχανισμό $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$. Η πιθανότητα ύπαρξης ϵ και α' μαρτενσίτη σε αυτή την μικροδομή είναι ακόμα μεγαλύτερη, επειδή η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλότερη, δηλαδή η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης είναι πολύ χαμηλότερη και επομένως υπάρχει μεγαλύτερη σύνδεση με την μέγιστη εφελκυστική αντοχή(UTS) του 321 στους -190°C .

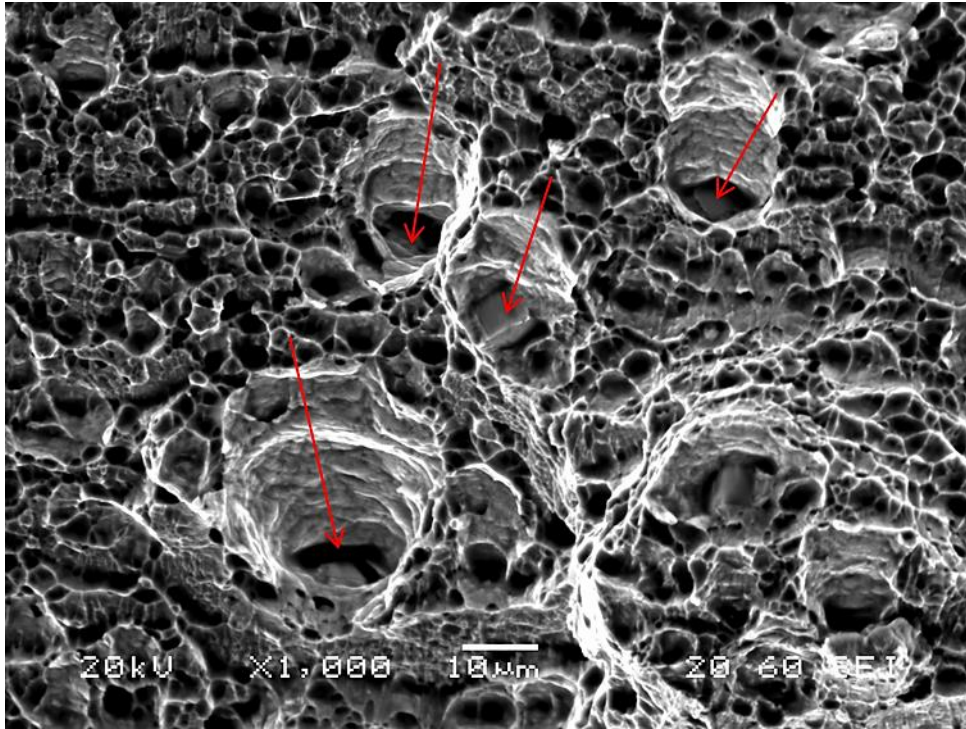
Η ταυτοποίηση των δίδυμων παραμόρφωσης, του μαρτενσίτη ϵ και α' , βασίζεται στην αντιστοίχιση με παρόμοια χαρακτηριστικά γνωστά στη βιβλιογραφία. Συνεπώς, είναι προφανές ότι η εξέλιξη της μικροδομής στους ωστενιτικούς ανοξειδωτους χάλυβες επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία της παραμόρφωσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

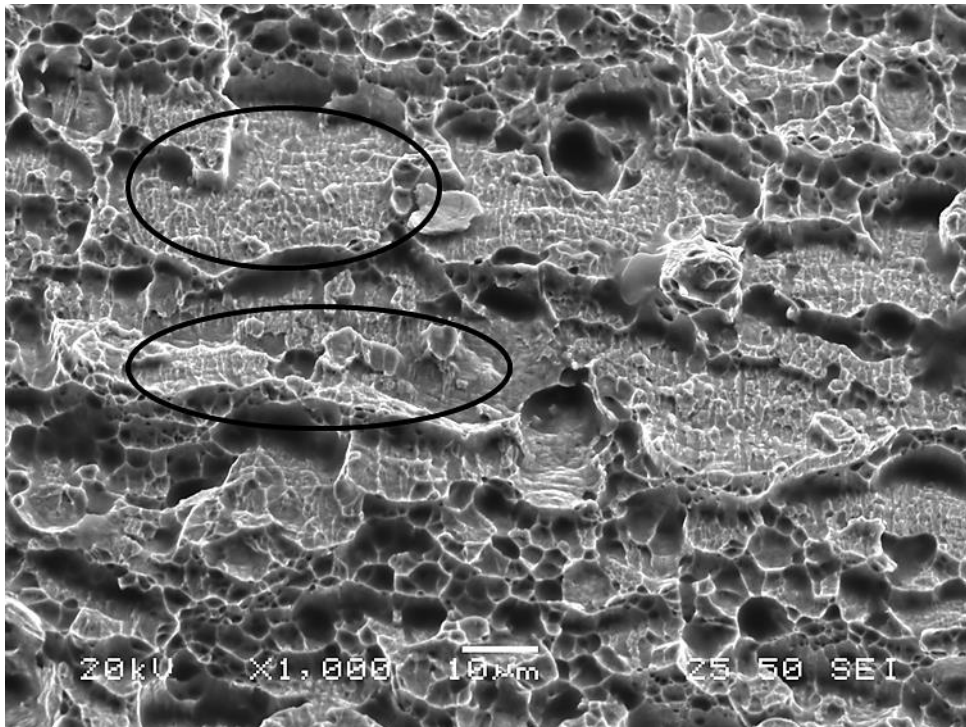
Δοκίμιο που εφελκώστηκε στους 25°C



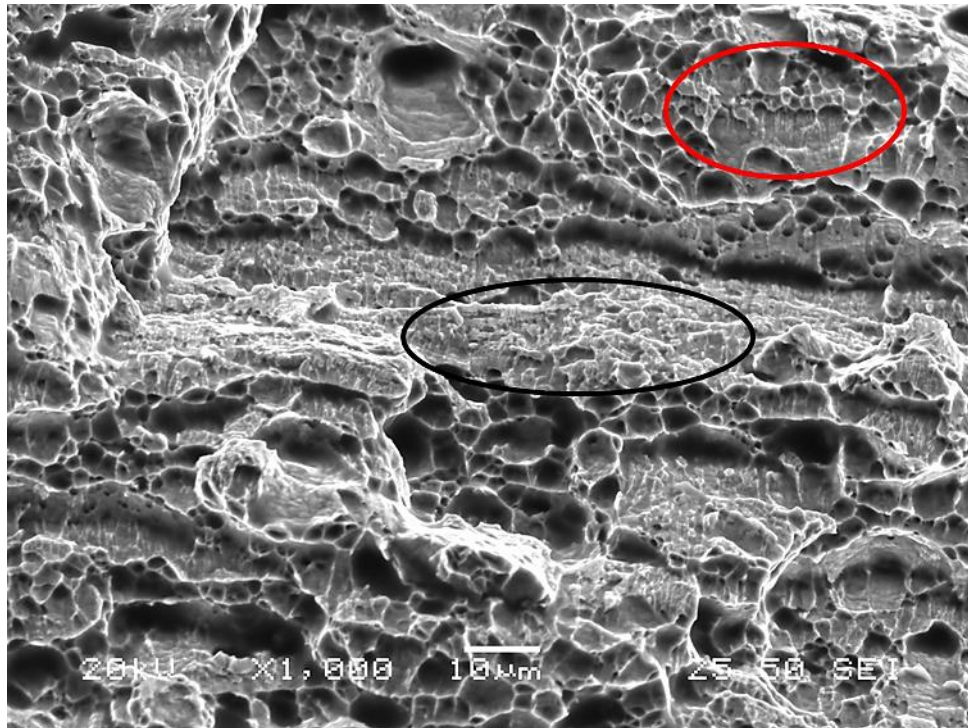
Εικόνα 56. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκώστηκε στους 25°C.



Εικόνα 57. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους 25°C.



Εικόνα 58. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους 25°C.

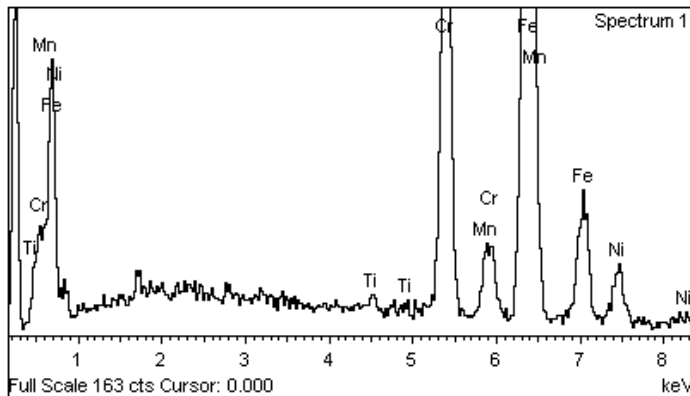


Εικόνα 59. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους 25°C.

Στις θραυστογραφίες του δοκιμίου που εφελκυστήκε στους 25°C παρατηρείται γενικά μια όλκιμη θραύση με μεγάλο αριθμό από κοιλώματα (dimples) μικρού μεγέθους και βαθειά (εικόνες 56-59). Υπάρχουν σημεία στα οποία τα κοιλώματα είναι πιο ρηχά και λιγότερα όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 59 από τον κόκκινο κύκλο. Επίσης παρατηρούνται και ψαθυρές περιοχές οι οποίες υποδεικνύονται από τους μαύρους κύκλους στις εικόνες 58 και 59. Η μικροδομή του δοκιμίου στους 25°C ήταν οστενιτική με αρκετούς διδύμους παραμόρφωσης μέσα στους κόκκους και διδύμους ανόπτησης. Οπότε οι ψαθυρές περιοχές που εμφανίζονται στις θραυστογραφίες είναι ο δ-φερρίτης που περιέχει το υλικό και επιβεβαιώνεται με την στοιχειακή ανάλυση του EDS που έγινε στα σημεία που υποδεικνύουν οι μαύροι κύκλοι στις εικόνες 58 και 59. Η στοιχειακή ανάλυση (μαύροι κύκλοι) ήταν η εξής:

Element	Weight%	Atomic%
Ti K	0.59	0.68
Cr K	21.63	22.91
Mn K	1.50	1.50
Fe K	69.88	68.90
Ni K	6.39	6.00

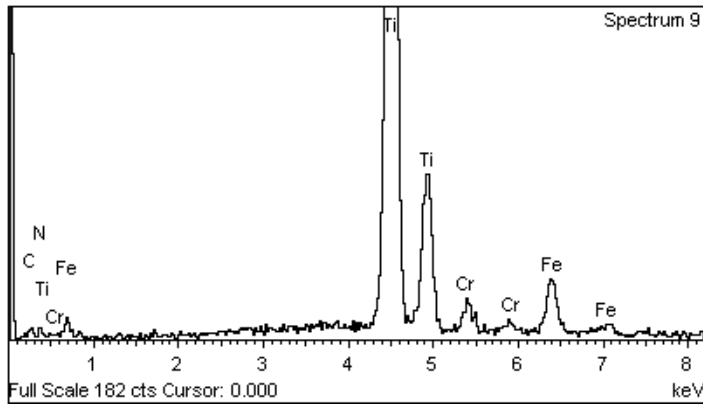
Totals	100.00
--------	--------



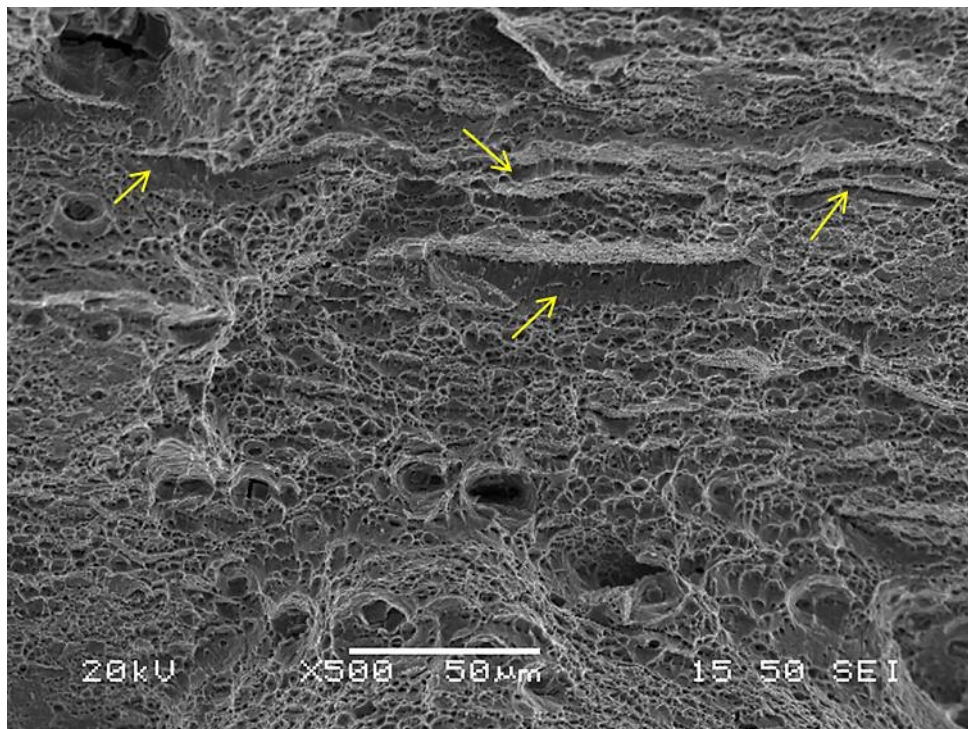
Από την στοιχειακή ανάλυση παρατηρείται ότι οι ψαθυρές περιοχές έχουν αυξημένο ποσοστό σε χρώμιο(23%) και μειωμένο σε νικέλιο(6%) σε σχέση με στοιχειακές αναλύσεις που έγιναν στα κοιλώματα (dimples). Κατά την διάρκεια της θραύσης, τα 'stringers' του δ-φερρίτη σχίζονται(cleaved) με τον συνήθη τρόπο κατά μήκος των επιπέδων {100}. Όταν η θραύση φτάσει στα όρια των κόκκων του δ-φερρίτη, αλλάζει από ψαθυρή σε όλκιμη όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες(dimples), λόγω ύπαρξης ωστενιτικών κόκκων. Τα μεγάλα κενά ή αποκόμματα στις παραπάνω θραυστογραφίες τα οποία υποδεικνύονται από τα κόκκινα βέλη(εικόνα 57) είναι λόγω της αποκόλλησης των καρβονιτριδίων του τιτανίου και εμφανίζονται σε όλες τις θραυστογραφίες του εξεταζόμενου υλικού.

Η στοιχειακή ανάλυση EDS που έγινε για την εικόνα 57 και συγκεκριμένα για τα σημεία που υποδεικνύουν τα κόκκινα βέλη επιβεβαιώνει την ύπαρξη καρβονιτριδίων του τιτανίου ή νιτριδίων του τιτανίου TiN και ήταν η εξής:

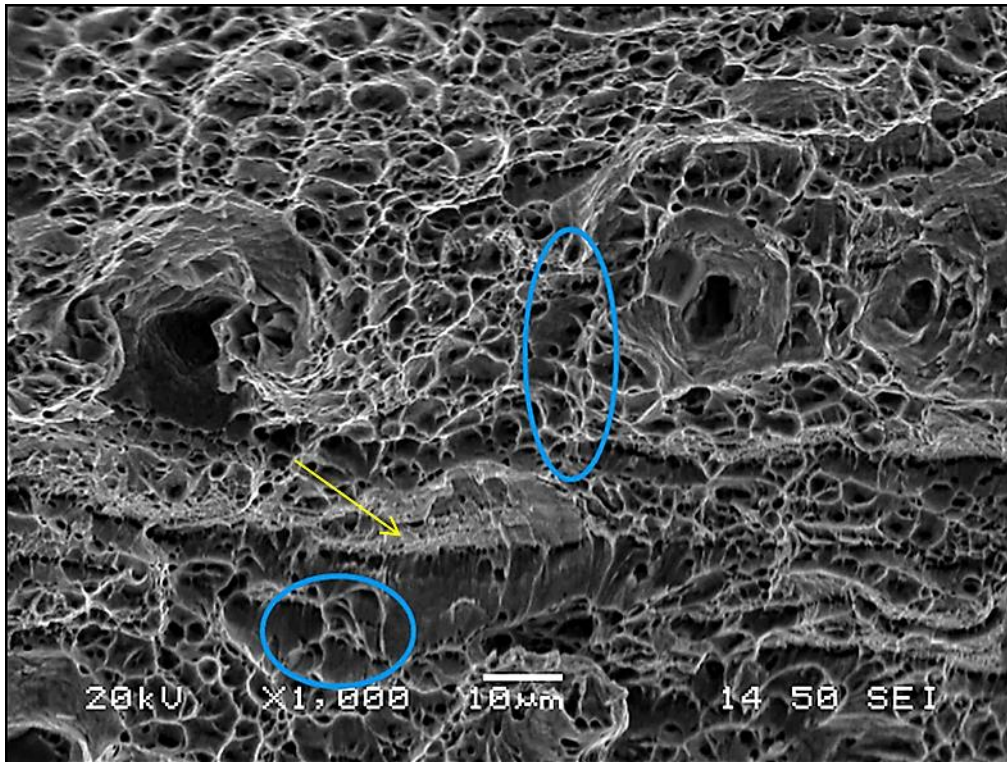
Element	Weight%	Atomic%
C K	1.40	5.25
N K	1.58	5.06
Ti K	85.67	80.36
Cr K	3.22	2.78
Fe K	8.13	6.54
Totals	100.00	



Δοκίμιο που εφελκύστηκε στους -50°C



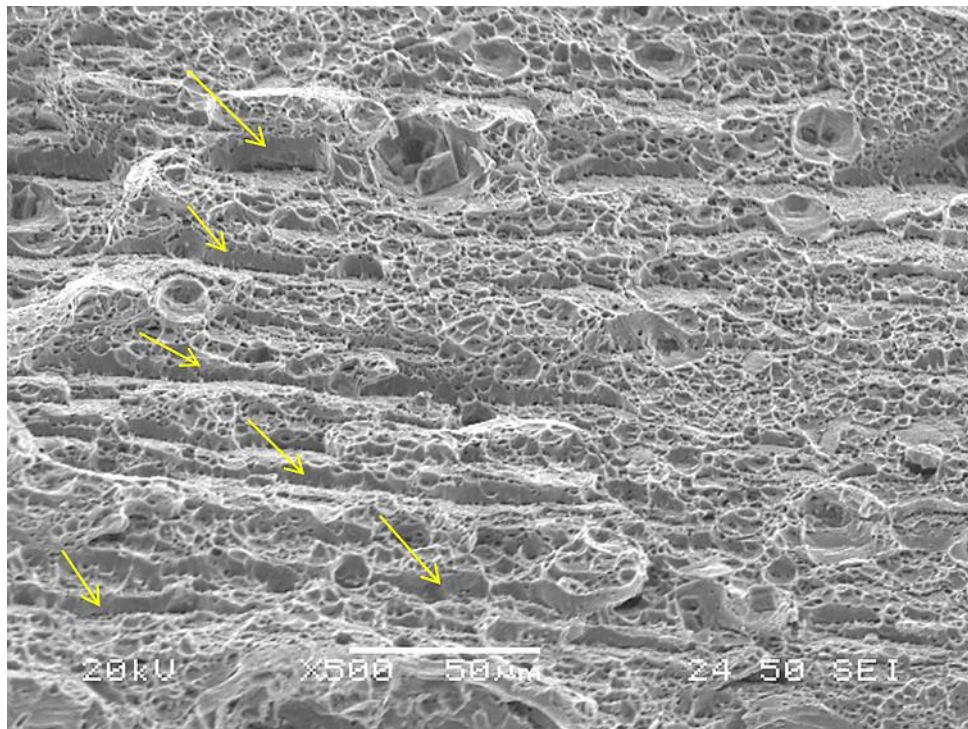
Εικόνα 60. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους -50°C .



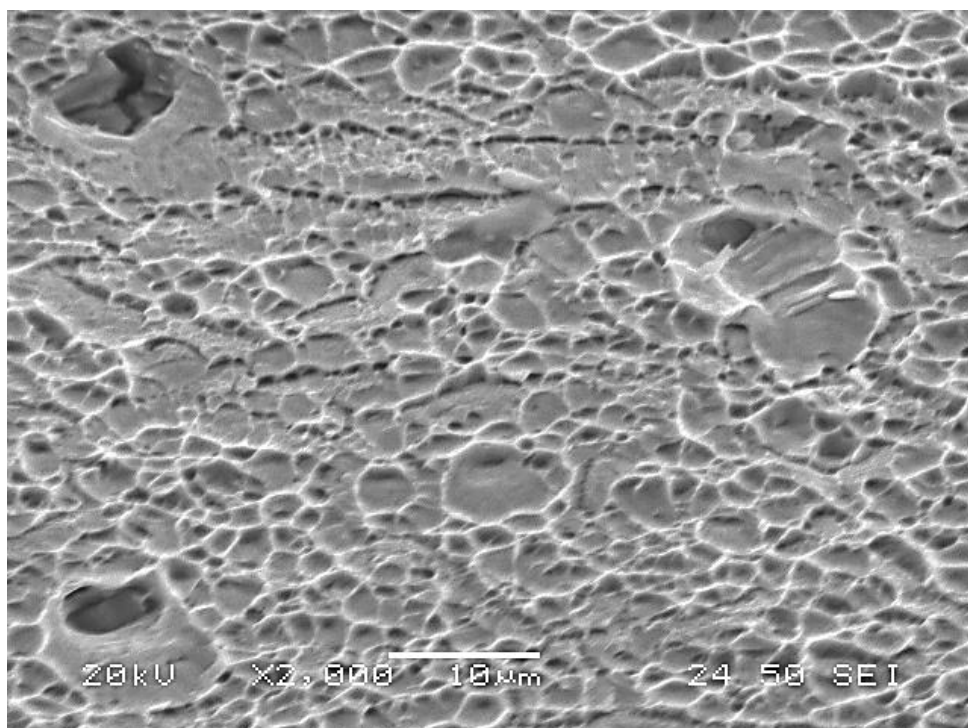
Εικόνα 61. Θραυστογραφία SEM x1000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστήκε στους -50°C .

Στις θραυστογραφίες του δοκιμίου που εφελκυστήκε στους -50°C παρατηρείται όλκιμη θραύση με μεγαλύτερα σε μέγεθος κοιλώματα (dimples) και πιο ρηγά (εικόνα 60 και 61). Πολλά από αυτά τα κοιλώματα είναι επιμηκυμένα (elongated) και αποτελούν τις υψηλά παραμορφωμένες ζώνες του υλικού και υποδεικνύονται από τους μπλέ κύκλους στην εικόνα 61. Επίσης στην εικόνα 61, παρατηρούνται περιοχές απαλλαγμένες από κοιλώματα ή εμφανίζουν λιγότερα κοιλώματα, οι οποίες υποδεικνύονται από κίτρινα βέλη. Οι περιοχές αυτές έχουν όψη θραύσης σχισμού (cleavage). Επειδή οι κόκκοι μεταξύ τους έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς, η ρωγή γενικά διαχωρίζεται σε σκαλοπάτια, όταν διασχίζει ένα όριο κόκκου. Το συγκεκριμένο δοκίμιο που εφελκυστήκε στους -50°C , εμφάνισε κάποιες περιοχές α' μαρτενσίτη στη μικροδομή του όπως και ζώνες παραμόρφωσης (εμαρτενσίτης, δίδυμοι παραμόρφωσης) σε αρκετούς κόκκους. Άρα οι περιοχές που έχουν όψη θραύσης σχισμού (ψαθυρή θραύση), αποτελούν περιοχές α' μαρτενσίτη ή εμαρτενσίτη. Η ρωγή ξεκινάει και σταματάει στις διεπιφάνειες μαρτενσίτη/οστενίτη.

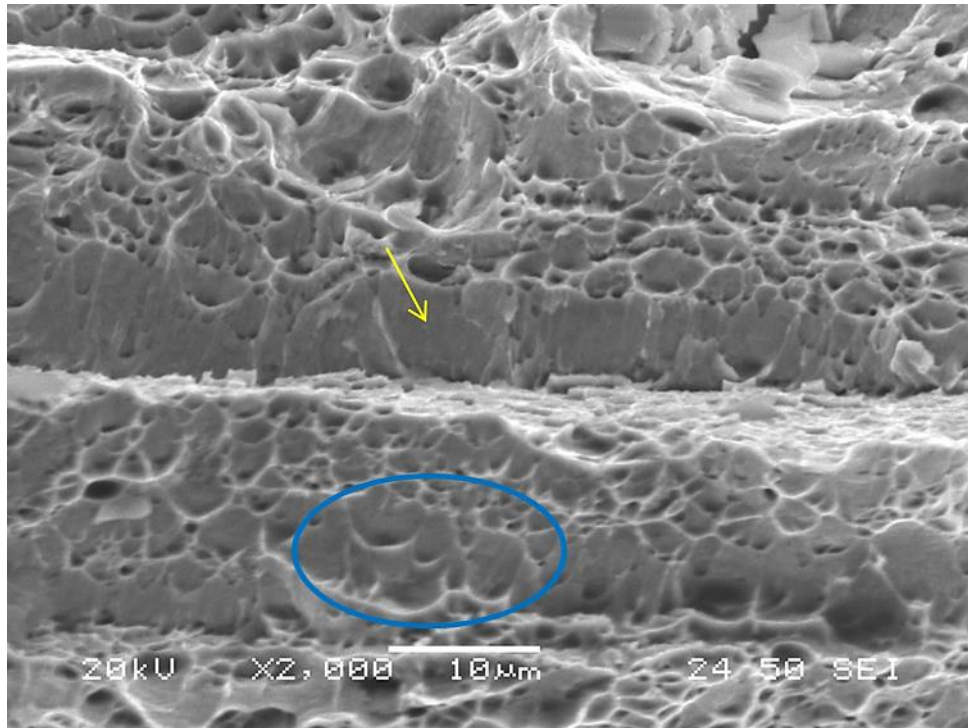
Δοκίμιο που εφελκώστηκε στους -190°C



Εικόνα 62. Θραυστογραφία SEM x500 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκώστηκε στους -190°C.



Εικόνα 63. Θραυστογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκώστηκε στους -190°C.



Εικόνα 64. Θραυστογραφία SEM x2000 δείγματος δοκιμίου 321 που εφελκυστηκε στους -190°C .

Στις θραυστογραφίες του δοκιμίου που εφελκυστηκε στους -190°C παρατηρείται όλκιμη θραύση με μεγαλύτερα και ρηχότερα κοιλώματα (dimples) (εικόνες 62-64) σε σχέση με τις θραυστογραφίες των δοκιμίων στους 25°C και -50°C . Επίσης παρατηρούνται περισσότερα σκαλοπάτια σε σχέση με το δοκίμιο των -50°C , τα οποία υποδεικνύονται από τα κίτρινα βέλη (εικόνες 62 και 64). Ο λόγος που εμφανίζει περισσότερες περιοχές απαλλαγμένες από κοιλώματα ή περιοχές με λιγότερα κοιλώματα, δηλαδή περιοχές που έχουν όψη θραύσης σχισμού, είναι η αύξηση στην ποσότητα του α' και ϵ μαρτενσίτη (εικόνες 62 και 64). Η μικροδομή του δοκιμίου που εφελκυστηκε στους -190°C εμφάνισε μεγαλύτερη ποσότητα μαρτενσίτη α' και ϵ σε σχέση με την μικροδομή του δοκιμίου που εφελκυστηκε στους -50°C . Στην εικόνα 64 παρατηρούνται και επιμηκυμένα κοιλώματα τα οποία υποδεικνύονται με τον μπλε κύκλο. Τα επιμηκυμένα κοιλώματα εμφανίζονται κυρίως στις περιοχές που έχουν όψη θραύσης σχισμού.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία , έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε κρυογενικές θερμοκρασίες και σε θερμοκρασία δωματίου στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα AISI 321 με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες και στην μικροδομή του. Με την μείωση της θερμοκρασίας δοκιμής:

- Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή αυξήθηκε σημαντικά, το συμβατικό όριο διαρροής 0,2% αυξήθηκε ελαφρώς και η ολκιμότητα μειώθηκε.
- Η αναλογία ενδοτράχυνσης και η δυσθραυστότητα(εφελκυσμού) αυξήθηκε σημαντικά, κυρίως λόγω της τεράστιας αύξησης στην μέγιστη εφελκυστική αντοχή
- Η ποσότητα του α' μαρτενσίτη αυξήθηκε, καθώς και η ποσότητα του ϵ μαρτενσίτη και των διδύμων παραμόρφωσης.
- Τα κοιλώματα(dimples) έγιναν ρηχότερα και μεγαλύτερα σε μέγεθος, δηλαδή ο 321 έγινε λιγότερο όλκιμος, το οποίο δικαιολογείται και από την μείωση της ολκιμότητας
- Οι περιοχές απαλλαγμένες από κοιλώματα(dimples) , δηλαδή οι περιοχές που έχουν όψη θραύσης σχισμού αυξήθηκαν, το οποίο οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας α' και ϵ μαρτενσίτη.
- Η ενέργεια σφαλμάτων συσσώρευσης (SFE) μειώθηκε, δηλαδή ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ έκανε πιο αισθητή την παρουσία του στις μικροδομές.

Συμπερασματικά:

1. Οι δίδυμοι παραμόρφωσης , ο ϵ μαρτενσίτης και ο α' μαρτενσίτης ήταν υπεύθυνοι για την τεράστια αύξηση στην μέγιστη εφελκυστική αντοχή , στην δυσθραυστότητα και στην αναλογία ενδοτράχυνσης του ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 321, αλλά την μεγαλύτερη επίδραση την είχε ο μαρτενσίτης α' . Επίσης ο α' μαρτενσίτης είχε και την μεγαλύτερη επίδραση στην μείωση της ολκιμότητας.
2. Οι μηχανισμοί μαρτενσιτικού μετασχηματισμού $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ και $\gamma \rightarrow \text{twinning} \rightarrow \alpha'$ φαίνεται να κυριαρχούν στις μικροδομές των δοκιμίων ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 321 που εφελκύστηκαν στις κρυογενικές θερμοκρασίες των -50°C και -190°C , ενώ αντίθετα στην μικροδομή των δοκιμίων ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 321 που εφελκύστηκαν στους 25°C υπεύθυνοι μηχανισμοί είναι αυτοί της ανάπτυξης διδυμίων και της ολίσθησης διαταραχών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. http://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel_St-St-Introduction_61.ashx
- [2]. <http://www.christoforidis.gr/pdf/STAINLESS-STEEL-GR.pdf>
- [3]. ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ-ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ-ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ
- [4]. ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ, ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
- [5].
<https://www.bssa.org.uk/cms/File/Euro%20Inox%20Publications/Alloying%20Elements.pdf>
- [6]. http://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-Alloying-Elements-in-Stainless-Steel_98.ashx
- [7]. ASM Metals HandBook Volume 03 - Alloy Phase Diagrams
- [8]. http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Stainless_steels/stainless.html
- [9]. W. M. Garrison Jr. Martensitic Stainless Steels, encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001, Pages 8804-8810
- [10]. Lovejoy P T 1977 Structure and constitution of wrought martensitic stainless steels. In: Peckner D, Bernstein I M(eds.) Handbook of Stainless Steels. McGraw-Hill, New York, Chap.
- [11]. CHAPTER 12-STAINLESS STEELS-BHADESIA
- [12]. <http://article.sapub.org/10.5923.j.mechanics.20120206.03.html>
- [13]. Singh, R. (2016). Stainless Steels. Applied Welding Engineering, 83–90.
- [14]. ASM Metals Handbook Volume 09 - Metallography And Microstructures 2004
- [15]. Austenitic Stainless Steels - T Michler, Adam Opel AG, Ruesselsheim , Germany - 2016 Elsevier Inc. All rights reserved.
- [16]. Angel., T.,1954. J. Iron Steel Inst London 177, 165–174.
- [17]. DE Amar K, John G, Matlock David K, Murdock David C, Mataya Martin C, Comstock Jr Robert J. Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel. Metall Trans A 2006;37A:1875–86.
- [18]. H. Fujita, S. Ueda. Stacking faults and f.c.c. (γ) \rightarrow h.c.p. (ϵ) transformation in 188-type stainless steel, Acta Metall. 20 (1972) 759–767.

- [19]. Yichong Zhang, Moucheng Li, Hongyun Bi, Jiaqing Gu, Dexiang Chen, E Chang and Wei Zhang, Martensite transformation behavior and mechanical properties of cold-rolled metastable Cr-Mn-Ni-N austenitic stainless steels, Materials Science & Engineering A
- [20]. Investigation of Martensite Transformation in 316L Stainless Steel - Shu Yan Zhanga*, Etienne Compagnonb, Baptiste Godinb and Alexander M. Korsunskyc
- [21]. Chengsi Zheng and Wangwei Yu, Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel, Materials Science & Engineering A,
- [22].
https://www.google.com/search?q=HCP+Crystal+Structure&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiFmdOs1bHfAhVS3aQKHcfuBIOQ_AUIDigB&biw=1366&bih=626#imgsrc=24xC59TA4FCs-M:
- [23]. A low-temperature study to examine the role of e-martensite during strain-induced transformations in metastable austenitic stainless steels K. Datta a,*, R. Delhez b, P.M. Bronsveld c, J. Beyer b, H.J.M. Geijselaers b, J. Post d,*
- [24]. <https://www.bhansalioverseas.com/stainless-steel-321-321h-pipes-tubes-supplier-exporter.html>
- [25]. http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_amme03/1240.pdf
- [26]. Materials for cryogenics applications - E. David Research National Institute for Cryogenics&Isotopic Technologies Rm. Valcea, P.O. Box 10, O.P. No. 4, Code 1000, Romania
- [27]. Austenitic stainless steels at cryogenic temperatures: The compositional dependence of the Ms - H.W. King and D.C. Larbalestier
- [28]. Effect of cryogenic deformation on microstructure and mechanical properties of 304 austenitic stainless steel - P. Mallick , N. K. Tewary , S. K. Ghosh ,* and P. P. Chattopadhyay
- [29]. Strain-rate effects on the mechanical behavior of the AISI 300 series of austenitic stainless steel under cryogenic environments - Woong Sup Park, Seong Won Yoo, Myung Hyun Kim, Jae Myung Lee
- [30]. Cryogenic Steels - J. W. Morris Jr.
- [31]. <https://www.indiamart.com/proddetail/tensile-testing-machine-14120160391.html>
- [32]. <https://www.picswe.com/pics/tensile-test-73.html>
- [33]. ASM Metals Handbook Volume 08 – Mechanical Testing and Evaluation

- [34]. <http://home.ufam.edu.br/berti/nanomaterials/0495296023MaterialsEnginee.pdf>
- [35]. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Toughness.htm>
- [36]. ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ 1 – Γ.Δ. ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
- [37]. ASM Metals HandBook Volume 12 – Fractography
- [38]. Lange G A (ed.) 1986 Systematic Analysis of Technical Failures. - Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Frankfurt, Germany
- [39]. Verein Deutscher Eisenhüttenleute 1996 - The Appearance of Cracks and Fractures in Metallic Materials - Verlag Stahleisen, Dusseldorf, Germany
- [40]. Metallurgical Failure Analysis-Techniques and Case Studies - Chapter Two – Fracture - Kannadi Palankeezhe Balan
- [41]. Fractography of Metals and Plastics - Ronald J. Parrington IMR Test Labs, 131 Woodsedge Drive, Lansing, NY 14882, USA
- [42]. <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwj4tLfAncfkAhUJ2aQKHZRTBCIQjRx6BAGBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.scoyapharmatech.in%2Fstainless-steel-storage-tanks.html&psig=AOvVaw2anLiuvsJxfI5VErAyUyUS&ust=1568238396105887>
- [43]. <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials#strain-hardening>
- [44]. Microstructural investigation on strengthening mechanisms of AISI 304L austenitic stainless steel during cryogenic deformation-P. Behjati*, A. Najafizadeh and A. Kermanpur , (December 2010)
- [45]. Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel-Y.F. Shen,a,b, X.X. Li a, X. Sunb,Y.D. Wang, L. Zuoa, (May 2012)
- [46]. Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel - Arpan Dasa,*, S. Sivaprasad , M. Ghosha, P.C. Chakraborti , S. Tarafder , (September 2007)
- [47]. The Investigation of Strain-Induced Martensite Reverse Transformation in AISI 304 Austenitic Stainless Steel - G. CIOS, T. TOKARSKI, A. Z_ YWCZAK, R. DZIURKA, M. STE_ PIEN' , Ł. GONDEK, M. MARCISZKO, B. PAWIOWSKI, K. WIECZERZAK, and P. BAłA , (July 2017)
- [48]. Martensite transformation behavior and mechanical properties of cold-rolled metastable Cr-Mn-Ni-N austenitic stainless steels - Yichong Zhang, Moucheng Li, Hongyun Bi, Jiaqing Gu, Dexiang Chen, E Chang, Wei Zhang , (March 2018)

- [49]. Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels - T.S. Byun *, N. Hashimoto, K. Farrell
- [50]. A low-temperature study to examine the role of e-martensite during strain-induced transformations in metastable austenitic stainless steels K. Datta a,*, R. Delhez b, P.M. Bronsveld c, J. Beyer b, H.J.M. Geijselaers b, J. Post d,*
- [51]. R. F. Egerton, 2005, Physical Principles of Electron Microscopy - An Introduction to TEM, SEM, and AEM, Springer.
- [52]. Γ. Δ. Χρυσουλάκης και Δ. Ι. Παντελής, 2008, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- [53]. G. F. Vander Voort, 1998, Ed., ASM Handbook - Volume 9: Metallography and Microstructure, ASM International.
- [54]. E. I. Galindo-Nava, P. E. J. Rivera-Díaz-del-Castillo, Understanding martensite and twin formation in austenitic steels: A model describing TRIP and TWIP effects, Acta Mater. 128 (2017) 120-134.