



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ HSLA ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ  
ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΒΑΝΑΔΙΟΥ**

**ΣΑΒΒΑΣ ΛΑΖΑΡΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γ. Φούρλαρης**

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2016





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ ΗSLA ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ  
ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΚΑΙ ΒΑΝΑΔΙΟΥ**

**ΣΑΒΒΑΣ ΛΑΖΑΡΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Τριμελής Επιτροπή:**

- 1. Γ. Φούρλαρης (Επιβλέπων)**
- 2. Ε. Χριστοφόρου**
- 3. Σ. Παπαευθυμίου**

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2016



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	12
ABSTRACT.....	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	16
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	17
3.1 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών και δοκιμές ελέγχου.....	17
3.1.1 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών.....	17
3.1.2 Ολκιμότητα και συσθραυστότητα.....	18
3.1.3 Σκληρότητα μετάλλων.....	19
3.2 Γενικά στοιχεία χαλύβων.....	24
3.3 Ταξινόμηση χαλύβων.....	25
3.4 Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους χάλυβες.....	26
3.5 Χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας.....	30
3.5.1 Χάλυβες χαμηλής αντοχής (Low Strength Steels).....	31
3.5.2 Συμβατικοί χάλυβες υψηλής αντοχής (Conventional High Strength Steels).....	32
3.5.2.1 Μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (HSLA).....	34
3.5.3 Προηγμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (Advanced High Strength Steels).....	45
3.5.4 Χάλυβες υψηλότερης αντοχής (Higher Strength Steels).....	47
3.6 Θερμικές κατεργασίες διαμόρφωση των μετάλλων – θερμή έλαση.....	48
3.6.1 Χάλυβες θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.....	50
3.7 Μηχανισμοί σκλήρυνσης χαλύβων.....	52

3.7.1	Σκλήρυνση με επίδραση του μεγέθους των κόκκων .....	53
3.7.2	Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος .....	54
3.7.3	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση .....	57
3.7.4	Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση .....	59
3.7.5	Σκλήρυνση με επίδραση μετασχηματισμών φάσεων .....	60
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	61
4.1	Περιγραφή υλικού .....	61
4.2	Προετοιμασία δοκιμίων .....	62
4.2.1	Θερμικές κατεργασίες – Θερμή έλαση .....	62
4.2.2	Ονομασία δοκιμίων .....	63
4.2.3	Εγκιβωτισμός .....	64
4.2.4	Λείανση .....	64
4.2.5	Στίλβωση .....	65
4.2.6	Χημική προσβολή .....	66
4.3	Μέθοδοι εξέτασης της μικροδομής .....	68
4.3.1	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM) .....	68
4.4	Μέθοδοι μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων .....	70
4.4.1	Δοκιμές σκληρότητας .....	70
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	72
5.1	Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων .....	72
5.2	Μελέτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) .....	75
5.2.1	Δοκίμια με προσθήκη Ti (ομάδα Α) .....	76
5.2.2	Δοκίμια με προσθήκη Ti και V (ομάδα Β) .....	86
6.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	97
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	100
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	101

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Γεώργιο. Φούρλαρη, Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, για τις υποδείξεις και την καθοριστική συμβολή του σε οποιοδήποτε ζήτημα προέκυψε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ για τον χρόνο που διέθεσε και την προθυμία του για την απάντηση των αποριών μου.

Ευχαριστώ θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες Σταύρο Δεληγιάννη, Βίκη Οικονόμου και Μαρία Γεωργίου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν σε πρακτικά ζητήματα και απορίες και για το ενδιαφέρον τους για όποιο άλλο πρόβλημα ανέκυψε κατά καιρούς, στα διάφορα κρίσιμα στάδια για την εκπόνηση της εργασίας

Ευχαριστώ τον Δρ. Πέτρο Τσακίριδη για την γενικότερη βοήθεια στην διεξαγωγή αποτελεσμάτων, τον υπεύθυνο του εργαστηρίου Ιωάννη Χαρλαμπίτα για την βοήθειά του σε διάφορα ζητήματα που προέκυψαν εντός του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας αλλά και για την καθοδήγηση του σε διάφορα λειτουργικά θέματα.

Ευχαριστώ όλο το υπόλοιπο προσωπικό του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας για την διακριτική τους παρουσία και συνδρομή τους στην αρμονική λειτουργία του εργαστηρίου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλα τα φιλικά μου πρόσωπα για την ηθική τους υποστήριξη.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.....	18
Εικόνα 2: Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όλκιμου και ψαθυρού υλικού. ....	19
Εικόνα 3: Η επίδραση των μικροκραματικών στοιχείων Nb, Ti, V στο μέγεθος κόκκου του φερρίτη, μετά από θερμή έλαση.....	29
Εικόνα 4: Σημεία του αμαξώματος που χρησιμοποιούνται χάλυβες διαφόρων κατηγοριών αλλά και άλλα υλικά.....	30
Εικόνα 5: κατηγορίες χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας.....	31
Εικόνα 6: Η επίδραση του ρυθμού απόψυξης στην ενίσχυση της μηχανικής αντοχής, μέσω σκλήρυνσης με κατακρήμνιση, σε χάλυβα 0,15% σε V. ....	39
Εικόνα 7: Η εκτράχυνση των κόκκων του ωστενίτη, κατά τη διάρκεια αναθέρμανσης και μετά από θερμή έλαση, σε χρόνο παραμονής 30min. Η περιεκτικότητα σε τιτάνιο είναι μεταξύ 0,008 – 0,022 %. ....	42
Εικόνα 8: Η ενίσχυση μέσω κατακρήμνισης σε σχέση με το μέσο όρο, του μεγέθους και του κλάσματος όγκου των κατακρημνισμάτων, σύμφωνα με τη θεωρία και πειραματικές παρατηρήσεις για δεδομένες μικροκραματικές προσθήκες.....	43
Εικόνα 9: Η επίδραση των καρβιδίων νιόβιου στο όριο διαρροής, για διάφορα μεγέθη καρβιδίων νιόβιου.....	44
Εικόνα 10: Απεικόνιση συμπεριφοράς της μικροδομής χάλυβα κατά την θερμή έλαση.....	49
Εικόνα 11: παραγωγή τελικών προϊόντων με θερμή έλαση .....	49
Εικόνα 12: Θερμή έλαση μπιγιέτας για παραγωγή χαλύβων. ....	50
Εικόνα 13: Παράγοντες αύξησης αντοχής σε χάλυβες θερμής έλασης.....	52
Εικόνα 14: Παράδειγμα γραμμή διαταραχής ακμής.....	55
Εικόνα 15: Παράδειγμα στερεού διαλύματος παρεμβολής.....	56
Εικόνα 16: Παράδειγμα στερεού διαλύματος αντικατάστασης μεγαλύτερο από τα άτομα του διαλύτη .....	57
Εικόνα 17: Κίνηση διαταραχής γύρω από ευμεγέθη κατακρημνίσματα .....	58
Εικόνα 18: Θερμικός κύκλος των δοκιμών χάλυβα HSLA .....	63
Εικόνα 19: Όργανο λείανσης και στίλβωσης της εταιρίας Struers.....	66
Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.....	68



Εικόνα 21: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). .....	70
Εικόνα 22: Απεικόνιση της διαδικασίας σκληρομέτρησης, με την μέθοδο Vickers. ...	71
Εικόνα 23: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας όλων των δοκιμίων.....	73
Εικόνα 24: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας για τα δοκίμια της ομάδας Α σε σχέση με τις θερμοκρασίες απόψυξης μετά την έλαση. ....	74
Εικόνα 25: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας για τα δοκίμια της ομάδας Β σε σχέση με τις θερμοκρασίες απόψυξης μετά την έλαση. ....	75
Εικόνα 26: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x500. ....	77
Εικόνα 27: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x1000. ....	77
Εικόνα 28: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x1000.....	78
Εικόνα 29: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου K5.....	78
Εικόνα 30: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x500.....	79
Εικόνα 31: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x1000.....	80
Εικόνα 32: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x1000. ....	80
Εικόνα 33: Μικροανάλυση (EDS) του συνόλου της δομής του δοκιμίου J6. ....	81
Εικόνα 34: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x500. ....	82
Εικόνα 35: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x1000. ....	82
Εικόνα 36: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x1000. ....	83
Εικόνα 37: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου P5. ....	83
Εικόνα 38: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x1000. ....	84
Εικόνα 39: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x1000.....	85
Εικόνα 40: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x2000. ....	85

Εικόνα 42: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x500. ....	87
Εικόνα 43: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x1000. ....	87
Εικόνα 44: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x1000.....	88
Εικόνα 45: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q3.....	88
Εικόνα 46: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x1000.....	89
Εικόνα 47: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x1000. ....	90
Εικόνα 48: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x2000. ....	90
Εικόνα 49: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου M4.....	91
Εικόνα 50: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x500. ....	92
Εικόνα 51: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x1000. ....	92
Εικόνα 52: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x1000.....	93
Εικόνα 53: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q4.....	93
Εικόνα 54: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x500.....	94
Εικόνα 55: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x1000.....	95
Εικόνα 56: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x1000. ....	95
Εικόνα 57: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου E5 .....	96

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας διαφόρων υλικών στις τρεις κλίμακες.....	23
Πίνακας 2: Ο ρόλος των μικροκραματικών στοιχείων (V, Nb, Ti) στον χάλυβα. ....	29
Πίνακας 3: Χημική σύσταση υλικού. ....	61
Πίνακας 4: Χημικές προσβολές δοκιμίων με Nital και Marshall's Reagent. ....	67
Πίνακας 5: Μέσος όρος σκληρότητας και τυπικής απόκλισης όλων των δοκιμίων. ..	72
Πίνακας 6: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου K5.....	78
Πίνακας 7: Μικροανάλυση (EDS) του συνόλου της δομής του δοκιμίου J6. ....	81
Πίνακας 8: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου P5. ....	83
Πίνακας 9: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου A5.....	86
Πίνακας 10: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q3 .....	88
Πίνακας 11: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου M4.....	91
Πίνακας 12: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q4. ....	93
Πίνακας 13: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου E5.....	96

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συσχέτιση της μικροδομής με τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων θερμής έλασης HSLA με στοιχεία κραμάτωσης Ti και V. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται θερμικές κατεργασίες σε χάλυβα HSLA, με στόχο την βέλτιστη απόδοση του υλικού σε σχέση με την σκληρότητα του.

Σε οκτώ χαλύβδινα δοκίμια HSLA (τέσσερα με μικροκραματική προσθήκη Ti και τέσσερα με προσθήκη Ti-V), πραγματοποιήθηκε, καταρχήν, θερμή έλαση στους 1100°C και ύστερα στους 800°C. Στην συνέχεια, σε όλα δοκίμια, έγινε ταχεία απόψυξη στις θερμοκρασίες 750°C, 650°C, 550°C και 450°C, και τέλος, αργή απόψυξή τους μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτές οι συνθήκες είχαν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μικροδομής αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων, οι οποίες μετρήθηκαν με δοκιμές σκληρότητας.

Στόχος της μελέτης ήταν, να συγκριθούν οι δοκιμές σκληρότητας που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τις παραπάνω θερμικές κατεργασίες και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα αυτών ώστε, μέσω οπτικής ανάλυσης, να επιχειρηθεί η συσχέτιση της μικρογραφικής του δομής με τη μηχανική του αντοχή.

Για την μέτρηση της μηχανικής αντοχής έγιναν δοκιμές σκληρότητας Vickers σε φορτίο 98 N. Για την μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων έγινε χρήση οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM).

Οι παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν είναι σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε αντίστοιχους χάλυβες στο παρελθόν. Η μικρή κραματική προσθήκη τιτανίου και βαναδίου έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του ορίου διαρροής και συνεπώς της σκληρότητας του υλικού, μέσω του μηχανισμού σκλήρυνσης με κατακρήμνιση που πραγματοποιείται κατά την θερμή έλαση των δοκιμίων. Κατά την διάρκεια της θερμής έλαση, πραγματοποιείται επίσης εκκρόνιση των κόκκων του υλικού από τον μετασχηματισμό του ωστενίτη, η οποία συνεισφέρει στην αύξηση του ορίου διαρροής. Ο συνδυασμός της κατακρήμνισης του βαναδίου και του τιτανίου με την ελεγχόμενη διαδικασία θερμής έλασης έχει σαν αποτέλεσμα

το υψηλό όριο διαρροής, ενώ παράλληλα υπάρχει σταδιακή μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα.

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is the correlation between the microstructure and the mechanical properties of hot rolled HSLA steel (High-strength low-alloy) with alloying elements Ti and V. In particular, the HSLA steel is heat treated in order to acquire optimal in relation to its hardness.

Eight HSLA steel samples (four with Ti-only addition and four with Ti-V addition), were hot rolled, firstly, at 1100°C and then at 800°C. After the second hot rolling procedure, all the samples were rapidly cooled, with compressed air, to 750°C, 650°C, 550°C και 450°C and afterwards they were slowly cooled to room temperature. These conditions resulted in the change of microstructure and mechanical properties, as measured by hardness testing and microscopy analysis.

This thesis compares the results of the hardness test in relation to heat treatment and through visual analysis, attempts the correlation between the micrographic structure and the mechanical strength.

For the measurement of the steel's mechanical strength, a series of Vickers hardness tests were carried out. The load that was applied was 98 N. In order to study the samples' microstructure, an optical microscope and a Scanning Electron Microscope – SEM were used.

The results are consistent with similar studies that have been carried out in the past. Adding Ti or V as an alloying element, increases the yield point and furthermore the hardness of the material through the precipitation hardening. During the heat treatment, there is also grain refinement from the transformation of austenite, which helps to increase the yield point. The combination of precipitation hardening by titanium and vanadium with controlled hot rolling, results in a high yield point, while there is gradual reduction in the carbon content

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υλικό το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης – υψηλής αντοχής (HSLA) με προσθήκη βαναδίου και τιτανίου, χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ( $C < 0,0011\%κ.β.$ ), το οποίο παράγεται με θερμή έλασης και χρησιμοποιείται κυρίως για την αυτοκινητοβιομηχανία.

Η ομάδα των Μικροκραματωμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (HSLA) ανήκουν στην κατηγορία των χάλυβων που ισχυροποιούνται κυρίως από τα στοιχεία μικροκραμάτωσης, τα οποία συμβάλλουν στην κατακρήμνιση των καρβιδίων και νιτριδίων καθώς και στην εκλέπτυνση του μεγέθους του κόκκου[15]. Εμφανίζουν πολύ καλή συγκολλησιμότητα και μέτρια διαμορφωσιμότητα, ιδιότητες που τις οφείλουν στη χαμηλή περιεκτικότητα σε C ( $0.03-0.15\%κ.β.$ ). Περιέχουν σε μικρές περιεκτικότητες (όχι πάνω από  $0.2\%κ.β.$ ) κραματικά στοιχεία όπως Nb, V και Ti τα οποία σχηματίζουν καρβίδια, νιτρίδια και καρβονιτρίδια. Η παρουσία αυτών των κατακρημνισμάτων εμποδίζει την ανακρυστάλλωση του ωστενίτη κατά την θερμή έλαση με αποτέλεσμα την διατήρηση μικρού μεγέθους κόκκου φερρίτη κατά την απόψυξη. Δηλαδή η αντοχή του χάλυβα αυξάνει χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό σκλήρωσης με εκλέπτυνση κόκκων [30].

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, διερευνάται η συσχέτιση της μηχανικής αντοχής του χάλυβα HSLA (high strength – low alloy) με την μικρογραφική του δομή, καθώς επίσης και η επίδραση των κραματικών στοιχείων στην μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες.

## 2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι επιδιωκόμενοι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

1. Ο πλήρης χαρακτηρισμός της μικροδομής όλων των δοκιμίων με τη χρήση των τεχνικών της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (Scanning Electron Microscope) και την τεχνική της σκληρομέτρησης (HV) για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων.
2. Να μελετηθεί η επίδραση των θερμικών κατεργασιών στην μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα HSLA (high strength – low alloy)
3. Να μελετηθεί η επίδραση των κραματικών στοιχείων Ti, V στον χάλυβα HSLA, με σκοπό τη συσχέτιση της μικροδομής του, με τις μηχανικές του ιδιότητες.



### **3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

#### **3.1 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών και δοκιμές ελέγχου**

##### **3.1.1 Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών**

Η ποιότητα των μεταλλικών υλικών εξαρτάται από τις φυσικές τους ιδιότητες και ιδιαίτερα από αυτές που σχετίζονται με τη συμπεριφορά τους στην άσκηση κάποιας τάσης.

Ορίζεται ως μέτρο της ποιότητας ενός μεταλλικού υλικού, η ικανότητα του να λειτουργεί με ένα συγκεκριμένο τρόπο, κάτω από διάφορα είδη επιβαλλόμενων τάσεων. Οι παραμορφώσεις είναι οι αποκρίσεις των υλικών στις τάσεις [10].

##### **Τάση (stress) και παραμόρφωση (strain)**

Η δοκιμή του μόνο - αξονικού εφελκυσμού, μέσω του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων, μας δίνει τη δυνατότητα για τον υπολογισμό των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Στη δοκιμή αυτή, τα δοκίμια, συνήθως ειδικά διαμορφωμένα με βάση απαιτήσεις Εθνικών και Διεθνών Προδιαγραφών και Κανονισμών, τοποθετούνται σε μηχανές εφελκυσμού και καταπονούνται με αξονικό φορτίο μέχρι το διαχωρισμό τους σε δύο μέρη. Στην πιο απλή περίπτωση, υπάρχει καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου και της αντίστοιχης επιμήκυνσης που προκαλείται στο δοκίμιο.

Συνήθως γίνεται αναγωγή του επιβαλλόμενου φορτίου σε τάση ( $\sigma = P / A$ ), ενώ ταυτόχρονα στον οριζόντιο άξονα σημειώνονται οι ανοιγμένες παραμορφώσεις ( $\epsilon = \Delta L / L_0$ ). Επειδή δεν διαιρούμε με την εκάστοτε μικρότερη διατομή, αλλά με την αρχική, στην πραγματικότητα υπολογίζουμε συμβατικές τάσεις [10].

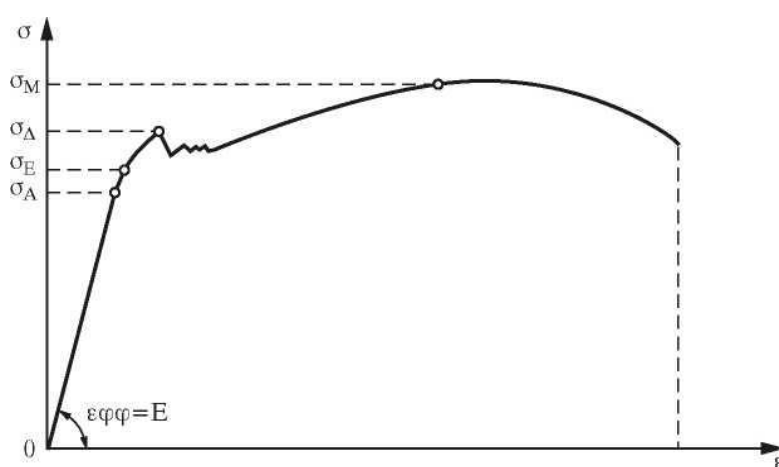
##### **Η καμπύλη τάση – παραμόρφωση**

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων.

Η δοκιμή γίνεται σε μια μηχανή που καταγράφει συνήθως τη δύναμη εφελκυσμού

που ασκείται πάνω στο δοκιμαζόμενο δοκίμιο, καθώς και την επιμήκυνση του δοκιμίου [1].

Τα δοκίμια έχουν συνήθως κυλινδρική ή ορθογωνική διατομή, και τα ακραία τους τμήματα (κεφαλές) κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η σύνθετη καταπόνηση που ασκείται στις περιοχές εκείνες, κατά τη διάρκεια της επιβολής φορτίων στη μηχανή εφελκυσμού, να μετατρέπεται σε απλή εφελκυστική καταπόνηση στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου. Επιβάλλεται, όλες οι μετρήσεις και παρατηρήσεις να πραγματοποιούνται σε αυτή την περιοχή, μακριά από της κεφαλές (που έχουν πιαστεί στις αρπαγές της μηχανής).



Εικόνα 1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων

### 3.1.2 Ολκιμότητα και δυσθραυστότητα

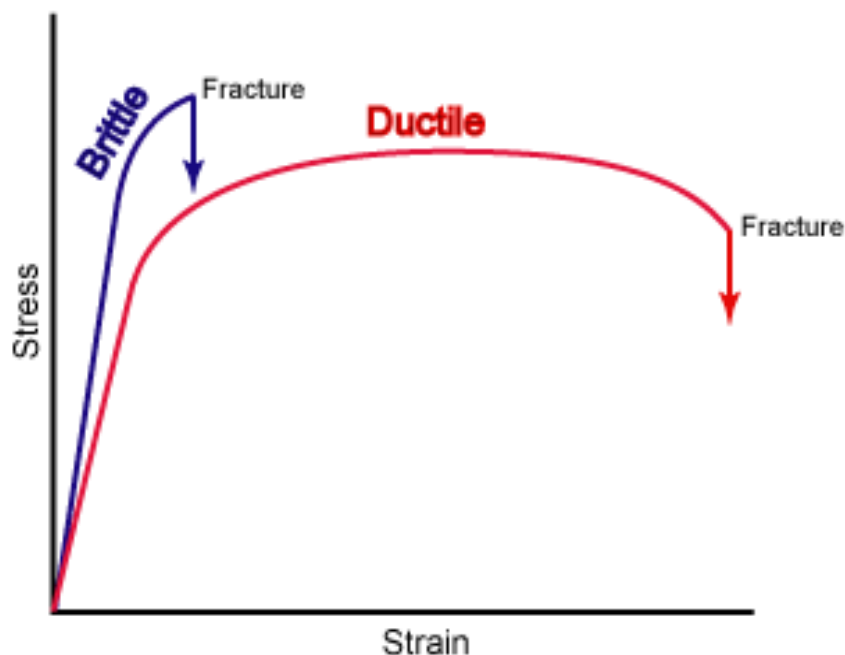
#### Ολκιμότητα και κατηγορίες θραύσης

Ολκιμότητα (ductility) είναι η ικανότητα των υλικών να δέχονται πλαστικές παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους.

Τα υλικά αντιδρούν στα εξωτερικά φορτία αναπτύσσοντας παραμορφώσεις. Ωστόσο, για τα ίδια εξωτερικά φορτία ένα υλικό μπορεί να αναπτύξει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις από ένα άλλο.

Τα υλικά που έχουν την ικανότητα να ανάπτυξης μεγάλων παραμορφώσεων στη πλαστική περιοχή ονομάζονται όλκιμα (ductile), ενώ αυτά που έχουν περιορισμένη

δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης λέγονται ψαθυρά (brittle). Τα όλκιμα υλικά, έχουν αναπτυγμένο κλάδο πλαστικής παραμόρφωσης στο διάγραμμα τάσεων – εφελκυσμού και κατά τη θραύση τους εμφανίζουν το φαινόμενο της δημιουργίας ‘λαιμού’, ενώ τα ψαθυρά υλικά, έχουν κυρίως ελαστική περιοχή που παρουσιάζουν μικρό πλαστικό κλάδο, και δεν εμφανίζουν (τουλάχιστον εμφανής) ‘λαιμός’ [10].



Εικόνα 2: Διάγραμμα πλαστικής παραμόρφωσης όλκιμου και ψαθυρού υλικού.

### 3.1.3 Σκληρότητα μετάλλων

Με βάση την καθημερινή μας εμπειρία, η σκληρότητα είναι μια σύνθετη και αρκετά ακαθόριστη ιδιότητα, που σχετίζεται με τη συνοχή και την αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα στη διείσδυση. Στις φυσικές και εφαρμοσμένες επιστήμες ο όρος ‘σκληρότητα’ αποχτάει νόημα με τον καθορισμό ορισμένων τυποποιημένων δοκιμών [1].

Στην φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού. Η σκληρότητα είναι τόσο

μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείσδυση του σκληρού υλικού αναφοράς [6]. Θα μπορούσε μαθηματικά η σκληρότητα να εκφραστεί ως εξής :

$$H = P/A$$

όπου P η εφαρμοζόμενη δύναμη και A η επιφάνεια του αποτυπώματος

Οι τιμές της σκληρότητας χρησιμοποιούνται σαν κριτήριο για τη σύγκριση των υλικών μεταξύ τους, το σχεδιασμό μηχανικών ιδιοτήτων και θερμικών κατεργασιών τους και τον έλεγχο της ποιότητας τους.

Για χάλυβες θερμής έλασης, με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα το όριο διαρροής  $\sigma_y$ , συνδέεται με τη σκληρότητα H με τη σχέση :

$$H = 3 \cdot \sigma_y$$

Επομένως, μια απλή μέτρηση της σκληρότητας, μας επιτρέπει (σε αυτή την περίπτωση) να εκτιμήσουμε το όριο διαρροής [10].

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι σκληρομέτρησης:

- Brinell
- Vickers
- Rockwell

#### Δοκιμή Brinell

Στην δοκιμή Brinell, ο διεισδυτής είναι σφαίρα από σκληρό χάλυβα ή καρβίδιο, η οποία πιέζεται πάνω στην επιφάνεια στην λειασμένη επιφάνεια που εξετάζουμε με καθορισμένη δύναμη και για καθορισμένο χρόνο μερικών δευτερολέπτων. Στην συνέχεια το εργαλείο διείσδυσης με τη σφαίρα απομακρύνεται, αφήνοντας στην επιφάνεια του αντικειμένου ένα σφαιρικό αποτύπωμα.

Η διάμετρος του αποτυπώματος παρατηρείται με τη βοήθεια μικροσκοπίου ή οπτικής θόνης, εφοδιασμένων με μικρομετρικό σύστημα μέτρησης.

Η σκληρότητα κατά Brinell, εκφράζεται μαθηματικά με τον τύπο:

$$HB = 2P/(\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})/2)$$

όπου P η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kp, D η διάμετρος του διεισδυτή σε mm και d : η διάμετρος του αποτυπώματος σε mm.

Στις κλασικές μηχανές η σφαίρα είχε διάμετρο 10mm και τα φορτία που χρησιμοποιούνταν ήταν 3000 ή 1000 ή 500 kp.

Σήμερα χρησιμοποιούνται σφαίρες με μικρότερες διαμέτρους (5 ή 2,5 mm), που οδηγούν σε μικρότερα φορτία, με αποτέλεσμα σε οικονομικότερες μηχανές μέτρησης σκληρότητας.

Η σφαίρα που χρησιμοποιείται για σκληρότητα μέχρι 450HB είναι από σκληρό βαμμένο χάλυβα, ενώ για μεγαλύτερες σκληρότητες και μέχρι 630HB χρησιμοποιείται σφαίρα από καρβίδιο του βολφραμίου. Για υψηλότερες τιμές σκληρότητας η δοκιμή Brinell πρέπει να αποφεύγεται [1].

#### Δοκιμή Vickers

Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως διεισδυτή πυραμίδα από διαμάντι με τετραγωνική βάση και γωνία κορυφής 136°. Τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από 1kp και φθάνουν μέχρι έως 120kp. Με τη διείσδυση της πυραμίδας, μέσα στο υλικό, δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, το αποτύπωμα που δημιουργείται είναι σχήματος ρόμβου και οφείλεται στη μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού. Η σκληρότητα Vickers εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HV = 1,8544 P/d^2$$

όπου, P η εφαρμοζόμενη δύναμη σε Kp και d ο μέσος όρος των διαγωνίων (=d1+d2)/2 του αποτυπώματος (mm).

Η σκληρότητα Vickers έχει μονάδα μέτρησης kp/mm<sup>2</sup> ή HV (μονάδα σκληρότητας κατά Vickers για κλίμακα από 5 έως 1000 Vickers). Η δοκιμή Vickers δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με τη δοκιμή Brinell. Επομένως, σε χαμηλές σκληρότητες

η αριθμητική τιμή της σκληρότητας Brinell και της σκληρότητας Vickers συμπίπτει, ενώ σε μεγαλύτερες σκληρότητες η σκληρότητα Brinell εκφράζεται με μικρότερους αριθμούς επειδή η σφαίρα παραμορφώνεται ελαφρά. Αυτό δεν συμβαίνει με τη διαμαντένια πυραμίδα της δοκιμής Vickers, η οποία είναι η μόνη που χρησιμοποιείται στα πολύ σκληρά υλικά [1,10].

### Δοκιμή Rockwell

Η δοκιμή αυτή προσδιορίζεται από το βάθος διείσδυσης σφαίρας ή κώνου (και όχι της διαμέτρου) υπό ορισμένες συνθήκες φορτίου και διαβάζεται άμεσα σε βαθμολογημένο μετρητικό όργανο με δείκτη.

Αρχικά, εφαρμόζεται φορτίο 10kp που φέρνει το διεισδυτικό άκρο σε επαφή με την επιφάνεια του μετάλλου, εξουδετερώνοντας τις μικροανωμαλίες, ενώ συγχρόνως ο δείκτης του μετρητικού οργάνου έρχεται στην θέση μηδέν. Στην συνέχεια προστίθεται το κύριο φορτίο, με τιμή 50, 90 ή 140 kp και προκαλεί διείσδυση,  $d$  (mm), που μεταφέρεται στο μετρητικό όργανο και διαβάζεται μετά την άρση του φορτίου.

Η σκληρότητα Rockwell χρησιμοποιεί δέκα πέντε διαφορετικές κλίμακες. Ανάλογα με το είδος του διεισδυτή και επιβαλλόμενων φορτίων και συνεπώς με τον τύπο του δοκιμαζόμενου υλικού, υπάρχουν δυο κυρίως ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell :

- Rockwell B: χρησιμοποιείται ως διεισδυτής χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 1.59mm. Το αρχικό φορτίο είναι ίσο με 10kp και το κύριο φορτίο ίσο με 90kp.

Η σκληρότητα εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HRB = 130 - d/0,002$$

όπου,  $d$  το βάθος της διείσδυσης σε mm.

Η κλίμακα B χρησιμοποιείται για μαλακούς και ημίσκληρους χάλυβες και παίρνει τιμές από 0 έως 100 HRB.

- Rockwell C: χρησιμοποιείται ως διεισδυτής κώνος από διαμάντι με γωνία κορυφής  $120^\circ$  και ακτίνα καμπυλότητας της αιχμής 0,2mm. Σε αυτή την κλίμακα το αρχικό φορτίο είναι 10kp, ενώ το κύριο φορτίο είναι ίσο με 140kp.

Η σκληρότητα εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο:

$$HRC = 100 - d/0,002$$

όπου, d το βάθος της διείσδυσης σε mm.

Η Rockwell C χρησιμοποιείται για σκληρούς και βαμμένους χάλυβες, ενώ παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 20HRC (HRC: μονάδα σκληρότητας κατά Rockwell C). Για παράδειγμα, οι σκληροί βαμμένοι χάλυβες έχουν σκληρότητα 60-70 HRC.[1]

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας διαφόρων υλικών στις τρεις κλίμακες.

Υλικό	Brinell		Vickers	Rockwell B
	500 kg	3000 kg		
Σίδηρος Armco	66	73	71	31
Ανοπτημένος μαλακός χάλυβας	107	117	123	70
Ανοπτημένος ανοξειδωτος χάλυβας	121	145	153	80
Ελασμένος χαλκός	99	83	110	55
Ανοπτημένος μπρούντζος	72	82	77	40
Ελασμένος μπρούντζος	174	178	189	91
Ανοπτημένο Al	23	-	25	-
Κράματα μαγνησίου	63	-	63	21

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας διαφόρων υλικών στις τρεις κλίμακες [6].

### 3.2 Γενικά στοιχεία χάλυβων

Οι χάλυβες ονομάστηκαν έτσι από τον ομώνυμο μυθικό λαό που σύμφωνα με τους αρχαίους Έλληνες είχε κατοικήσει στην ενδοχώρα του Εύξεινου Πόντου, και στον οποίο αποδιδόταν η πατρότητα της ανακάλυψης αυτού του σκληρού μετάλλου. Η ονομασία 'ατσάλι' (acier, acaio) που χρησιμοποιείται συχνά στην καθομιλουμένη διάλεκτο προέρχεται από το δεύτερο συνθετικό του λατινικού 'ferum acies' που σημαίνει 'σίδηρος οξύς (κοφτερός)', διότι με χάλυβα κατασκευάζονταν η κόψη μαχαιριών, σπαθιών κ.λ.π

Οι χάλυβες περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου – άνθρακα. Χάλυβες που ακολουθούν το σταθερό διάγραμμα σιδήρου – γραφίτη δεν υπάρχουν στην βιομηχανική πράξη, διότι λόγω της παρουσίας του γραφίτη θα ήταν μαλακοί και εύθραυστοι, επομένως ακατάλληλοι για τις εφαρμογές για τις οποίες κατά κανόνα προορίζονται.

Πρόκειται για κράματα σιδήρου – άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,025 έως 2,1%, αλλά στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται χάλυβες άνω του 1,2% και σπανιότατα μέχρι 1,5%.

Τα κράματα που χαρακτηρίζονται ως χάλυβες έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι κατά την απόψυξη τους από την κατάσταση τήγματος μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, περνούν μέσα από την μονοφασική περιοχή του ωστενίτη. Το ίδιο μπορεί να γίνει και με αναθέρμανση του στερεού χάλυβα σε κατάλληλη θερμοκρασία, ώστε να μετατραπεί σε κατάσταση αμιγούς ωστενίτη, ή όπως αλλιώς λέγεται, να ωστενοποιηθεί.

Σε αντιδιαστολή με τους χάλυβες, καμία σύνθεση χυτοσίδηρου (με  $C > 2,1\%$ ) δεν μπορεί, σύμφωνα με το διάγραμμα, να μετατραπεί σε μονοφασική κατάσταση ωστενίτη, αλλά θα περιέχει και καρβίδια.

Οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες υποδιαιρούνται σε κατηγορίες σύμφωνα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Χάλυβες με 0,8% σε C ονομάζονται ευτηκτοειδείς. Χάλυβες με περιεκτικότητα από 0,025% ως 0,8% σε C ονομάζονται υποευτηκτοειδείς και χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,8% μέχρι 2,1% ονομάζονται υπερευτηκτοειδείς.



Για περιεκτικότητες κάτω του 0,025% σε C, σύμφωνα με το διάγραμμα (Fe-C), δεν έχουμε ευτηκτοειδή μετασχηματισμό και γι' αυτό δε αναφερόμαστε πια σε χάλυβα, αλλά για σιδήρους [3].

### 3.3 Ταξινόμηση χάλυβων

Οι χάλυβες, όπως είναι γνωστό, συνιστούν κράματα Fe-C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1,5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν, ενίοτε σε μικρές ποσότητες, και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.

Οι κραματωμένοι χάλυβες, ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους,
- Μέτρια κραματωμένους και
- Ισχυρά κραματωμένους.

Ως προς τον προορισμό τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες διαμόρφωσης και
- Χυτοχάλυβες.

Ως προς τις χρήσεις τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χάλυβες Ni-Cr-Mo, χρωμιούχοι, χρωμιομολυβδαινιούχοι, χρωμιοβαναδιούχοι, μαγγανιοπυριτιούχοι, χάλυβες μαρτενγήρασης ή maraging, αυτόματοι, διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί dual-phase, κ.λ.π),
- Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυσθραυστότητας, καλής εμβαπτότητας, αντοχής σε επαναφορά),

- Ανοξειωτους ή πυρίμαχους χάλυβες και
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαλακοί μαγνήτες, μόνιμοι μαγνήτες, μη μαγνητικοί χάλυβες). [6]

### 3.4 Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους χάλυβες

Η επίδραση των στοιχείων προσθήκης στη μικροδομή αλλά και σε πολλές ιδιότητες των χάλυβων είναι πολύ σημαντική. Τα κραματικά στοιχεία ανάλογα με την επίδραση τους στη σταθεροποίηση των διαφόρων φάσεων του διαγράμματος ισορροπίας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Γαμμαφερρογόνα στοιχεία: είναι τα στοιχεία αυτά τα οποία επιφέρουν διεύρυνση της περιοχής σταθερότητας του ωστενίτη (γ-φάσης), καθώς και ελαττώνουν τις θερμοκρασίες μετασχηματισμών  $A_1$  και  $A_3$ , του διαγράμματος Fe-C.
- Αλφαφερρογόνα στοιχεία: είναι τα στοιχεία όπου συρρικνώνουν την περιοχή σταθερότητας του ωστενίτη, αυξάνοντας τις θερμοκρασίες μετασχηματισμών και διευρύνοντας την περιοχή σταθερότητας του φερρίτη (α-φάσης).
- Καρβιδιογόνα στοιχεία: είναι τα στοιχεία που παρουσιάζουν την τάση δημιουργίας καρβιδίων, δηλ. εμφανίζουν χημική συγγένεια με το άτομο του άνθρακα. Τέτοια στοιχεία που παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση δημιουργίας καρβιδίων από ότι ο σίδηρος είναι κατά αύξουσα σειρά τα ακόλουθα: Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti.
- Γραφιτίζοντα στοιχεία: είναι τα στοιχεία εκείνα που καταλύουν την αντίδραση της γραφιτίασης (της διάσπασης του σεμεντίτη) και αναστέλλουν γενικότερα τη δημιουργία καρβιδίων. Τέτοια στοιχεία είναι το Si, Ni και Al.

Επίσης, οι ιδιότητες των κοινών χάλυβων είναι πολλές φορές ανεπαρκείς για συγκεκριμένες εφαρμογές. Δηλαδή, ένας κοινός χάλυβας παρουσιάζει μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση, μικρή εμβαπτότητα, ανεπαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα. Επομένως, με την παρουσία κραματικών προσθηκών βελτιώνονται οι παραπάνω ιδιότητες με διάφορους τρόπους όπως:

- Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.

- Σχηματισμός καρβιδίων (προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων).
- Υποβοήθηση αποβολής του άνθρακα, από το πλέγμα του σιδήρου, με τη μορφή γραφίτη.
- Σταθεροποίηση του πλέγματος του ωστενίτη ( $\gamma$  – φερρογόνα στοιχεία) ή του φερρίτη ( $\alpha$  – φερρόγόνα στοιχεία).
- Μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
- Επίδραση στην ανάπτυξη των κόκκων .
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας [6].

Όπως προαναφέρθηκε, οι χάλυβες με μικρό ποσοστό κραματικών στοιχείων αποτελούν τους ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους χάλυβες. Συνήθως περιέχουν έως 1.5% Mn, και Nb, V ή Ti σε περιεκτικότητα έως 0.1%. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται μεταξύ 400 και 650MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 500 και 850MPa και η επιμήκυνσή τους μέχρι και τη θραύση είναι σημαντική, της τάξης του 14-27%. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στη ψαθυρή θραύση, καθώς και από μικρή ικανότητα εν ψυχρώ μορφοποίησης. Εν γένει, οι μικροκραματωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες από τους ανθρακούχους, παρ' όλ' αυτά η χρήση τους περιορίζεται λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής τους. Βρίσκουν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή τμημάτων, που απαιτούν υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα (π.χ. κιβώτια ταχυτήτων) [6].

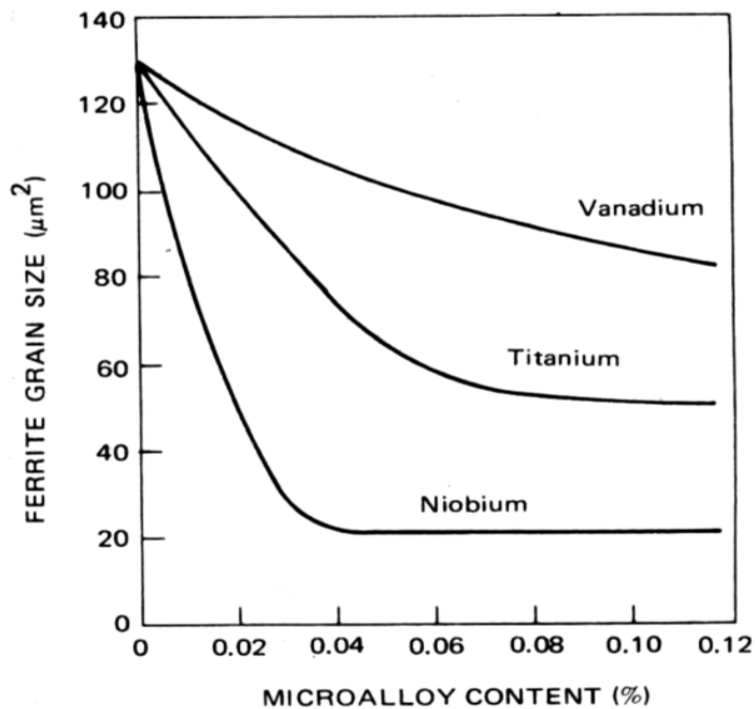
Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως μικροκραματικές προσθήκες στους είναι το βανάδιο (V), το νιόβιο (Nb) και το τιτάνιο (Ti).

Το βανάδιο είναι  $\alpha$ -φερρογόνο και ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο. Παρουσιάζει άνευ ορίου διαλυτότητα στον φερρίτη, ενώ στον ωστενίτη η διαλυτότητά του είναι μόλις 1%. Σχηματίζει V(C,N), τα οποία σε συνήθεις θερμοκρασίες έλασης παραμένουν σε διάλυση στον ωστενίτη, ενώ η κατακρήμνιση τους εξαρτάται από το ρυθμό απόψυξης. Η προσθήκη του V στον χάλυβα προκαλεί σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης, καθώς σχηματίζονται μικρού μεγέθους VC και VN εντός του φερρίτη, μετά την έλαση, κατά την απόψυξη. Η κατακρήμνιση σωματιδίων του βαναδίου επιφέρει αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής του χάλυβα, ενώ για ποσοστά περιεχόμενου βαναδίου έως 0,05% αυξάνεται και η εμβαπτότητα.

Υψηλότερη περιεκτικότητα σε βανάδιο μειώνει την εμβαπτότητα, καθώς παρουσιάζεται δυσκολία διάλυσης αυτού στον ωστενίτη.

Το νιόβιο είναι και αυτό ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο. Η προσθήκη του ως μικροκραματικό στοιχείο στον χάλυβα προκαλεί σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης αλλά κυρίως μέσω εκλέπτυνσης κόκκου. Πιο συγκεκριμένα, τα σχηματιζόμενα Nb(C,N) μειώνουν σημαντικά το ρυθμό ανακρυστάλλωσης του ωστενίτη κατά τη θερμή έλαση, συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία λεπτόκοκκων μικροδομών, που χαρακτηρίζονται από υψηλό όριο διαρροής και σχετικά μεγάλη αντοχή στον εφελκυσμό. Επιπρόσθετα, τα NbC είναι ιδιαίτερα σταθερά σωματίδια, με μικρή διαλυτότητα στον ωστενίτη, η οποία αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης. Έτσι, κατά την απόψυξη τα καρβονιτρίδια κατακρημνίζονται στον φερρίτη, παρεμποδίζοντας τη μετακίνηση των διαταραχών και προσδίδοντας σκληρότητα στο χάλυβα. Η προσθήκη νιοβίου απαιτεί ειδικές θερμομηχανικές τεχνικές, μεταξύ των οποίων ελεγχόμενη έλαση με διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών κατά το τελευταίο πάσο και πολύ γρήγορη απόψυξη μετά το πέρας αυτής, ώστε να αποτραπεί η ανακρυστάλλωση του ωστενίτη και να διατηρηθεί το τελικό μέγεθος κόκκου του φερρίτη όσο το δυνατόν χαμηλότερο.

Το τιτάνιο, όντας α-φερρογόνο στοιχείο, παρουσιάζει 6% διαλυτότητα στον φερρίτη και μόλις 0,1% στον ωστενίτη. Η προσθήκη του στον χάλυβα αποτρέπει την αύξηση μεγέθους κόκκου σε υψηλές θερμοκρασίες της ωστενιτικής περιοχής, μέσω του σχηματισμού TiN, τα οποία παραμένουν αδιάλυτα εντός της μητρικής δομής. Επίσης, σχηματίζονται και καρβίδια του τιτανίου (TiC), τα οποία προκαλούν σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης κατά τη θερμή έλαση. Το τιτάνιο ως μικροκραματική προσθήκη βελτιώνει την αντοχή και τη δυσθραυστότητα του χάλυβα και αυξάνει τη σκληρότητά του. Σε συνδυασμό με το νιόβιο, το τιτάνιο αυξάνει την αποτελεσματικότητα του νιοβίου, καθώς ενώνεται με το άζωτο και σχηματίζει TiN, αποτρέποντας το σχηματισμό NbN [6,21,22,29]. Έτσι, το νιόβιο αξιοποιείται αργότερα, όπου κατά την έλαση ενώνεται με τον άνθρακα και τα καρβίδιά του κατακρημνίζονται στα όρια κόκκου του ωστενίτη, παρεμποδίζοντας την κίνησή τους και οδηγώντας σε εκλέπτυνση την τελική μικροδομή.



Εικόνα 3: Η επίδραση των μικροκραματικών στοιχείων Nb, Ti, V στο μέγεθος κόκκου του φερρίτη, μετά από θερμή έλαση [22].

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι το Nb και το Ti είναι πιο αποτελεσματικά στην εκλέπτυνση κόκκου συγκριτικά με το V, καθώς τα NbC και TiN παρουσιάζουν τη μικρότερη διαλυτότητα στον ωστενίτη και συνεπώς είναι ιδιαίτερα σταθερά.

Η διαλυτότητα των καρβιδίων και νιτριδίων των παραπάνω στοιχείων στον ωστενίτη αυξάνεται ως εξής: NbC < TiC < VC και TiN < NbN < VN [22].

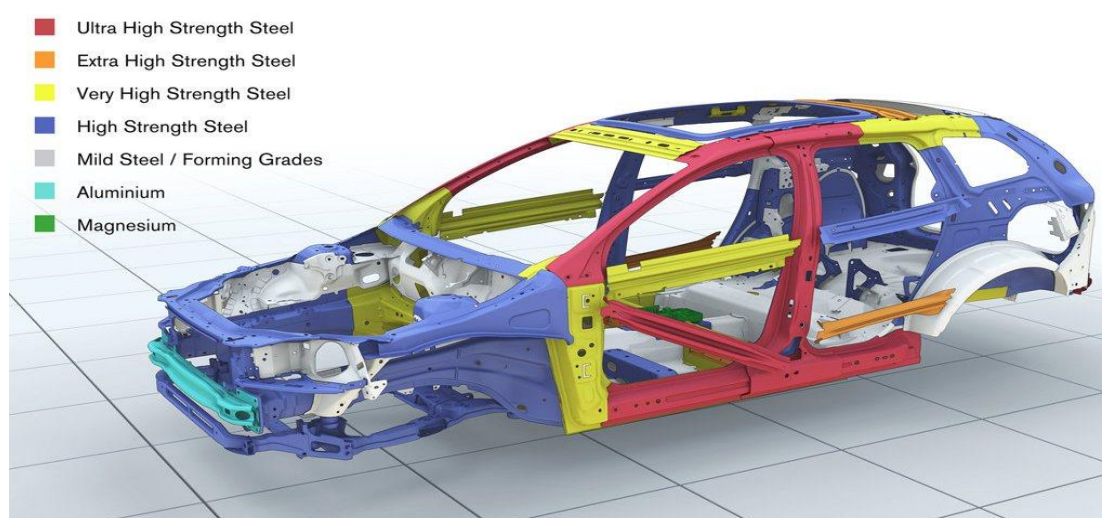
Μικροκραματικό στοιχείο	Σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης μετά από θερμή έλαση	Επηρεάζει την ανακρυστάλλωση κατά την θερμή έλαση	Εκλέπτυνση κόκκου κατά την ωστενιτοποίηση	Επηρεάζει τους μετασχηματισμούς μετά από θερμή έλαση
V	VC, VN			
Nb	Nb(C,N)	Nb(C,N)		Nb
Ti	TiC		TiN	

Πίνακας 2: Ο ρόλος των μικροκραματικών στοιχείων (V, Nb, Ti) στον χάλυβα [29].

### 3.5 Χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας

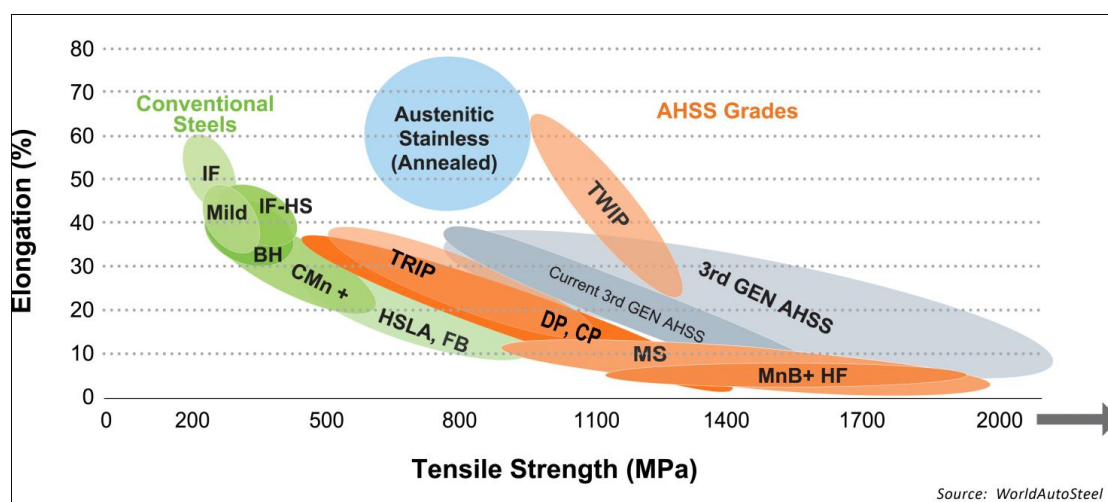
Το 55% της συνολικής μάζας του αυτοκινήτου αποτελείται από χάλυβες. Από το ποσοστό αυτό το 50% των χαλύβων που χρησιμοποιούνται ανήκουν στην κατηγορία High-strength steels (χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής σε θραύση). Για παράδειγμα η εταιρεία Volvo στα μοντέλα της μετά το 2007 χρησιμοποιεί HSS (Χάλυβες Υψηλής Αντοχής) σε ποσοστό 27% της συνολικής μάζας του οχήματος. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι διότι με την χρησιμοποίηση τέτοιου τύπου χαλύβων έχει μετρηθεί μείωση στην κατανάλωση καυσίμου της τάξης του 50% εξαιτίας της μείωσης του συνολικού βάρους του οχήματος, χωρίς να επηρεάζεται η παθητική ασφάλεια των επιβατών.

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία χωρίζονται στην βιβλιογραφία με διάφορους τρόπους. Από όλους αυτούς επιλέξαμε να αναπτύξουμε τους δύο πιο βασικούς οι οποίοι είναι και οι πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι. Ο πρώτος περιλαμβάνει τους Χάλυβες Χαμηλής Αντοχής (Low Strength Steels), τους τυπικούς Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (conventional HSS), τους πιο εξελιγμένους τύπους χάλυβα δηλαδή τους Προηγμένους Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (AHSS) και τους Χάλυβες Υψηλότερης Αντοχής (Higher Strength Steels). Στην εικόνα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα μέρη του αυτοκινήτου στα οποία χρησιμοποιούνται χάλυβες των διαφόρων κατηγοριών.



Εικόνα 4: Σημεία του αμαξώματος που χρησιμοποιούνται χάλυβες διαφόρων κατηγοριών αλλά και άλλα υλικά [43].

Ο δεύτερος τρόπος διαχωρισμού που ενδιαφέρει ιδιαίτερα τους σχεδιαστές των τμημάτων είναι ο μεταλλουργικός τρόπος δηλαδή με βάση τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Έτσι κάθε χάλυβας κατανέμεται με βάση το όριο διαρροής του και το όριο θραύσης του σε MPa [15]. Έχουμε λοιπόν την κατηγορία των Χαλύβων Χαμηλής Αντοχής (Low Strength Steels) με όριο θραύσης που δεν υπερβαίνει τα 270MPa, την κατηγορία των Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (High Strength Steels) στην οποία ανήκουν χάλυβες με όριο διαρροής από 210 MPa έως 550MPa και όριο θραύσης που κυμαίνεται από 270 MPa έως 700 MPa και την κατηγορία των Ιδιαίτεως Υψηλής Αντοχής Χαλύβων (Ultra High Strength Steels) στην οποία ανήκουν χάλυβες με όριο διαρροής υψηλότερο από τα 550MPa και όριο θραύσης μεγαλύτερο των 700MPa. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στο διάγραμμα της εικόνας 5. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα ακολουθήσει περιγραφή των κύριων κατηγοριών χάλυβων αυτοκινητοβιομηχανίας, ακολουθώντας τον πρώτο τρόπο διαχωρισμού καθώς και των υποομάδων που τον απαρτίζουν.



Εικόνα 5: κατηγορίες χάλυβων αυτοκινητοβιομηχανίας [43].

### 3.5.1 Χάλυβες χαμηλής αντοχής (Low Strength Steels)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χάλυβες Απαλλαγμένοι από Στοιχεία Παρεμβολής (Interstitial-Free -IF) και οι Μαλακοί Χάλυβες (Mild Steel).

Οι χάλυβες IF/ULC (πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα) είναι μαλακοί χάλυβες με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε C και N της τάξης των 30ppm (0,003%κ.β). Σε αυτό το λόγο οφείλουν και την ονομασία τους (Στοιχεία

Παρεμβολής - Interstitial elements). Είναι παρόμοιοι με τους μικροκραματωμένους χάλυβες διότι περιέχουν μικρές προσθήκες ισχυρά καρβιδιογόνων στοιχείων όπως Nb, Ti και V. Σε αρκετές περιπτώσεις προστίθεται P για αύξηση της σκληρότητας καθώς και B για να μειώσει τις βλαβερές συνέπειες του P. Εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά στην εν ψυχρώ διαμόρφωση (deep drawability), μέτρια μηχανική αντοχή και εξαιρετική ποιότητα επιφανείας. Στο όχημα χρησιμοποιούνται σε μέρη όπως οι θύρες, καλύμματα κινητήρα (καπό), πορτ μπαγκάζ κ.α.[11,18].

Οι Μαλακοί Χάλυβες (Mild Steel) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό στην βιομηχανία του αυτοκινήτου. Εμφανίζουν φερριτική μικροδομή. Η ποιότητα DQ (Drawing Quality) και AKDQ (Aluminium Killed-καθησυχασμένοι με προσθήκη Al) αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του τύπου χάλυβα γιατί χρησιμοποιούνται εκτεταμένα εξαιτίας των πολλών εφαρμογών τους και του μεγάλου όγκου παραγωγής [15,31].

### **3.5.2 Συμβατικοί χάλυβες υψηλής αντοχής (Conventional High Strength Steels)**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι τύποι Χαλύβων με συνδυασμένη προσθήκη Άνθρακα – Μαγγανίου (Carbon-Manganese C-Mn), οι Σκλήρωσης κατά τη διαδικασία έψησης (μπογιάς αμαξωμάτων π.χ.170°C) Bake Hardenable (BH), οι Ισοτροπικοί Χάλυβες (Isotropic steels-IS), οι χάλυβες Απαλλαγμένοι από στοιχεία παρεμβολής Υψηλής Αντοχής (High Interstitial Free IF-HS) και οι Μικροκραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (High Strength Low Alloy - HSLA). Η βασική διαφορά των τυπικών HSS από τους AHSS βρίσκεται στην μικροδομή τους. Οι τυπικοί HSS είναι μονοφασικοί φερριτικοί χάλυβες ενώ οι AHSS είναι πολυφασικοί χάλυβες, η μικροδομή των οποίων περιέχει φερρίτη, μαρτενσίτη, μπαινίτη και σε κάποιες περιπτώσεις υπολειπόμενο ωστενίτη σε ποσοστά τέτοια ώστε να προσδώσει στο υλικό κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες [15].

Οι Χάλυβες με συνδυασμένες προσθήκες Άνθρακα – Μαγγανίου (C-Mn) περιέχουν Mn σε ποσοστό από 1.2% κ.β. έως και 1.8% κ.β.. Το Mn προστίθεται στους ανθρακούχους χάλυβες για αύξηση της αντοχής, της σκληρότητας καθώς και της δυσθραυστότητας [33]. Επίσης εμφανίζουν αυξημένη αντοχή στην κόπωση και επιτρέπουν στους κατασκευαστές να αυξήσουν την μηχανική αντοχή του τελικού



προϊόντος ή να μειώσουν το πάχος του χάλυβα ή και τα δύο. Στα αυτοκίνητα χρησιμοποιείται σε μέρη όπως στις ζάντες (wheel rims), στους δίσκους των τροχών (wheel discs), στις αναρτήσεις (suspension housings), (transverse links) κ.α. [42].

Οι χάλυβες Bake Hardenable (BH) είναι χάλυβες ψυχρής διαμόρφωσης χαμηλού C, οι οποίοι αυξάνουν την αντοχή τους εξαιτίας ενός συνδυασμού βαφής (staining) και γήρανσης (age hardening) μετά τη διαμόρφωση [15]. Παρουσιάζουν φερριτική μικροδομή και ισχυροποιούνται μέσω του μηχανισμού σκλήρωσης στερεού διαλύματος. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των χαλύβων είναι η χημεία τους και η διαδικασία παραγωγής τους που είναι σχεδιασμένη να κρατά τον C στο διάλυμα κατά την παραγωγή τους και στη συνέχεια να του επιτρέπει να διαχυθεί κατά την διάρκεια της βαφής που πραγματοποιείται με έψηση στους 120-170°C ή έπειτα από κάποιες εβδομάδες σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτό αυξάνει το όριο διαρροής (yield strength) των διαμορφωμένων κομματιών με αντίστοιχη αύξηση στην αντοχή σε κοίλανση (dent resistance) [31].

Η μικροδομή των Ισοτροπικών Χαλύβων (IS) είναι κυρίως φερριτική και συνδυάζει πολύ καλή διαμορφωσιμότητα καθώς και υψηλή αντοχή σε θραύση. Η εξαιρετική τους διαμορφωσιμότητα επιτυγχάνεται από τις ιδιαίτερες ρεολογικές τους ιδιότητες. Εμφανίζουν ομοιόμορφη διαρροή (uniform flow) κατά την έλαση ή την διαμόρφωσή τους (isotropic flow). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κατά την κοίλανση να μην δημιουργούν "αυτιά" όπως συμβαίνει με τους τυπικούς χάλυβες βαθειάς κοίλανσης. Το πάχος του διαμορφωμένου εξαρτήματος μπορεί να φθάσει και κάτω από τα 0.7 mm. χωρίς να χάσουν σε μηχανική αντοχή. Γενικώς χρησιμοποιούνται γιατί εμφανίζουν σχετικά μέτριο όριο διαρροής που κυμαίνεται από 220-340 MPa, υψηλή πλαστικότητα κατά την διάρκεια της μορφοποίησης, μεγάλη ολκιμότητα, υψηλή αντοχή, ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες κ.α. Χρησιμοποιούνται στα μέρη του αμαξώματος που διαμορφώνονται με ψυχρή έλαση όπως στις πόρτες των αυτοκινήτων, στα φτερά κ.λ.π. [41].

Οι χάλυβες Απαλλαγμένοι από στοιχεία παρεμβολής Υψηλής Αντοχής (IF-HS) βρήκαν ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία εξαιτίας της ανάγκης για μείωση του συνολικού βάρους τους αμαξώματος, ώστε το όχημα να γίνει πιο φιλικό προς το περιβάλλον και πιο οικονομικό με την κατανάλωση λιγότερου καυσίμου. Περιέχουν P και Mn σαν στοιχεία ισχυροποίησης μέσω του μηχανισμού σκλήρωσης

μέσω στερεού διαλύματος. Ο στόχος ήταν η επίτευξη υψηλών τιμών αντοχής χωρίς να θυσιάσει η ικανότητα σε βαθιά κοίλανση (deep drawability). Ωστόσο, ο περιορισμός της ικανότητας στην κοίλανση συχνά έχει αναφερθεί στο IFHS και ειδικά σε εκείνους που περιέχουν P. Οι χάλυβες IF ονομάζονται και "καθαροί" χάλυβες μιας και το συνολικό κλάσμα όγκου των κατακρημνισμάτων εμφανίζεται αρκετά μικρό. Σε αντίθεση με το παραπάνω τα κατακρημνίσματα δείχνουν να επιδρούν σημαντικά στις ιδιότητες του υλικού και ειδικά στην διαμορφωσιμότητα [17,27,28]. Μεγάλη συσχέτιση κατακρημνισμάτων και δημιουργίας ιστού έχει παρατηρηθεί από μελετητές [19].

### **3.5.2.1 Μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (HSLA)**

#### **Γενικά**

Οι χάλυβες HSLA ή μικροκραματωμένοι χάλυβες, σχεδιάστηκαν για να παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση από τους συμβατικούς χάλυβες. Δεν θεωρούνται κραματωμένοι χάλυβες κατά τη συνήθη έννοια γιατί έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες (οι χάλυβες HSLA έχουν όριο διαρροής μεγαλύτερο από 250 MPa). Η χημική σύσταση ενός συγκεκριμένου χάλυβα HSLA ποικίλει για διαφορετικό πάχος χάλυβα ώστε να καλύψει της απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες. Οι χάλυβες HSLA σε μορφή φύλλων ή πλακών έχουν μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,05 – 0,25 % σε C) με αποτέλεσμα να έχουν επαρκή διαμορφωσιμότητα και συγκολλησιμότητα, και έχουν περιεκτικότητα σε μαγγάνιο μέχρι 2%. Μικρές προσθήκες χρωμίου, νικελίου, μολυβδαίνιου, χαλκού, αζώτου, βαναδίου, νιόβιου, τιτανίου και ζirkονίου χρησιμοποιούνται σε διάφορους συνδυασμούς [14].

#### **Κατηγορίες χαλύβων HSLA**

Οι χάλυβες μεγάλης αντοχής – μικρής κραμάτωσης έχουν σχεδιαστεί με βάση διάφορων προτύπων ώστε να παρέχουν συγκεκριμένους συνδυασμούς επιθυμητών ιδιοτήτων όπως η αντοχή, η δυσθραυστότητα, η διαμορφωσιμότητα, συγκολλησιμότητα και η αντοχή στην διάβρωση. Οι χάλυβες αυτοί δεν θεωρούνται κραματωμένοι, παρόλο που οι επιθυμητές ιδιότητες τους επιτυγχάνονται με τη προσθήκη κραματικών στοιχείων. Αντίθετα, οι χάλυβες HSLA ταξινομούνται ως

ξεχωριστή κατηγορία χαλύβων, που είναι παρόμοια με τους χάλυβες θερμής έλασης, οι οποίοι έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, από την έξτρα προσθήκη κραματικών στοιχείων σε μικρή ποσότητα, και ίσως καλύτερες τεχνικές επεξεργασίας όπως η ελεγχόμενη έλαση και γρηγορότερος τρόπος απόψυξης. Αυτή η ξεχωριστή κατηγοριοποίηση των χαλύβων HSLA αντικατοπτρίζεται από το γεγονός ότι η τιμή τους είναι ίδια στην βασική τιμή ενός χάλυβα και όχι στην τιμή ενός κραματωμένου.

Οι χάλυβες HSLA χωρίζονται σε 6 κατηγορίες:

- Χάλυβες διάβρωσης (Weathering Steels), οι οποίοι περιέχουν μικρές ποσότητες κραματικών στοιχείων, όπως χαλκό και φώσφορο, για μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση και ενίσχυση του στερεού διαλύματος
- Μικροκραματωμένοι φερριτοπερλιτικοί χάλυβες (Microalloyed ferrite – pearlite steels), οι οποίοι περιέχουν πολύ μικρές (γενικά λιγότερο από 0,10%) προσθήκες ισχυρών καρβιδιογόνων στοιχείων όπως το βανάδιο, το νιόβιο και το τιτάνιο με αποτέλεσμα ισχυρότερης κατακρήμνισης, εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού και ενδεχομένως, έλεγχο της θερμοκρασίας μετασχηματισμού.
- Περλιτικοί χάλυβες έλασης (As – rolled pearlitic Steels), που μπορεί να περιλαμβάνουν τους χάλυβες με συνδυασμένες προσθήκες άνθρακα – μαγγανίου, οι οποίοι μπορεί να περιέχουν μικρές προσθήκες άλλων κραματικών στοιχείων ώστε να αυξηθεί η αντοχή, η σκληρότητα, η διαμορφωσιμότητα και η συγκολλησιμότητα.
- Βελονοειδείς φερριτικοί (μπαινίτης χαμηλός σε άνθρακα) χάλυβες (Acicular ferrite [low – carbon bainite] steels), οι οποίοι έχουν μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα (μικρότερο από 0,05% σε C) με εξαιρετικό συνδυασμό υψηλού ορίου διαρροής (μέχρι τα 690MPa), συγκολλησιμότητας, διαμορφωσιμότητας και καλής σκληρότητας.
- Διφασικοί χάλυβες (Dual – phase steels), οι οποίοι παρουσιάζουν μαρτενσιτική μικροδομή σε φερριτική μήτρα και προσδίδουν ένα καλό συνδυασμό ολκιμότητας και υψηλού ορίου θραύσης.
- Χάλυβες Inclusion – shape – controlled, οι οποίοι προσδίδουν βελτιωμένη ολκιμότητα και σκληρότητα (μέσω του πάχους) από τις μικρές προσθήκες ασβεστίου, ζirkονίου, τιτανίου ή από σπάνιες γαίες έτσι ώστε το σχήμα από

τα εγκλείσματα σουλφιδίων να αλλάζει από επιμήκεις χορδές, σε μικρά διάσπαρτα σφαιρικά σωματίδια.

Αυτές οι κατηγορίες δεν είναι ακριβώς ξεχωριστές ομάδες, γιατί ένας χάλυβας HSLA μπορεί να έχει χαρακτηριστικά από περισσότερες από μία ομάδες. Για παράδειγμα, όλοι οι παραπάνω τύποι χάλυβα μπορεί να είναι «inclusion shape controlled». Οι μικροκραματωμένοι φερριτοπερλιτικοί χάλυβες μπορεί επίσης να έχουν επιπλέον κραματικά στοιχεία για αντίσταση στην διάβρωση και αύξηση της αντοχής μέσω σχηματισμού στερεού διαλύματος.

Οι εφαρμογές των χαλύβων HSLA περιλαμβάνουν τους αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου, αυτοκινητόδρομους και εκτός δρόμου οχήματα, κατασκευές και γεωργικά μηχανήματα, βιομηχανικό εξοπλισμό, δεξαμενές αποθήκευσης, ορυχεία και βαγόνια, μεγάλα φορτηγά και εκσκαφείς, οχήματα χιονιού, μηχανές του γκαζόν, και εξαρτήματα των επιβατικών αυτοκινήτων. Γέφυρες, υπεράκτιες δομές, δοκοί και πλάκες σε κτίρια αποτελούν χρήσεις αυτών των χαλύβων.

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου χάλυβα HSLA εξαρτάται από τις απαιτήσεις των εφαρμογών, που προορίζεται το υλικό, συμπεριλαμβανομένου την μείωση του πάχους, την αντοχή στη διάβρωση, τη διαμορφωσιμότητα και τη συγκολλησιμότητα. Σε πολλές εφαρμογές, ο πιο σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία επιλογής του χάλυβα είναι η επιθυμητή αναλογία αντοχής - βάρους των χαλύβων HSLA σε σύγκριση με τους συμβατικούς χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Αυτό το χαρακτηριστικό των χαλύβων HSLA έχει οδηγήσει σε αυξημένη χρήση τους σε εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας [14].

### **Επιδράσεις των κραματικών στοιχείων στους HSLA**

Έμφαση σε αυτό το σημείο δίνεται στους μικροκραματωμένους φερριτοπερλιτικούς χάλυβες, στους οποίους υπάρχει προσθήκη κραματικών στοιχείων όπως το βανάδιο και το νιόβιο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του χάλυβα θερμής έλασης, χωρίς να υπάρξει αύξηση του άνθρακα και του περιεχόμενου μαγγανείου. Εκτεταμένες μελέτες κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 σχετικά με τις επιδράσεις του βαναδίου και του νιόβιου στις ιδιότητες των δομικών υλικών οδήγησε στο συμπέρασμα ότι μικρές ποσότητες βαναδίου και νιόβιου (<0,10% για κάθε στοιχείο) αυξάνει την αντοχή των χαλύβων άνθρακα – μαγγανείου χωρίς να

απαιτείται περεταίρω επεξεργασία. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα θα μπορούσε να μειωθεί ώστε να βελτιωθεί η συγκολλησιμότητα και η δυσθραυστότητα επειδή οι επιδράσεις της αύξησης της αντοχής λόγω του βαναδίου και του νιόβιου αντισταθμίζονται με την μειωμένη αντοχή που προήλθε από την μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Παρόλο που η παρουσία των μικροκραματικών στοιχείων είναι μικρή, υπάρχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων HSLA. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη, ο οποίος εξαρτάται από το σχεδιασμό του κράματος και τις τεχνικές έλασης, είναι σημαντικός παράγοντας στην βελτίωση των χαλύβων HSLA. Η εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού, από τον μετασχηματισμού του ωστενίτη μέσω από ελεγχόμενες μεθόδους έλαση έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας και υψηλού ορίου διαρροής μεταξύ 345 – 620 MPa. Η ελεγχόμενη διαδικασία έλασης σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό του κράματος έχει συνέπεια την αύξηση του ορίου θραύσης, ενώ παράλληλα υπάρχει σταδιακή μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Πολλοί χάλυβες HSLA, παρόλο που έχουν μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, της τάξεως του 0,06% ή και μικρότερη, έχουν όριο διαρροής μέχρι και 482MPa. Το υψηλό αυτό όριο θραύσης προέρχεται από τον συνδυασμό του λεπτόκοκκου υλικού, λόγω θερμής έλασης, και την σκλήρυνση με κατακρήμνιση των κραματικών στοιχείων, βαναδίου, νιόβιου και τιτανίου.

Οι διάφοροι τύποι μικροκραματωμένων φερριτοπερλιτικών χαλύβων είναι οι παρακάτω:

- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη νιόβιου
- Χάλυβες με προσθήκη νιόβιο – μολυβδαίνιου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου – νιόβιου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου – αζώτου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη τιτανίου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη νιόβιου – τιτανίου
- Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου – τιτανίου

Οι χάλυβες αυτοί μπορεί να περιέχουν και άλλα στοιχεία με αποτέλεσμα να βελτιώσουν την αντίσταση στην διάβρωση και την αντοχή μέσω στερεού διαλύματος, ή να έχουν καλύτερη εμβαπτότητα (αν είναι επιθυμητή άλλοι μετασχηματισμοί εκτός από φερρίτη και περλίτη).

Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε μόνο στους μικροκραματωμένους χάλυβες βαναδίου, στους μικροκραματωμένους χάλυβες τιτανίου και στους μικροκραματωμένους χάλυβες νιόβιου [14].

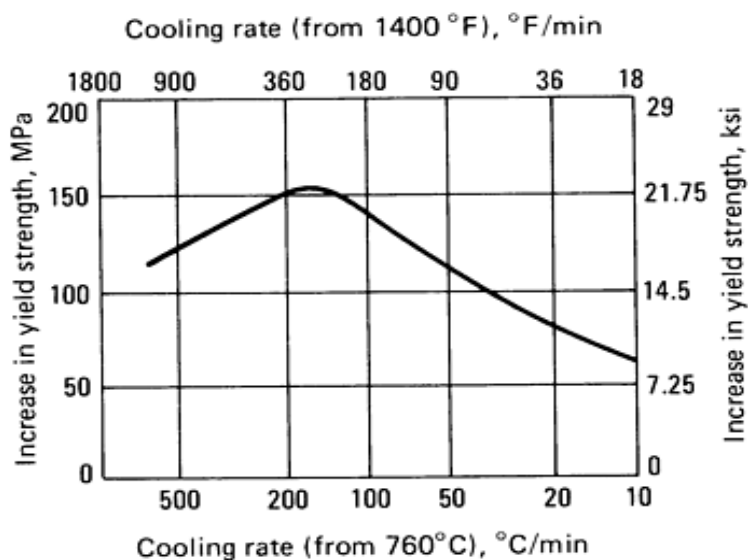
### **Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου**

Η ανάπτυξη των μικροκραματωμένων χαλύβων με προσθήκη βαναδίου πραγματοποιήθηκε μετά από την δημιουργία των χαλύβων διάβρωσης (weathering steels) και τα προϊόντα έλασης με προσθήκη μέχρι 0,10% σε V χρησιμοποιούνται ευρέως στην διαμόρφωση με θερμή έλαση. Επίσης, οι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου χρησιμοποιούνται στην ελεγχόμενη έλαση, και στην βαφή και επαναφορά.

Το βανάδιο συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής σχηματίζοντας λεπτά κατακρημνισμένα σωματίδια (με διάμετρο από 5 έως 100 nm) μέσα στον φερρίτη κατά την διάρκεια της απόψυξης του υλικού, μετά από θερμή έλαση. Τα κατακρημνίσματα βαναδίου, τα οποία είναι ασταθή κατά την κατακρήμνιση του βαναδίου, είναι σε διάλυμα σε όλες τις κανονικές θερμοκρασίες έλασης και έτσι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό απόψυξης για τον σχηματισμό τους. Ωστόσο, τα κατακρημνίσματα βαναδίου είναι σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες, το οποίο είναι σημαντικό για τον σχηματισμό λεπτόκοκκου φερρίτη.

Η αύξηση της αντοχής λόγω του βαναδίου κυμαίνεται μεταξύ 5 – 15 MPa ανά 0,01% προσθήκης σε V, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα και τον ρυθμό απόψυξης από την θερμή έλαση (και από το πάχος του υλικού). Ο ρυθμός απόψυξης οποίος καθορίζεται από την θερμοκρασία της έλαση και το πάχος του υλικού, επηρεάζουν τα επίπεδα σκλήρυνσης μέσω κατακρήμνισης σε ένα χάλυβα με 0,15%V (εικόνα 6). Ένα βέλτιστο επίπεδο της μηχανικής αντοχής μέσω κατακρήμνισης είναι όταν ο ρυθμός απόψυξης έχει ταχύτητα περίπου 170°C/min (εικόνα 6). Όταν ο ρυθμός απόψυξης είναι μικρότερος από 170 °C/min υπάρχει εκτράχυνση των κατακρημνισμάτων βαναδίου και είναι λιγότερο αποτελεσματικά για σκλήρυνση του υλικού. Σε μεγαλύτερους ρυθμούς απόψυξης, υπάρχει περισσότερο βανάδιο σε

διάλυμα, με αποτέλεσμα ένα μικρότερο κλάσμα σωματιδίων βαναδίου κατακρημνίζεται και μειώνεται η σκληρότητα. Για δεδομένο πάχος υλικού και ψυκτικού μέσου, ο ρυθμός απόψυξης μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, αυξάνοντας ή μειώνοντας αντίστοιχα την θερμοκρασία πριν την απόψυξη του υλικού. Αυξάνοντας την θερμοκρασία, έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερους κόκκους ωστενίτη, ενώ μειώνοντας την θερμοκρασία γίνεται δύσκολη η έλαση του υλικού.



Εικόνα 6: Η επίδραση του ρυθμού απόψυξης στην ενίσχυση της μηχανικής αντοχής, μέσω σκλήρυνσης με κατακρήμνιση, σε χάλυβα 0,15% σε V.

Η προσθήκη μαγγανίου, επίσης επηρεάζει την σκληρότητα των μικροκραματωμένων χαλύβων που έχουν βανάδιο. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγγάνιο κατά 0,9%, αυξάνει την αντοχή της μήτρας του υλικού κατά 34MPa λόγω σκλήρυνσης μέσω στερεού διαλύματος. Η σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης από το βανάδιο έγινε επίσης μεγαλύτερη, γιατί η προσθήκη μαγγανίου (ως  $\gamma$  – φερρογόνο) μείωσε την θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη, οδηγώντας έτσι σε λεπτότερα διασκορπισμένα κατακρημνίσματα. Η επίδραση αυτή του μαγγανίου στην σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης είναι μεγαλύτερη από την επίδραση του νιόβιου στους χάλυβες. Ωστόσο, η μέγιστη αντοχή των χαλύβων με προσθήκη νιόβιου και 1,2% σε μαγγάνιο είναι μόνο 50MPa, μικρότερη δηλαδή από ότι προσφέρει το βανάδιο στον χάλυβα, αλλά σε μικρότερη κραματική προσθήκη (το νιόβιο σε περιεκτικότητα 0,06%, ενώ το βανάδιο σε 0,14%).

Ο τρίτος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή των χάλυβων λόγω προσθήκης βαναδίου είναι το μέγεθος κόκκων του φερρίτη που δημιουργούνται μετά την απόψυξη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Λεπτότεροι κόκκοι φερρίτη μπορούν να παραχθούν, είτε μειώνοντας την θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη, είτε από τον σχηματισμό λεπτότερων κόκκων ωστενίτη πριν μετασχηματιστεί σε φερρίτη. Μείωση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού, η οποία επηρεάζει το επίπεδο σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να επιτευχθεί με κραματικές προσθήκες και/ή αυξάνοντας τον ρυθμό απόψυξης. Σε δεδομένο ρυθμό απόψυξης, για περεταίρω βελτίωση του μεγέθους κόκκων του ωστενίτη, επιτυγχάνεται με την εκλέπτυνση των κόκκων του ωστενίτη κατά την θερμή έλαση.

Το μέγεθος κόκκων του ωστενίτη σε χάλυβες θερμής έλασης καθορίζεται από την ανακρυστάλλωση και την μεγέθυνση κόκκων του ωστενίτη κατά την έλαση. Η χάλυβες θερμής έλασης με προσθήκη βαναδίου συνήθως υποβάλλονται σε συμβατική έλαση, αλλά επίσης παράγονται από ανακρυστάλλωση η οποία πραγματοποιείται με ελεγχόμενη έλαση. Με συμβατική έλαση, οι χάλυβες με προσθήκη βαναδίου έχουν μέτρια σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης και σχετικά μικρή σκλήρυνση από την εκλέπτυνση των κόκκων. Το μέγιστο όριο διαρροής, με συμβατική θερμή έλαση, στους χάλυβες με προσθήκη βαναδίου 0,08% και περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,25% είναι περίπου 450MPa. Μια πρακτική τιμή του ορίου διαρροής στους μικροκραματωμένους χάλυβες θερμής έλασης με βανάδιο είναι περίπου 415MPa, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται ελεγχόμενες τεχνικές έλασης. Οι χάλυβες με μικροκραμάτωση βαναδίου που υποβάλλονται σε ανακρυστάλλωση μέσω ελεγχόμενης έλαση, χρειάζονται προσθήκη τιτανίου, έτσι ώστε να σχηματίζονται λεπτά κατακρημνίσματα (TiN), τα οποία περιορίζουν την μεγέθυνση κόκκων του ωστενίτη μετά την ανακρυστάλλωση του υλικού. Το όριο διαρροής από την ελεγχόμενη συμβατική έλαση περιορίζεται σε μία πρακτική τιμή, περίπου 415MPa, επειδή η ανακρυστάλλωση δεν επιβραδύνεται. Όταν η αντοχή και δυσθραυστότητα αποτελούν σημαντικούς παράγοντες, η επιλογή του χάλυβα ελεγχόμενης έλασης, με προσθήκη βαναδίου και χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, είναι προτιμότερη [14].

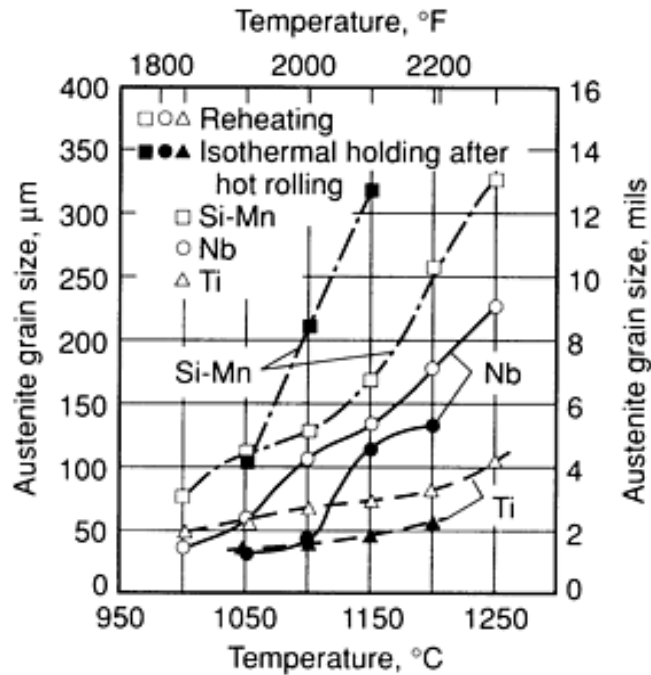
#### **Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη τιτανίου**



Το τιτάνιο σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα σχηματίζει ένα σύνολο ενώσεων οι οποίες παρέχουν εκλέπτυνση των κόκκων, σκλήρυνση με κατακρήμνιση και καλοσχηματισμένα σουλφίδια. Ωστόσο, επειδή το τιτάνιο είναι ισχυρότατο αποξειδωτικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε αποξειδωμένους χάλυβες έτσι ώστε να μπορεί να σχηματίζει άλλες ενώσεις, εκτός του οξειδίου του τιτανίου. Στο εμπόριο, οι χάλυβες με προσθήκη τιτανίου, που έχουν σκληρυνθεί μέσω κατακρήμνισης, παράγονται σε πάχη μέχρι 9,5mm με το ελάχιστο όριο διαρροής από 345 έως 550 MPa, με ελεγχόμενη έλαση η οποία απαιτείται για την μέγιστη ενίσχυση της μηχανικής αντοχής και βελτίωση της δυσθραυστότητας.

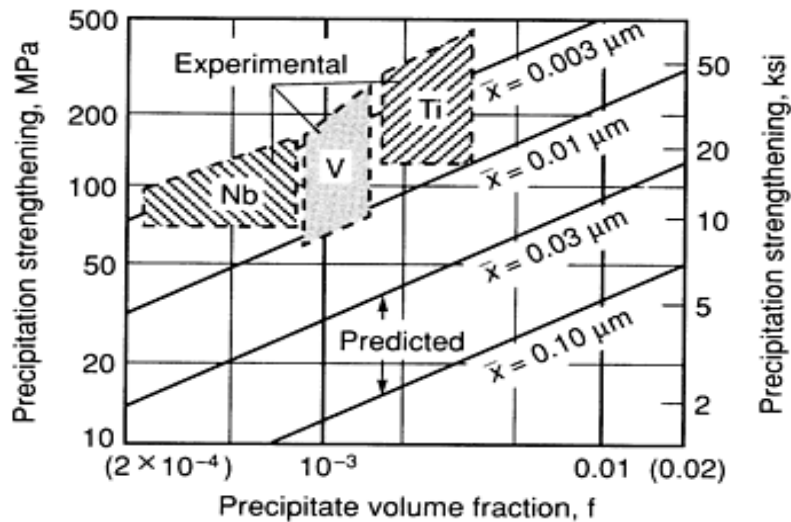
Όπως οι μικροκραματωμένοι χάλυβες με βανάδιο ή νιόβιο, έτσι και οι μικροκραματωμένοι με τιτάνιο, ενισχύουν την μηχανική τους αντοχή μέσα από μηχανισμούς όπως η εκλέπτυνση κόκκων και σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μηχανισμών εξαρτάται από την ποσότητα των κραματικών προσθηκών και τις μεθόδους επεξεργασίας. Σε χάλυβες χύτευσης, μικρές ποσότητες τιτανίου ( $\leq 0.025\%$  Ti) είναι αποτελεσματικές στην εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού, επειδή η ανάπτυξη κόκκων του φερρίτη καθυστερεί (εικόνα 7) από την παρουσία νιτριδίων του τιτανίου.

Οι μικρές ποσότητες τιτανίου είναι επίσης αποτελεσματικές στην ανακρυστάλλωση κατά την ελεγχόμενη έλαση, επειδή τα νιτρίδια του τιτανίου καθυστερούν την ανάπτυξη των κόκκων του ανακρυσταλλωμένου φερρίτη. Στην συμβατική ελεγχόμενη έλαση, το τιτάνιο δίνει μια μέτρια εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού, η οποία είναι λιγότερη από αυτή που προσφέρει το νιόβιο, αλλά περισσότερη από το βανάδιο.



Εικόνα 7: Η εκτράχυνση των κόκκων του ωστενίτη, κατά τη διάρκεια αναθέρμανσης και μετά από θερμή έλαση, σε χρόνο παραμονής 30min. Η περιεκτικότητα σε τιτάνιο είναι μεταξύ 0,008 – 0,022 %.

Για τον μηχανισμό της σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης (εικόνα 8), απαιτείται επαρκής ποσότητα τιτανίου, ώστε να υπάρξει σχηματισμός καρβιδίων του τιτανίου (TiC). Μικρά ποσοστά τιτανίου (<0.025% Ti) σχηματίζουν κυρίως TiN (νιτρίδια τιτανίου), τα οποία επιδρούν στην ανάπτυξη των κόκκων του ωστενίτη αλλά με μικρή επίδραση στην σκλήρυνση με κατακρήμνιση επειδή τα κατακρημνίσματα που σχηματίστηκαν στο υγρό είναι πολύ χονδροειδή. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε τιτάνιο πραγματοποιείται σχηματισμός εγκλεισμάτων, σουλφιδίων Ti – Mn και στην συνέχεια σχηματισμός σφαιρικών καρβοσουλφιδίων,  $Ti_4C_2S_2$  (τα οποία προσδίδουν καλοσχηματισμένα σουλφίδια). Ο σχηματισμός του  $Ti_4C_2S_2$  συνοδεύεται ακολουθούμενο από τον σχηματισμό του καρβιδίου του τιτανίου (TiC), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους χάλυβες χαμηλούς σε περιεκτικότητα σε άνθρακα για σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης. Για να καθοριστεί η ποσότητα του τιτανίου που είναι διαθέσιμη για την σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης, η συνολική περιεκτικότητα σε τιτάνιο θα πρέπει να είναι διαθέσιμη για το σχηματισμό χονδροειδούς, αδιάλυτου νιτρίδιου του τιτανίου και καρβοσουλφίδια, που δεν συμμετέχουν στην σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης.



Εικόνα 8: Η ενίσχυση μέσω κατακρήμνισης σε σχέση με το μέσο όρο, του μεγέθους και του κλάσματος όγκου των κατακρημνισμάτων, σύμφωνα με τη θεωρία και πειραματικές παρατηρήσεις για δεδομένες μικροκραματικές προσθήκες.

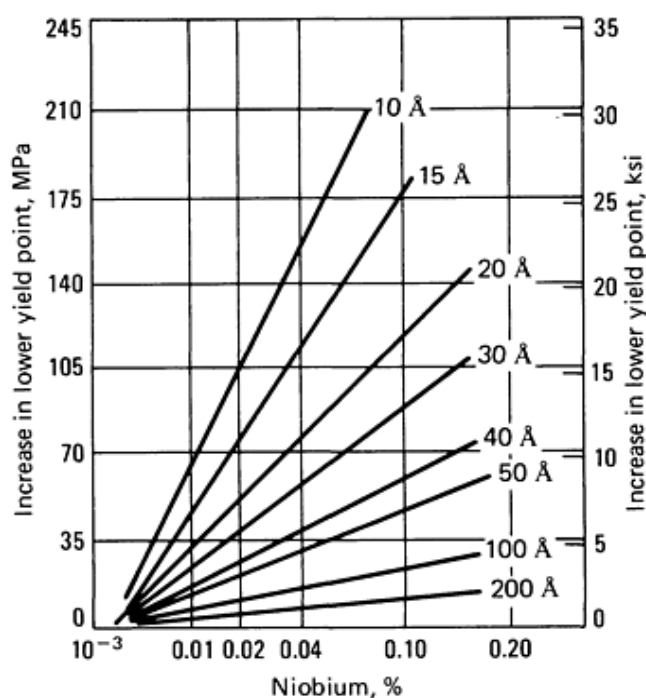
Από πειραματικές παρατηρήσεις, η αύξηση της μηχανικής αντοχής από κατακρημνισμένα καρβίδια του τιτανίου (TiC), κυμαινόταν έως 440MPa για πολύ λεπτά σωματίδια (με διάμετρο μικρότερη από 30 Å) και για σχετικά μεγάλο κλάσμα όγκου κατακρημνίσματος. Αν χρησιμοποιηθεί επαρκής προσθήκη τιτανίου, τότε τα καρβίδια του τιτανίου προσδίδουν περισσότερη σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης, και από το νιόβιο, και από το βανάδιο. Ωστόσο, επειδή τα υψηλά επίπεδα ενίσχυσης από κατακρήμνιση συνοδεύονται γενικά και από μειωμένη δυσθραυστότητα, η εκλέπτυνση των κόκκων είναι αναγκαία ώστε να υπάρξει αύξηση της δυσθραυστότητας. Το τιτάνιο αποτελεί μέτριο παράγοντα για την εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού (σε σχέση με τους χάλυβες θερμής έλασης με βανάδιο ή νιόβιο) και τα υψηλά επίπεδα ενίσχυσης από κατακρήμνιση στους μικροκραματωμένους χάλυβες με τιτάνιο οδηγούν σε χαμηλές τιμές δυσθραυστότητας. Χρησιμοποιώντας μόνο τιτάνιο ως στοιχείο ενίσχυσης σε φύλλα θερμής έλασης υψηλής αντοχής έχει οδηγήσει ανεπιθύμητες διακυμάνσεις των μηχανικών ιδιοτήτων [14].

### **Μικροκραματωμένοι χάλυβες με προσθήκη νιόβιου**

Όπως το βανάδιο, έτσι και το νιόβιο αυξάνει το όριο διαρροής μέσω της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση, το μέγεθος της αύξησης εξαρτάται από το μέγεθος και την ποσότητα των καρβιδίων νιόβιου που κατακρημνίστηκαν (εικόνα 9). Δηλαδή, όσο πιο πολύ ποσότητα και μεγαλύτερο μέγεθος καρβιδίων, τότε υπάρχει αύξηση του ορίου

διαρροής. Ωστόσο, το νιόβιο βοηθά περισσότερο την εκλέπτυνση των κόκκων του υλικού από το βανάδιο. Επομένως, το συνδυασμένο αποτέλεσμα της σκλήρυνσης μέσω κατακρήμνισης και της εκλέπτυνσης των κόκκων του φερρίτη, καθιστά το νιόβιο ένα πιο αποτελεσματικό μέσο αύξησης της αντοχής από το βανάδιο. Η συνήθης προσθήκη νιόβιου είναι περίπου από 0,02% έως 0,04%, η οποία είναι περίπου το 1/3 της βέλτιστης προσθήκης βαναδίου.

Η αύξησης αντοχής από το νιόβιο είναι 35 με 40 MPa ανά 0,01% προσθήκη νιοβίου. Αυτή η αύξησης της αντοχής του υλικού συνοδεύεται παράλληλα από σημαντική μείωση της δυσθραυστότητας εγκοπής, μέχρις ότου να αναπτυχθούν ειδικές διαδικασίες έλασης, και η περιεκτικότητα σε άνθρακα μειωνόταν για την αποφυγή σχηματισμού ανώτερου μπαινίτη. Γενικά, υψηλές θερμοκρασίες απόψυξης και ελαφρά πάσα παραμόρφωσης κατά την έλαση, πρέπει να αποφεύγονται στους μικροκραματωμένους χάλυβες με νιόβιο γιατί αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διάφορα μεγέθη κόκκων φερρίτη ή μικροδομή Widmanstätten, πράγμα που επηρεάζει την σκληρότητα του υλικού.



Εικόνα 9: Η επίδραση των καρβιδίων νιόβιου στο όριο διαρροής, για διάφορα μεγέθη καρβιδίων νιόβιου.

Οι χάλυβες με νιόβιο παράγονται από ελεγχόμενη έλαση, ανακρυστάλλωση με ελεγχόμενη έλαση, επιταχυνόμενη απόψυξη, και άμεση βαφή. Η ανακρυστάλλωση με ελεγχόμενη έλαση των χαλύβων με νιόβιου μπορεί να είναι αποτελεσματική χωρίς προσθήκη τιτανίου, ενώ η ανακρυστάλλωση με έλαση στους χάλυβες με βανάδιο απαιτεί τιτάριο για εκλέπτυνση των κόκκων. Επίσης, χρειάζεται πολύ λιγότερο νιόβιο για να γίνει ανακρυστάλλωση με έλαση, των χαλύβων προσθήκη νιόβιο – τιτανίου, σε υψηλές θερμοκρασίες. Προς το παρόν, υπεράκτιες πλατφόρμες χαλύβων με πάχος μέχρι 75mm και όριο διαρροής από 345 έως 415 MPa παράγονται συχνά [14].

### **3.5.3 Προηγμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (Advanced High Strength Steels)**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι Διφασικοί Χάλυβες (DP), οι Αυξανόμενης αντοχής-πλαστικότητας κατά την παραμόρφωση (TRIP), οι Σύνθετης μικροδομής Χάλυβες (CP) και οι Μαρτενσιτικοί Χάλυβες (MART).

Η μικροδομή των Διφασικών χαλύβων (Dual Phase - DP), αποτελείται από μια μαλακή μήτρα φερρίτη μέσα στην οποία είναι διασπαρμένες νησίδες σκληρού μαρτενσίτη ή ακόμη και ωστενίτη σε ποσοστό από 10-40%. Η αντοχή του χάλυβα εξαρτάται από το κλάσμα όγκου και τη σκληρότητα του μαρτενσίτη στη δομή του. Γι' αυτό το λόγο το όριο θραύσης του υλικού κυμαίνεται από 500-1200MPa [23]. Είναι χάλυβες χαμηλού ποσοστού C (0.05-0.2%κ.β.) που συνήθως περιέχουν Mn, Si και άλλα στοιχεία (Cr, Mo, V, Nb) σε μικρότερα ποσοστά. Εμφανίζουν ταυτόχρονα υψηλή μηχανική αντοχή και μέτρια ολκιμότητα, κάτι που τους καθιστά ιδανικούς σε εφαρμογές όπως στις ψυχρής διαμόρφωσης για ζάντες του αυτοκινήτου [24,26].

Οι χάλυβες Αυξανόμενης Αντοχής κατά την Παραμόρφωση (Transformation Induced Plasticity - TRIP), απέκτησαν το προσωνύμιο τους από τον μεταλλουργό Zackay [29] όταν εργάστηκε με χάλυβες υψηλής κραμάτωσης σε μια προσπάθεια μετατροπής τους σε πλήρως ωστενιτικούς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μικροδομή τους αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις: φερρίτη, μπαινίτη (bainite) και υπολειπόμενο ωστενίτη (retained austenite) ενώ συνήθως εμφανίζεται και μικρό ποσοστό μαρτενσίτη [24,32]. Τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε μια άλλη κατηγορία χαλύβων οι "TRIP - assisted multiphase steels" που ενώ ονομαστικά παραπέμπουν

στους TRIP διαφέρουν αρκετά διότι στην πραγματικότητα ανήκουν στην κατηγορία των DP περιέχοντας στη μικροδομή τους μικρά ποσοστά σε υπολειπόμενο ωστενίτη. Τα ποσοστά σε C και Si ή Al είναι μεγαλύτερα από τους DP ώστε να επιτευχθεί η πολυφασική (multiphase) δομή τους. Οι χάλυβες TRIP εμφανίζουν καλύτερες τιμές ολκιμότητας και ενδοτράχυνσης (work hardening) σε σύγκριση με τους DP της ίδιας μηχανικής αντοχής. Αυτό οφείλεται στην παρουσία του ωστενίτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ο οποίος μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη όταν το υλικό δεχθεί την απαραίτητη ενέργεια ενεργοποίησης για το μετασχηματισμό του σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης [16,24]. Οι χάλυβες χρησιμοποιούνται στις μπάρες προστασίας του αυτοκινήτου, στις κολώνες και γενικά σε όποιο σημείο απαιτείται αυξημένη παθητική ασφάλεια στο αμάξωμα. Περισσότερες λεπτομέρειες για το υλικό θα αναπτυχθούν παρακάτω.

Οι Σύνθετης μικροδομής Χάλυβες (Complex Phase - CP), είναι χάλυβες που εμφανίζουν πολύ μεγάλο όριο θραύσης καθώς και υψηλή αντίσταση στην εκτριβή [37]. Η μικροδομή τους είναι ιδιαιτέρως λεπτοκρυσταλλική και αποτελείται από φερρίτη, μπαινίτη και υπολειπόμενου ωστενίτη. Η εκλέπτυνση των κόκκων επιτυγχάνεται επιβραδύνοντας την ανακρυστάλλωση ή την κατακρήμνιση των στοιχείων μικροκραμάτωσης όπως του Ti ή του Nb. Σε σύγκριση με τους DP χάλυβες, οι CP χάλυβες εμφανίζουν εμφανώς υψηλότερο όριο διαρροής στο ίδιο περίπου όριο θραύσης, που κυμαίνεται από 800MPa και πάνω. Χαρακτηρίζονται για την υψηλή ενεργειακή απορρόφηση που επιδεικνύουν καθώς και για την υψηλή παραμένουσα ικανότητα παραμόρφωσης (residual deformation capacity). Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται σαν "μαξιλάρια" ενίσχυσης (pillar reinforcements), σε τμήματα του πλαισίου στήριξης (chassis parts), στις κολώνες (intrusion beams) κ.α. [25,37].

Όσον αφορά τους Μαρτενσιτικούς Χάλυβες (Martensitic - MART) είναι χάλυβες που παρουσιάζουν πλήρως μαρτενσιτική μικροδομή. Είναι χάλυβες χαμηλού C με προσθήκες Mn και Si σαν στοιχεία ισχυροποίησης του πλέγματος. Το όριο θραύσης των συγκεκριμένων υλικών κυμαίνεται από 800MPa έως 1700MPa. Σε σύγκριση με τυπικούς χάλυβες ψυχρής έλασης προσφέρουν υψηλότερο λόγο αντοχής-βάρους και για το λόγο αυτό η χρησιμοποίησή τους κρίνεται πιο οικονομική. Παρά την μεγάλη αντοχή τους δεν παρουσιάζουν καλή διαμορφωσιμότητα. Στο αυτοκίνητο χρησιμοποιούνται κυρίως στους προφυλακτήρες (pumper reinforcement beam),

εσωτερικές μπάρες προστασίες στις πόρτες (door intrusion beams), ελατήρια αναρτήσεων (springs) κ.α. [13].

### 3.5.4 Χάλυβες υψηλότερης αντοχής (Higher Strength Steels)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι Φερριτικοί-Μπαινιτικοί Χάλυβες (FB), οι χάλυβες που σχηματίζουν διδυμίες κατά την παραμόρφωση (TWIP), οι θερμής διαμόρφωσης (HF) και οι Θερμικά κατεργασμένοι μετά τη διαμόρφωση (PFHT).

Η μικροδομή των Φερριτικών-Μπαινιτικών Χαλύβων (Ferritic-Bainitic - FB) αποτελείται από μικροκρυσταλλικούς κόκκους φερρίτη και μπαινίτη. Η αύξηση της μηχανικής αντοχής σε αυτού του είδους τους χάλυβες πραγματοποιείται τόσο με την εκλέπτυνση του μεγέθους των κόκκων όσο και με τον μηχανισμό σκλήρωσης μέσω σωματιδίων δεύτερης φάσης που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο μπαινίτης. Διατίθενται συνήθως σαν προϊόντα θερμής έλασης. Παρουσιάζουν πολύ καλή συγκολλησιμότητα, καλή συμπεριφορά κατά την σύγκρουση (crash performance) και καλή αντοχή στην κόπωση [31].

Οι χάλυβες που σχηματίζουν διδυμίες κατά την παραμόρφωση (Twinning-induced plasticity - TWIP) περιέχουν στη σύνθεσή τους υψηλό ποσοστό Mn (17-24% κ.β.) που κάνει τον χάλυβα να παρουσιάζει πλήρως ωστενιτική μικροδομή σε θερμοκρασία δωματίου. Μεγάλο ποσοστό της πλαστικότητας κατά την παραμόρφωση οφείλεται στο σχηματισμό των διδυμιών. Σε αυτόν τον μηχανισμό παραμόρφωσης οφείλουν και το όνομά τους αυτοί οι χάλυβες. Οι διδυμίες προκαλούν υψηλό βαθμό ακαριαίας σκλήρωσης (τιμή n-συντελεστής ενδοτράχυνσης) όσο η μικροδομή γίνεται περισσότερο λεπτοκρυσταλλική. Τα όρια των διδυμιών λειτουργούν σαν όρια κόκκων και ισχυροποιούν τον χάλυβα. Οι χάλυβες TWIP συνδυάζουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή με εξαιρετικά υψηλή ολκιμότητα. Το όριο θραύσης ξεπερνά το 1000MPa [31].

Οι χάλυβες θερμής διαμόρφωσης (Hot-formed - HF) δημιουργήθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990 για να παραχθούν κάποια απλά τμήματα του αμαξώματος όπως οι κολώνες των πορτών (door beams) και οι προφυλακτήρες (bumper beams). Επιλέχθηκε η διαδικασία αυτή για να ξεπεραστούν κάποιες τυπικές δυσκολίες που

προκύπτουν κατά την ψυχρή διαμόρφωση (cold stamping). Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν συνήθως B και Mn και εμφανίζουν υψηλή αντοχή (πάνω από 1600MPa), χαμηλή επαναφορά στην αρχική κατάσταση μετά από εν ψυχρώ παραμόρφωση (springback) και μειώνουν το πάχος του ελάσματος. Υπάρχουν δύο τρόποι παραγωγής αυτού του τύπου χάλυβα ο άμεσος (direct) και ο έμμεσος (indirect). Στον άμεσο τρόπο ο χάλυβας ωστενιτοποιείται σε θερμοκρασία 900-950 °C για 4-10 λεπτά. Σε θερμοκρασία 650-850 °C το υλικό εμφανίζει εξαιρετική διαμορφωσιμότητα και διαμορφώνεται στο επιθυμητό σχήμα με κοίλανση (stamped). Κατά την απόψυξη ασκείται πίεση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Έπειτα αποψύχεται απότομα με νερό ώστε να επιτευχθεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός.

Κατά τον έμμεσο (indirect) τρόπο παραγωγής το εξάρτημα υπόκειται σε κοίλανση (drawn) χωρίς θέρμανση σε ποσοστό 90-95% του τελικού του σχήματος σε ένα κοινό καλούπι και στη συνέχεια βελτιστοποιούνται οι άκρες του. Έπειτα το υλικό θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε συνεχές φούρνο και ισχυροποιείται μέσα στο καλούπι (die). Ο λόγος του επιπρόσθετου βήματος της θερμικής κατεργασίας στην διαδικασία είναι για να επεκταθούν τα όρια της διαμορφωσιμότητας για σύνθετης μορφολογίας εξαρτήματα [12].

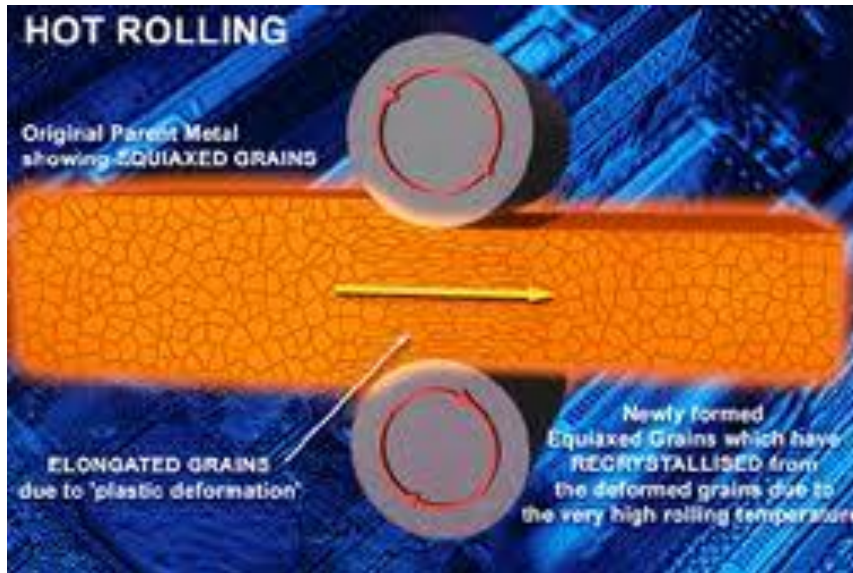
Οι χάλυβες Θερμικά κατεργασμένοι μετά την διαμόρφωση (Post-Forming Heat-Treated steels - PFHT) παράγονται με μια εναλλακτική μέθοδο κατά την οποία τα τμήματα επεξεργάζονται θερμικά μετά την διαμόρφωσή τους [20]. Η θέρμανση μπορεί να γίνει τόσο με συμβατικό όσο και με επαγωγικό φούρνο. Η κοίλανση (stamping) γίνεται όταν το υλικό έχει χαμηλή αντοχή και έπειτα αυξάνεται η αντοχή του κατά την θερμική κατεργασία. Αυτή η μέθοδος δίνει στους χάλυβες υψηλές τιμές αντοχής.

### **3.6 Θερμικές κατεργασίες διαμόρφωση των μετάλλων – θερμή έλαση**

Τα ημιτελή προϊόντα που παράγονται στη μηχανή συνεχούς χύτευσης μεταφέρονται σε ελασματοουργείο (rolling mill), όπου θα αναθερμανθούν και θα γίνει θερμή έλαση τους στη μορφή και στις διαστάσεις των τελικών προϊόντων. Στην περίπτωση των

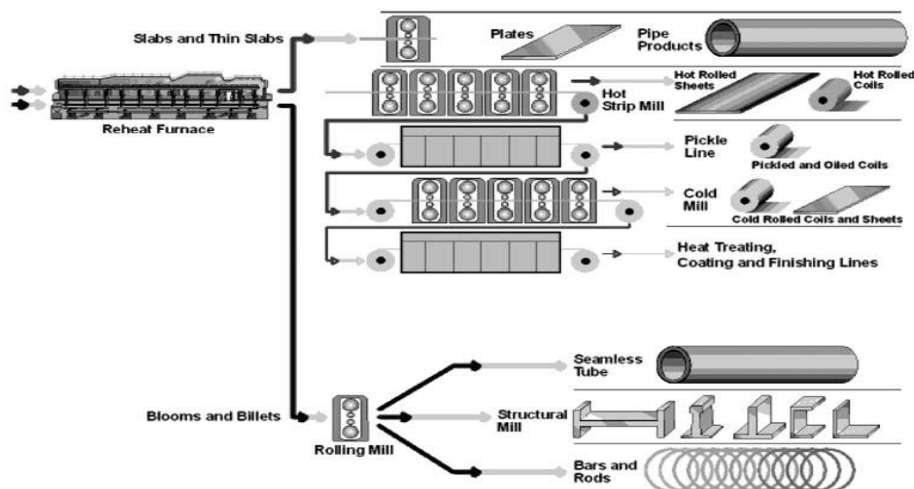


υποευτηκτοειδών κοινών χαλύβων τα ημιτελή προϊόντα είναι οι μπιγιέτες. Καμία αλλαγή χημικής σύστασης δεν γίνεται σε αυτή την διεργασία.



Εικόνα 10: Απεικόνιση συμπεριφοράς της μικροδομής χάλυβα κατά την θερμή έλαση.

Το ελασματοουργείο μπορεί να είναι στον ίδιο χώρο με τις εγκαταστάσεις χαλυβοποίησης ή και να αποτελεί ανεξάρτητη εγκατάσταση. Οι χάλυβες θερμής έλασης διακρίνονται σε πλατέα προϊόντα (flat products), που παράγονται από slabs και επιμήκη προϊόντα (long products), που παράγονται από κορμούς ή μπιγιέτες [10].



Εικόνα 11: παραγωγή τελικών προϊόντων με θερμή έλαση [10].

Τα ημιτελή προϊόντα θερμαίνονται σε φούρνο αναθέρμανσης, μέχρις να κοκκινίσουν (περίπου 1150-1200°C), για να είναι δυνατή η πλαστική εν θερμώ παραμόρφωση τους.

Μετά την έξοδο από το φούρνο αναθέρμανσης τα ημιτελή προϊόντα περνούν διαδοχικά από σειρές ελάστρων (αρχικά, μεσαία, τελικά). Σε κάθε έλαστρο υπάρχουν ράουλα που κινούνται με κατάλληλη διάταξη και μορφή κίνησης έτσι ώστε ο ελάσιμος σίδηρος να πιέζεται περνώντας ανάμεσα τους και να αποκτά συγκεκριμένο σχήμα. Με αυτά τα διαδοχικά μορφοποιείται όλο και πλησιέστερα προς την τελική μορφή των παραγόμενων προϊόντων [10].



*Εικόνα 12: Θερμή έλαση μπιγιέτας για παραγωγή χαλύβων.*

### **3.6.1 Χάλυβες θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία**

Στο παρελθόν, η πλειονότητα των χαλύβων ήταν προϊόντα θερμής έλασης, χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία.

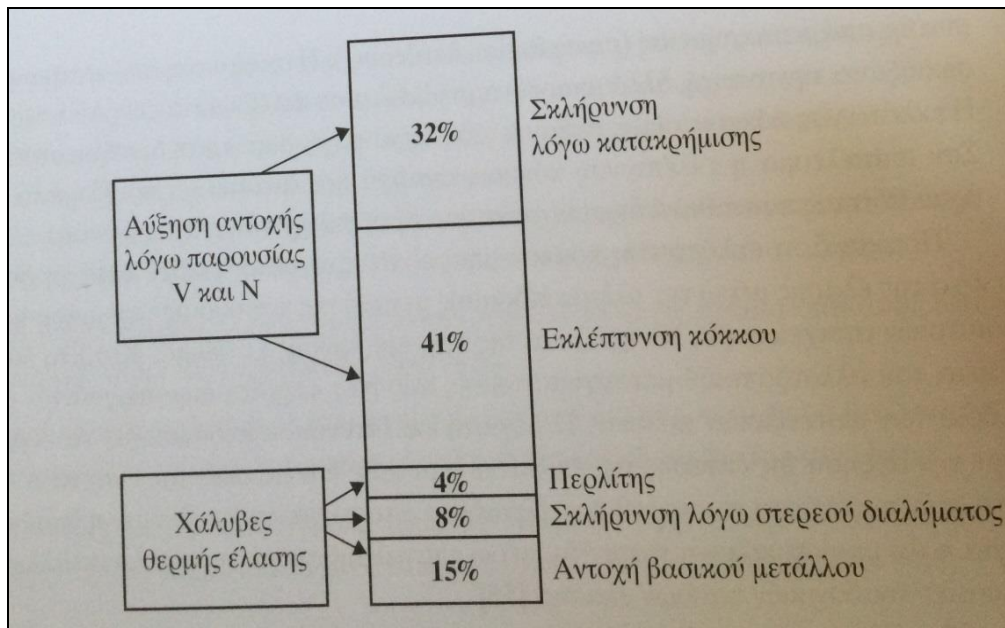
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε αυτήν την περίπτωση είναι ευθεία συνάρτηση της χημικής σύνθεσης. Το όριο διαρροής για παράδειγμα συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Οι απαιτήσεις, όμως, υψηλών αντοχών οδήγησαν στην ανάγκη μεγαλύτερης περιεκτικότητας άνθρακα, με συνέπεια τη δυσκολία συγκολλησιμότητας, αλλά και προβλήματα στην ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα του υλικού.

Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων συγκολλησιμότητας και υψηλής ολκιμότητας, εμφανίστηκαν οι μικροκραματωμένοι χάλυβες θερμής έλασης (micro alloyed steels), όπου με την αύξηση της περιεκτικότητας σε μαγγάνιο (Mn) προσθήκη στοιχείων όπως το βανάδιο (V), το νιόβιο (Nb) και άλλα σε πολύ μικρές ποσότητες (λιγότερο από 0,1%), γίνεται εφικτή η μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, χωρίς μείωση των μηχανικών αντοχών.

Με την προσθήκη βαναδίου, στην ουσία, γίνεται συνδυασμός της ευεργετικής επίδρασης των μηχανισμών εκλέπτυνσης των κόκκων (grain refinement) και της σκλήρυνσης από κατακρήμνιση (precipitation hardening). Η σκλήρυνση από κατακρήμνιση αυξάνει την αντοχή, αλλά μπορεί να συμβάλλει σε προβλήματα ευθραυστότητας. Η εκλέπτυνση κόκκου, έχει σαν αποτέλεσμα, να αντιδρά και να αναστέλλει προβλήματα ευθραυστότητας που πιθανά δημιουργούνται από τη σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Πρακτικά, η εκλέπτυνση κόκκου μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της έλασης μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της παρουσίας των μικροκραματικών στοιχείων (V, Nb ή Ti) και της παραμόρφωσης εν θερμώ.

Η εκλέπτυνση του κόκκου, μπορεί περαιτέρω να ενισχυθεί με επιταχυνόμενη ψύξη μετά το τέλος της θερμής έλασης. Η υπόψυξη του ωστενίτη πολλαπλασιάζει τη δημιουργία πυρήνων φερρίτη, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον ρυθμό ανάπτυξης τους. Με αυτό τον τρόπο, έχουμε σχηματισμό πολλών μικρών κόκκων. Επίσης, σημαντική ενίσχυση των αντοχών έχουμε μέσω της κατακρήμνισης μικροκραματικών στοιχείων στο φερρίτη (καρβονονιτρίδια ή καρβίδια). Από τη στιγμή που η διαλυτότητα τους στο φερρίτη είναι πολύ μικρότερη από ότι στον ωστενίτη, αυτός ο ισχυρός υπερκορεσμός αποτελεί την κινητήρια δύναμη της κατακρήμνισης [10].



Εικόνα 13: Παράγοντες αύξησης αντοχής σε χάλυβες θερμής έλασης [10].

### 3.7 Μηχανισμοί σκλήρυνσης χαλύβων

Η σκλήρυνση των μετάλλων και των κραμάτων μπορεί να εκφραστεί με την αύξηση του ορίου διαρροής  $\sigma_y$  που τη συνοδεύει, προκειμένου να δημιουργηθούν υλικά στιβαρότερα και ανθεκτικότερα. Με την αύξηση της σκληρότητας, έχουμε μείωση της ολκιμότητας, η οποία εγκυμονεί κινδύνους θραύσης σε πολλές περιπτώσεις που το υλικό καταπονείται υπό τάση γειτονική του ορίου διαρροής του.

Η 5 βασικές κατηγορίες σκλήρυνσης των μετάλλων είναι:

- Σκλήρυνση με επίδραση του μεγέθους των κόκκων
- Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος
- Σκλήρυνση με κατακρήμιση
- Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση
- Σκλήρυνση με μετασχηματισμούς φάσεων

### 3.7.1 Σκλήρυνση με επίδραση του μεγέθους των κόκκων

Η αντοχή στα ανοπτημένα πολυκρυσταλλικά μέταλλα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των κόκκων. Η αύξηση της αντοχής με μείωση του μεγέθους του κόκκου εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από γεωμετρικούς λόγους, που συνδέονται με την δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης.

Το όριο διαρροής των πολυκρυσταλλικών σωμάτων αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος του κόκκου. Τα όρια των κόκκων είναι, πράγματι, εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών [1].

Η συναρτησιακή σχέση μεταξύ ορίου διαρροής και του μεγέθους του κόκκου είναι γνωστή ως σχέση των Hall – Petch:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y \cdot d^{-1/2}$$

Όπου  $d$  είναι η μέση διάμετρος κόκκου,  $\sigma_y$  είναι το όριο διαρροής,  $\sigma_i$  είναι η τάση τριβής που αντιστέκεται στην μετακίνηση των διαταραχών και  $k_y$  σταθερά [8].

#### Έλεγχος μεγέθους κόκκου

Επειδή ένα λεπτόκοκκο υλικό είναι επιθυμητό λόγω της υψηλής αντοχής σε θραύση και ολκιμότητα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τους μηχανισμούς, που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να παράγουμε ένα λεπτόκοκκο υλικό.

Η ανάπτυξη του μεγέθους κόκκων είναι μια διεργασία που ενεργοποιείται με την θερμότητα, κατά αυτόν τον τρόπο το μέγεθος κόκκου ωστενίτη στους χάλυβες εξαρτάται τόσο από το χρόνο όσο και από την θερμοκρασία.

Άλλοι παράγοντες είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την μετακίνηση ορίων κόκκων, όπως η συγκέντρωση κραματικών στοιχείων στα όρια κόκκων που δίνουν αύξηση της αντίστασης μετακίνησης (frictional drag) λόγω τριβής στα μετακινούμενα όρια και η παρουσία κατακρημνισμάτων δεύτερης φάσης, τα οποία ελαττώνουν την επιφάνεια ορίου κόκκων και κατά αυτό τον τρόπο την ολική ενέργεια των διεπιφανειών κόκκων.

Τα κατακρημνίσματα δεύτερης φάσης, για παράδειγμα AlN, NbC, Ti(CN), τα οποία

χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές κατηγορίες χαλύβων, ειδικά ώστε να προκαλέσουν εκλέπτυνση μεγέθους κόκκων, ενεργούν ώστε να σταματήσουν τα μετακινούμενα όρια κόκκων και κατά αυτό τον τρόπο διατηρούν ένα λεπτομερές υλικό.

Η σχέση μεταξύ του κρίσιμου ακτίνας σωματιδίου δεύτερης φάσης  $r_c$  που απαιτείται για να παρεμποδίσει (pin) κόκκους με ακτίνα R είναι:

$$r_c = 6 \cdot Rf / \pi \cdot (3 / 2 - 2 / Z)^{-1}$$

Όπου f είναι το κλάσμα κατά όγκο (volume fraction) των σωματιδίων δεύτερης φάσης και Z ο συντελεστής ανομοιογένειας κόκκου, που ορίζεται αν ο λόγος της ακτίνας των αναπτυσσόμενων κόκκων προς την ακτίνα κόκκων μητρικού (αρχικού) υλικού [8].

### **3.7.2 Σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος**

Η σκλήρυνση που προκαλείται από τον σχηματισμό ενός στερεού διαλύματος (solid solution strengthening) οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων του διαλυμένου στοιχείου και των διαταραχών. Τα άτομα του διαλυμένου στοιχείου εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών και κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνουν τη σκληρότητα του υλικού. Υπάρχουν δύο μέθοδοι σκλήρυνσης στερεού διαλύματος, στερεό διάλυμα παρεμβολής και στερεό διάλυμα αντικατάστασης [8].

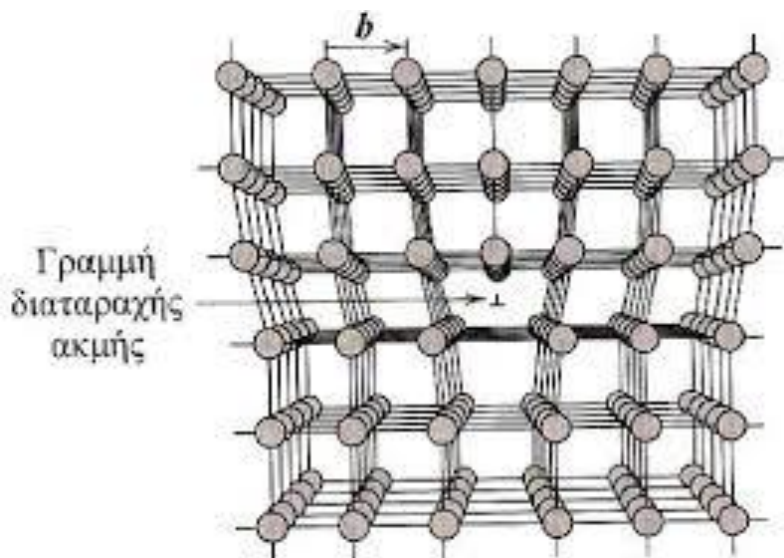
#### **Στερεό διάλυμα παρεμβολής**

Τα άτομα (π.χ. άνθρακας, άζωτο) που σχηματίζουν στερεό διάλυμα παρεμβολής, έχουν μικρό μέγεθος (μικρότερη ατομική ακτίνα από το μητρικό στοιχείο του υλικού) και σχηματίζουν νέφη ή ατμόσφαιρες Cottrell στην διεσταλμένη περιοχή των διαταραχών. Συγκεντρώνονται δηλαδή στην εφελκυσμένη περιοχή μιας διαταραχής ακμής και επειδή ο τύπος αυτός της αλληλεπίδρασης συνοδεύεται από μείωση της ελευθέρως ενθαλπίας μέσα στον κρύσταλλο, οι διαταραχές δεν μπορούν εύκολα να εγκαταλείψουν, κατά την κίνηση τους, τις ατμόσφαιρες αυτές. Οι διαταραχές τότε "καρφώνονται" (pinning of dislocations).

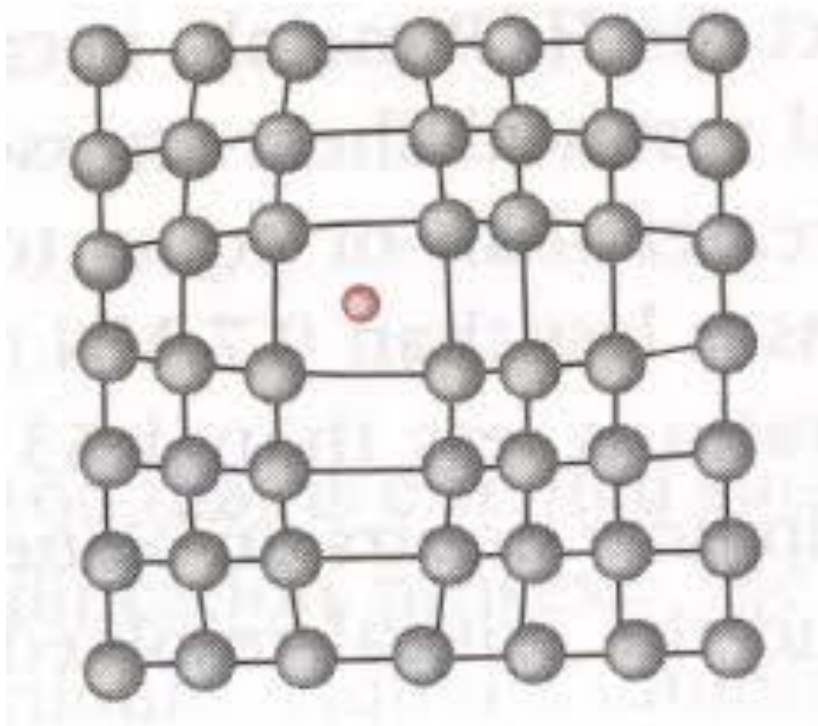
Τα άτομα παρεμβολής, ακόμη και ως μεμονωμένα στο εσωτερικό ενός στερεού διαλύματος, δημιουργούν λόγω τοπικής παραμορφώσεως του πλέγματος πεδία τάσεων τα οποία εμποδίζουν επίσης την κίνηση των διαταραχών και προκαλούν σκλήρωση. [1]

Εκτός από την σκλήρωση που προκαλούν τα στοιχεία παρεμβολής, μπορούν να επηρεάσουν την ένταση άλλων μηχανισμών σκλήρωσης:

- Μπορούν να συμβάλλουν σε σκλήρωση μέσω κατακρήμνισης, κάτω από δεδομένες συνθήκες θερμικών κατεργασιών. Όταν αυτό συμβεί, η σκλήρωση από το στερεό διάλυμα παρεμβολής θα ελαττωθεί.
- Με την αλλαγή των χαρακτηριστικών μετασχηματισμού, τα στοιχεία παρεμβολής, μπορούν σημαντικά να μεταβάλλουν τις λαμβανόμενες μικροδομές, για παράδειγμα στους χάλυβες, μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό μπαινίτη ή μαρτενσίτη αντί για φερρίτη, μία και αλλάζουν την θερμοκρασία μετασχηματισμού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Με την ελάττωση της θερμοκρασίας του μετασχηματισμού, μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην ελάττωση του μεγέθους κόκκου του μετασχηματιζόμενου προϊόντος και στην αύξηση της πυκνότητας διαταραχών [8].



Εικόνα 14: Παράδειγμα γραμμή διαταραχής ακμής [36].



Εικόνα 15: Παράδειγμα στερεού διαλύματος παρεμβολής [39].

### **Στερεό διάλυμα αντικατάστασης**

Στα στερεά διαλύματα αντικατάστασης η γραμμή διαταραχής θεωρείται σαν μια τεντωμένη χορδή, η οποία δονείται και ακτινοβολεί ελαστική ενέργεια, κάθε φορά που συναντά ένα άτομο αντικαταστάσεως. Η ενέργεια αυτή πρέπει να παρασχεθεί με πρόσθετο τάση.

Κατά τον Cottrell, η κίνηση των διαταραχών μπορεί να συμπαρασύρει άτομα αντικαταστάσεως, τα οποία κατά προτίμηση, καταλαμβάνουν θέσεις του πλέγματος κοντά στις διαταραχές, όταν η αλληλεπίδραση ατόμων αντικαταστάσεως – διαταραχής οδηγεί σε μείωση της ενέργειας. Έχουμε δηλαδή και στην περίπτωση αυτή μία ‘ατμόσφαιρα’ Cottrell με άτομα αντικαταστάσεως [1].

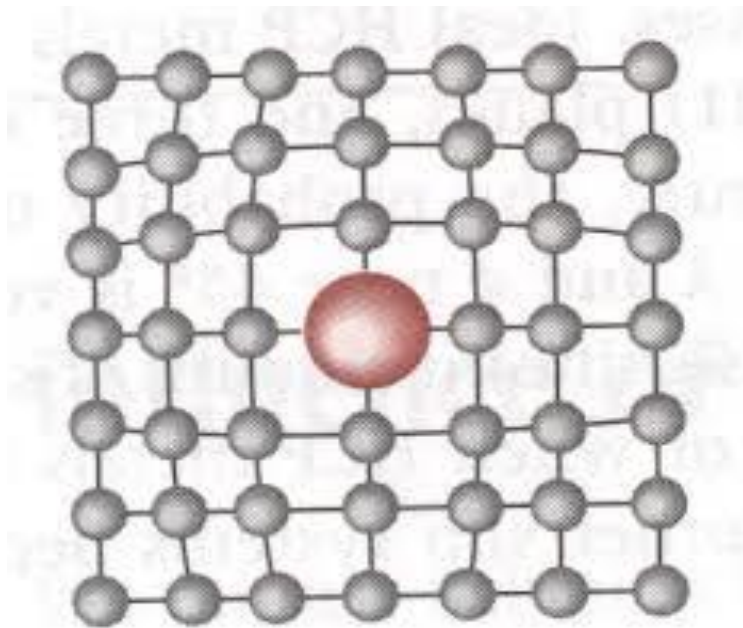
Αποδεικνύεται ότι ο βαθμός της σκλήρωσης μέσω στερεών στοιχείων αντικατάστασης εξαρτάται από τη διαφορά μεγέθους ατομικής ακτίνας το διαλύτη και των διαλυόμενων ατόμων. Σε γενικές γραμμές, ο ρυθμός αύξησης της αντοχής με την σύσταση δίνεται από την σχέση:



$$\frac{d\tau}{dc} \propto \left( \frac{1}{a} + \frac{dc}{da} \right)^n$$

Όπου  $\tau$  είναι η διατμητική τάση,  $a$  η κρυσταλλική παράμετρος του στερεού διαλύματος και  $c$  είναι η συγκέντρωση του στοιχείου αντικατάστασης.

Τα στοιχεία αντικατάστασης προκαλούν συμμετρικές παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος του διαλύτη και αυτό οδηγεί σε ήπια σκλήρωση [8].



*Εικόνα 16: Παράδειγμα στερεού διαλύματος αντικατάστασης μεγαλύτερο από τα άτομα του διαλύτη [39].*

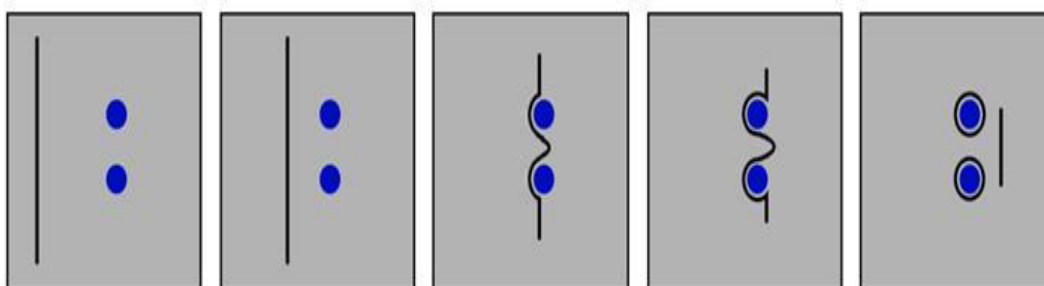
### 3.7.3 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

Η σκλήρωση με κατακρήμνιση μιας δεύτερης φάσεως σε λεπτό διαμερισμό είναι από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους σκλήρωσης. Αν και η κατακρήμνιση

απομακρύνει από την μήτρα του κράματος ένα κραματικό στοιχείο και επαλείφει επομένως την σκλήρωση στερεού διαλύματος, η κατακρήμνιση υπερκαλύπτει αυτή τη μείωση της σκληρότητας.

Τα κατακρημνίσματα είναι πολύ αποτελεσματικά εμπόδια στην κίνηση διαταραχών, γιατί είναι σκληρά σωματίδια με δομή συνήθως πολύ διαφορετική από αυτής της μήτρας, ώστε οι διαταραχές δεν μπορούν να τα διασχίσουν. Δηλαδή, δεν ακολουθούν την πλαστική παραμόρφωση της μαλακής μήτρας.

Στην περίπτωση που τα κατακρημνίσματα είναι ευμεγέθη, τότε οι διαταραχές καμπυλώνονται γύρω τους και τα παρακάμπτουν, μ' ένα μηχανισμό που θυμίζει τις πηγές Frank – Read.



*Εικόνα 17: Κίνηση διαταραχής γύρω από ευμεγέθη κατακρημνίσματα*

Η διαταραχή καμπυλώνεται γύρω από τα σωματίδια και αφήνει στο πέρασμα της έναν δακτύλιο πρισματικής διαταραχής γύρω από τα κατακρημνίσματα, κάνοντας έτσι το πέρασμα της επόμενης διαταραχής ακόμα δυσκολότερο. Η απόσταση μεταξύ σωματιδίων ουσιαστικά μειώνεται και επέρχεται πολύ γρήγορα σκλήρωση.

Αν τα σωματίδια είναι λεπτότερα και πυκνότερα μέσα στη μήτρα, τότε η σκλήρωση είναι πιο αποτελεσματική. Εάν όμως, είναι πολύ λεπτά και μη συνεκτικά με τη μήτρα, τότε οι διαταραχές δεν μπορούν να καμφθούν σε τόσο μικρές ακτίνες καμπυλότητας, της τάξεως της ακτίνας του σωματιδίου, με αποτέλεσμα να τα διασχίσουν θραύοντας τα [1,9].

### 3.7.4 Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση

Μια κλασσική μέθοδος αύξησης των αντοχών των μεταλλικών υλικών, είναι η ενδοτράχυνση. Σε αυτήν την περίπτωση, εκμεταλλευόμαστε την αύξηση αντοχής και σκληρότητας που επέρχεται, αν ένα υλικό παραμορφωθεί πλαστικά, δηλαδή πέραν του ορίου διαρροής του, χωρίς να φτάσουμε στο σημείο της (αρχικής) εφελκυστικής αντοχής του. Σε καταπονήσεις αυτού του είδους, οι διαταραχές κινούνται στο εσωτερικό των κόκκων των μεταλλικών υλικών. Λόγω διαφοράς προσανατολισμού των επιπέδων ολίσθησης, τέμνονται μεταξύ τους, αντιδρούν και εμποδίζουν η μία την κίνηση της άλλης, με συνέπεια την αύξηση της πυκνότητας τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά προσανατολισμού των επιπέδων ολίσθησης, τόσο μεγαλύτερο είναι το φαινόμενο.

Κατά την ενδοτράχυνση π.χ. με ολκή ή με ψυχρή έλαση, οι κόκκοι επιμηκύνονται κατά τη διεύθυνση της έλασης. Μακροσκοπικά το υλικό είναι ανισότροπο και παρουσιάζει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες κατά διεύθυνση κάθετη ή παράλληλη προς τη διεύθυνση της έλασης [10].

Μετά την εν ψυχρώ κατεργασία τους, τα μέταλλα, που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση, παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από την αρχική, υψηλότερα όρια διαρροής και θραύσης, και μικρότερη πλαστικότητα και δυσθραυστότητα. Λόγω της υψηλής σκληρότητας και της μικρής του πλαστικότητας, το ενδοτραχυμένο μέταλλο, πιθανόν, να ρωγματοθεί.

Η συνεισφορά της ενδοτράχυνσης στη συνολική αντίσταση, λόγω παρεμπόδισης της κίνησης των διαταραχών, είναι σημαντική και αυξάνεται με την παραμόρφωση [7]. Η πυκνότητα των διαταραχών αρχίζει να αυξάνει, γιατί πολλές από αυτές αγκυρώνονται σε διάφορα εμπόδια πριν προλάβουν να βγουν έξω από τον κρύσταλλο, ενώ οι πηγές Frank – Read εξακολουθούν να γεννούν νέες διαταραχές. Έτσι η παραμόρφωση γίνεται συνεχώς δυσκολότερη [1].

Ο βαθμός της εν ψυχρώ πλαστικής παραμόρφωσης εκφράζεται ως % ποσοστό της ψυχρής κατεργασίας. Στην Ευρώπη, χρησιμοποιείται ο όρος βαθμός ενδοτράχυνσης (e), και στις Η.Π.Α., ο όρος συντελεστής ελάττωσης της διατομής (n), οι οποίοι ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$e = (A_o - A_d) / A_d * 100$$

$$n = (A_o - A_d) / A_o * 100$$

Όπου  $A_o$  η διατομή του υλικού πριν την παραμόρφωση και  $A_d$  η διατομή του υλικού μετά την παραμόρφωση [6].

Τα αποτελέσματα της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση μπορούν να εξαλειφθούν με θερμική επεξεργασία ανόπτησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανακτήσουμε κάπως την ολκιμότητα του υλικού και αντίστοιχα να μειωθεί η σκληρότητα του. Σε χαμηλή θερμοκρασία έχουμε μείωση της πυκνότητας των διαταραχών και ελαφρά μείωση της σκληρότητας, δηλαδή αποκατάσταση του υλικού. Πάνω από μια θερμοκρασία έχουμε ανακρυστάλλωση και ισχυρή μείωση της σκληρότητας. Για συμβεί όμως αυτό, χρειάζεται αρκετή ενδοτράχυνση το υλικό [10].

### 3.7.5 Σκλήρυνση με επίδραση μετασχηματισμών φάσεων

Στους χάλυβες, οι επιδράσεις των μετασχηματισμών εξαρτώνται σημαντικά από την θερμοκρασία όπου συμβαίνει ο μετασχηματισμός. Αυτό συμβαίνει μια και η θερμοκρασία μετασχηματισμού επηρεάζει, όλους τους μηχανισμούς σκλήρωσης, συνήθως αυξάνοντας την επίδραση τους:

- Χαμηλότερη θερμοκρασία μετασχηματισμού, τόσο πιο λεπτόκοκκο είναι το μέγεθος κόκκου του προϊόντος μετασχηματισμού.
- Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία μετασχηματισμού, τόσο μεγαλύτερη η πυκνότητα διαταραχών, επίδραση που χρησιμοποιούμε συχνά στις φερριτο-περλιτικές δομές.
- Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία μετασχηματισμού, τόσο πιο λεπτομερής η κατακρήμνιση, όπως υποδηλώνει η επίδραση των κραματικών στοιχείων, που χαμηλώνουν την θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού  $M_s$ , για ένα δεδομένο ποσοστό άνθρακα και κατά αυτό τον τρόπο αυξάνεται η σκληρότητα.
- Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία μετασχηματισμού, τόσο πιο μεγάλη η τάση να κρατηθεί σε υπέρκορη κατάσταση η κραματική προσθήκη, οδηγώντας σε αυξημένη σκλήρωση λόγω στερεού διαλύματος. Αυτό το φαινόμενο παίζει σημαντικό ρόλο στην σκλήρωση των μπαινίτη [9].

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 Περιγραφή υλικού

Το υλικό το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι χάλυβας υψηλής αντοχής – χαμηλής κραμάτωσης ( high strength – low alloy) με κραματικές προσθήκες τιτανίου και βαναδίου. Παράγεται με θερμή έλαση και χρησιμοποιείται κυρίως σε εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας. Η χημική σύσταση του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Χημικό στοιχείο	Περιεκτικότητα (%)
C	≥0,011
N	≥0,0027
S	≥0,004
Ti	≥0,012
V	≥0,088
Fe	Balance

*Πίνακας 3: Χημική σύσταση υλικού.*

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται η χημική σύσταση, στο υλικό.

## 4.2 Προετοιμασία δοκιμίων

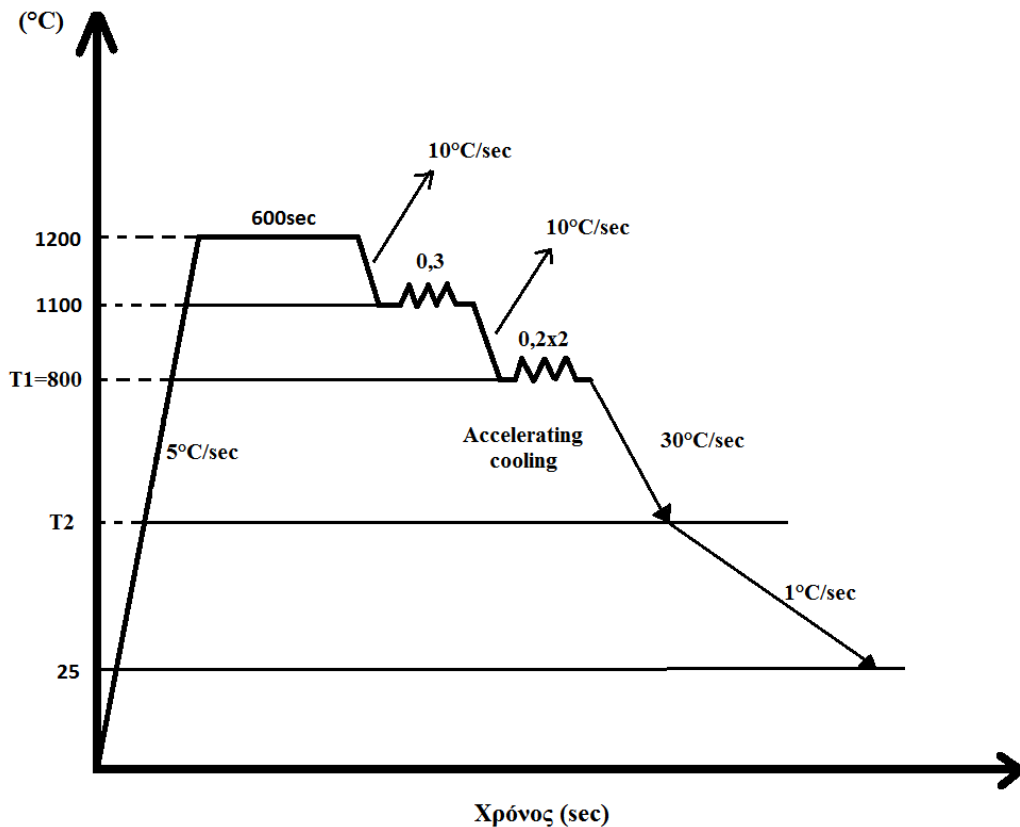
Η προετοιμασία των δοκιμίων περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες οι οποίες έλαβαν χώρα ώστε να γίνουν μετρήσεις για τις μηχανικές αντοχές του υλικού και παρατήρηση της μικροδομής του. Ο συνολικός αριθμός των δοκιμίων ήταν 8, εκ των οποίων τα 4 τέσσερα είχαν προσθήκη μόνο τιτανίου, ενώ τα άλλα 4 προσθήκη τιτανίου και βαναδίου. Ο αριθμός αυτός προκύπτει από τις διαφορετικές κατεργασίες θερμής έλασης που υπέστησαν τα δοκίμια αυτά, όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

### 4.2.1 Θερμικές κατεργασίες – Θερμή έλαση

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται θερμή έλαση σε όλα τα δοκίμια. Αρχικά, γίνεται πλήρως ομογενοποίηση του υλικού στους 1200°C για χρόνο 600sec. Στην συνέχεια γίνεται απόψυξη με ταχύτητα 10°C/sec. Όταν φτάσει η θερμοκρασία στους 1100°C πραγματοποιείται έλαση και τα δοκίμια περνάνε μέσα από πάσα όπου υφίστανται παραμόρφωση 20%. Συνεχίζεται η διεργασία με ταχύτητα απόψυξης 10°C/sec και στους 800°C (FT) περνούν τα δοκίμια από 2 πάσα στα οποία υφίστανται παραμόρφωση 20% (της προηγούμενης παραμόρφωσης) σε κάθε πάσο.

Μετά την έλαση, τέσσερα δοκίμια χάλυβα (με προσθήκη τιτανίου) αποψύχονται στις θερμοκρασίες 750°C, 650°C, 550°C και 450°C αντίστοιχα το καθένα, με παροχή συμπιεσμένου αέρα, και στην συνέχεια πραγματοποιείται απόψυξη με ταχύτητα 1°C/sec μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα άλλα τέσσερα δοκίμια χάλυβα (με προσθήκη τιτανίου και βαναδίου) αποψύχονται και αυτά στις θερμοκρασίες 750°C, 650°C, 550°C και 450°C αντίστοιχα για το καθένα, με παροχή συμπιεσμένου αέρα, και στην συνέχεια γίνεται απόψυξη με ταχύτητα 1°C/sec μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Παρακάτω φαίνεται ο θερμικός κύκλος των δοκιμίων χάλυβα HSLA.



Εικόνα 18: Θερμικός κύκλος των δοκιμίων χάλυβα HSLA

Η θερμοκρασία T1 στο διάγραμμα είναι διαφορετική για κάθε δοκίμιο και αποτελεί την θερμοκρασία απόψυξης του κάθε δοκιμίου μετά την δεύτερη έλαση (800°C).

Με αυτές τις θερμικές κατεργασίες, στόχος ήταν να παρατηρηθεί η επίδραση τους, μαζί με αυτήν των στοιχείων προσθήκης (τιτανίου, βανάδιο) στην μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

#### 4.2.2 Ονομασία δοκιμίων

Τα χάλυβδινα δοκίμια με προσθήκη τιτανίου αποτελούν την ομάδα Α και ονομάστηκαν K5, P5, A5 και J6, ενώ τα δοκίμια με προσθήκη τιτανίου – βαναδίου αποτελούν την ομάδα Β και ονομάστηκαν Q3, Q4, M4 και E5.

### 4.2.3 Εγκιβωτισμός

Η διαδικασία του εγκιβωτισμού που επιδέχονται τα δοκίμια γίνεται έτσι ώστε να προετοιμαστούν για μεταλλογραφική διερεύνηση. Κατά τον εγκιβωτισμό τοποθετείται κάθε δοκίμιο σε ένα καλούπι όγκου  $22-25\text{cm}^3$  έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η συγκράτηση τους στα επόμενα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης. Ο εγκιβωτισμός γίνεται με τη χρήση ρητίνης η οποία στερεοποιείται γύρω από το δείγμα, αφήνοντας ακάλυπτη την προς εξέταση επιφάνεια. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαφανής πολυεστερική ταχείας πήξεως, ενώ ο καταλύτης (σκληρυντής) ήταν υπεροξείδιο μεθυλικής αιθυλικής κετόνης. Η αναλογία σκληρυντή/ρητίνης ήταν 8 σταγόνες σκληρυντή στα 10ml ρητίνης. Παρασκευάζοντας τη ρητίνη γίνεται καλή ανάδευση, έτσι ώστε να αναμειχθούν καλά ρητίνη και σκληρυντής (σχηματίζοντας χρώμα ανοιχτό καφέ) και να μην δημιουργηθούν φυσαλίδες. Ο χρόνος στερεοποίησης της ρητίνης ήταν περίπου 3 ώρες.

### 4.2.4 Λείανση

Τα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης αποσκοπούσαν στη μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του δοκιμίου, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της δομής του μετά από την προσβολή του με το κατάλληλο αντιδραστήριο, για παρατήρηση στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Με τον ίδιο τρόπο προετοιμάστηκε η επιφάνεια του δοκιμίου για τη λήψη μετρήσεων σκληρότητας.

Η διεργασία της λείανσης πραγματοποιείται σε οριζόντιο, υδρόψυκτο, περιστρεφόμενο τροχό, της εταιρίας Struers, μέσω της οποίας, η επιφάνεια του δοκιμίου εφραπτόταν σε αυτόν χειρωνακτικά.

Σαν μέσο λείανσης χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, τοποθετημένα πάνω στην επιφάνεια του τροχού. Τα χαρτιά SiC χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος κόκκου του λειαντικού μέσου (grid). Για παράδειγμα, ο αριθμός 220grid εκφράζει ότι το χαρτί έχει 220 κόκκους καρβιδίων του πυριτίου ανά τετραγωνική ίντσα. Τα χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά είναι 220grid→ 400grid→ 800grid→ 1200grid→ 2000grid για τα δοκίμια που προετοιμάζονταν για μεταλλογραφική παρατήρηση. Για τις δοκιμές σκληρότητας η



λείανση σταματούσε στο χαρτί 1200. Οι γραμμές λείανσης πρέπει να είναι κάθετες με τις γραμμές που είχαν δημιουργηθεί στο προηγούμενο στάδιο, ώστε να απαλείφονται τελείως και αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη περιστροφή του δοκιμίου.

Μετά την λείανση του κάθε δοκιμίου, σε κάθε χαρτί τα δοκίμια πλένονταν με νερό και στην συνέχεια, με την βοήθεια βαμβακιού, πλένονταν με αιθανόλη και στεγνώνονταν με ρεύμα ψυχρού αέρα με σκοπό να εκδιωχτούν υπολειπόμενα καρβίδια από το χαρτί λείανσης καθώς και προϊόντα οξείδωσης του υλικού.

#### **4.2.5 Στίλβωση**

Το επόμενο στάδιο προετοιμασίας των επιφανειών των δοκιμίων για μεταλλογραφία ήταν η στίλβωση. Η στίλβωση πραγματοποιείται για να αποκτήσουν τα δείγματα επίπεδη επιφάνεια, χωρίς ατέλειες η οποία «καθρεφτίζει» έτσι ώστε να γίνει εύκολη και ευδιάκριτη η παρατήρησή τους στο μικροσκόπιο. Η στίλβωση έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο, τα δοκίμια στιλβώθηκαν με διαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου διαμαντιού 6 μm και στο δεύτερο με διαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου διαμαντιού 1 μm.

Η διαμαντόπαστα απλώθηκε πάνω σε κατάλληλα για το κάθε στάδιο υφάσματα, τα οποία τοποθετούνταν σε περιστρεφόμενο τροχό. Για σιδηρούχα υλικά το γυάλισμα απαιτεί μικρό χρόνο, με σχετικά μεγάλη ασκούμενη δύναμη και μικρή περιστροφική ταχύτητα. Σαν λιπαντικό μέσο χρησιμοποιούνταν υγρό της BUHLER τύπου METADI diamond suspension υδατικού διαλύματος.

Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης, ελεγχόταν οπτικά η επιφάνεια του δοκιμίου με ξέπλυμα με αιθανόλη, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Όταν το δοκίμιο κρινόταν τελικώς έτοιμο, καθαριζόταν με νερό και αιθανόλη και στέγνωσε με ρεύμα κρύου αέρα.



*Εικόνα 19: Όργανο λείανσης και στίλβωσης της εταιρίας Struers.*

#### **4.2.6 Χημική προσβολή**

Η χημική προσβολή αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν την εξέταση των δειγμάτων στο οπτικό μικροσκόπιο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Τα δοκίμια για να είναι κατάλληλα για χημική προσβολή, πρέπει να έχουν μια προσεκτικά γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια, από υλικό ελεύθερο από τις αλλαγές που μπορεί να προκλήθηκαν από επιφανειακή παραμόρφωση, από ροή των υλικών ή από γρατσουνιές.

Για την χημική προσβολή χρησιμοποιήθηκε διάλυμα Nital (δηλαδή διάλυμα νιτρικού οξέως σε αιθανόλη) και διάλυμα Marshall's Reagent, (το οποίο αποτελείται από 8gr οξαλικού οξέος και 5ml πυκνού θειικού οξέως το οποίο αναμιγνύεται σε 100ml νερό και 10ml υπεροξείδιο του υδρογόνου 30% v/v).

Οι χρόνοι παραμονής των επιφανειών των δοκιμίων στα 2 διαλύματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Δοκίμια	Προσβολή
K5	9 sec Nital 5% και 9sec Marshall's Reagent
P5	24 sec Nital 2% και 24 sec Marshall's Reagent
A5	14 sec Nital 5% και 14 sec Marshall's Reagent
J6	15 sec Nital 1,5% και 15 sec Marshall's Reagent
Q3	10 sec Nital 5% και 6 sec Marshall's Reagent
M4	9 sec Nital 2% και 6 sec Marshall's Reagent
Q4	2 sec Nital 5% και 4 sec Marshall's Reagent
E5	12 sec Nital 5% και 12 sec Marshall's Reagent

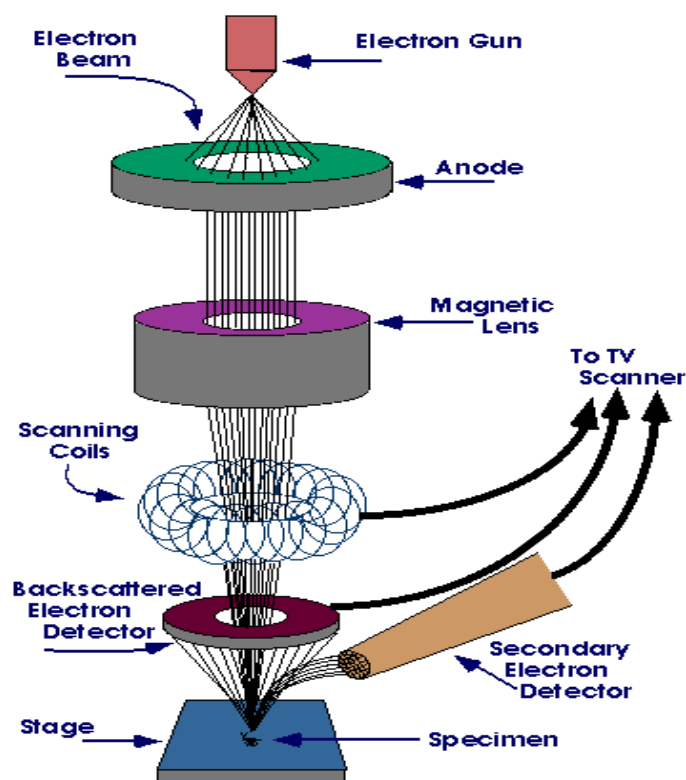
*Πίνακας 4: Χημικές προσβολές δοκιμίων με Nital και Marshall's Reagent.*

Τα δοκίμια προσβάλλονταν, ξεπλένονταν με νερό και στη συνέχεια με αιθανόλη και στεγνώνονταν με ρεύμα ψυχρού αέρα. Στη συνέχεια εξεταζόταν στο οπτικό μικροσκόπιο η ορθότητα του βαθμού προσβολής και γινόταν περαιτέρω προσβολή, όταν κρινόταν απαραίτητο.

### 4.3 Μέθοδοι εξέτασης της μικροδομής

#### 4.3.1 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM)

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η λειτουργία του SEM στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του προς εξέταση δείγματος και της προσπίπτουσας δέσμης ηλεκτρονίων σε αυτό. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται κυρίως από το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, το θάλαμο που τοποθετείται το δείγμα, την αντλία κενού και το σύστημα ανιχνευτών και παρουσίασης.



Εικόνα 20: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Τα ηλεκτρόνια παράγονται από ένα σύρμα βολφραμίου (κάθοδος) και επιταχύνονται προς την άνοδο, στην οποία εφαρμόζεται ένα δυναμικό 1- 30KV. Η άνοδος δημιουργεί ισχυρές ελκτικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να

τα επιταχύνει και να τα κατευθύνει. Η παραγόμενη δέσμη ηλεκτρονίων έχει τυπικά ενέργεια από μερικές εκατοντάδες eV μέχρι περίπου 50KeV και εστιάζεται από ένα σύστημα φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με κατάλληλα διαφράγματα. Αμέσως μετά, αυτή η εστιασμένη δέσμη περνά μέσα από ζεύγη πηνίων σάρωσης, τα οποία την εκτρέπουν οριζόντια και κάθετα έτσι ώστε να σαρώνουν μια τετραγωνική περιοχή της επιφάνειας του δείγματος. Τα πηνία αυτά είναι τοποθετημένα σε δύο ζεύγη γύρω από τη δέσμη, με το ένα ζεύγος να ελέγχει την κίνηση της δέσμης στην κατεύθυνση X και το άλλο την κίνησή της στην κατεύθυνση Y. Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα καθορίζει το μαγνητικό πεδίο και άρα την εκτροπή της δέσμης ώστε αυτή να στέλνεται στο σωστό σημείο. Τα ίδια τα πηνία ελέγχονται με την γεννήτρια σάρωσης, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τον έλεγχο μεγέθυνσης και την οθόνη. Η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο δείγμα και το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του δείγματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού, και μπορεί να είναι [2]:

- Δευτερογενή ηλεκτρόνια
- Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια
- Ηλεκτρόνια Auger
- Ακτίνες-X

Στο εργαστήριο, το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Jeol 6380 LV. Λήφθηκαν φωτογραφίες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI), οι οποίες παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της μελετώμενης επιφάνειας των δοκιμίων, και φωτογραφίες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES), οι οποίες έδωσαν πληροφορίες που αφορούν τη χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της επιφάνειας.



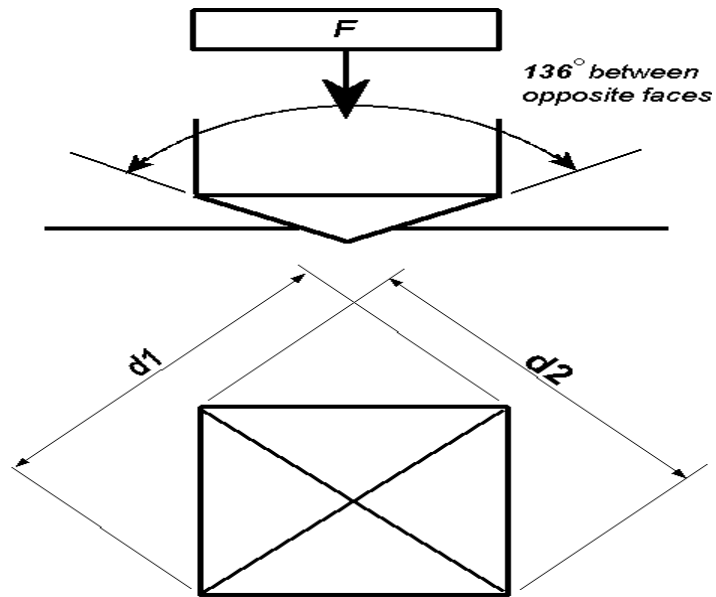
Εικόνα 21: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM).

## 4.4 Μέθοδοι μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων

### 4.4.1 Δοκιμές σκληρότητας

Οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή σκληρομέτρησης Vickers που διαθέτει το Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής μας.

Στην μέθοδο Vickers, ο διεισδυτής είναι μια αδαμάντινη πυραμίδα, τετραγωνικής βάσης, της οποίας η γωνία κορυφής είναι  $136^\circ$ . Η πυραμίδα αυτή διεισδύει στην επιφάνεια του μελετώμενου δοκιμίου, αφήνοντας ένα αποτύπωμα ρομβοειδούς διατομής. Κατόπιν, γίνονται οι μετρήσεις των διαγωνίων  $d_1$  και  $d_2$  του αποτυπώματος με την βοήθεια μικροσκοπίου με ενσωματωμένο εργαλείο μέτρησης. Από αυτές εξάγεται ο μέσος όρος  $d$  των διαγωνίων και έπειτα με τη βοήθεια κατάλληλου πίνακα μετατροπής του μέσου όρου σε σκληρότητα, προέκυπτε η σκληρότητα του δείγματος. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις μετρήσεις ήταν 98N (ή 10kg).



Εικόνα 22: Απεικόνιση της διαδικασίας σκληρομέτρησης, με την μέθοδο Vickers.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων για τη λήψη σκληρομετρήσεων περιλαμβάνει λείανση μέχρι το χαρτί 1200grid, έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτες οι γραμμές λείανσης για σωστή εστίαση του μικροσκοπίου του σκληρόμετρου στην επιφάνεια του δοκιμίου. Επιπλέον, για τη λήψη σωστών μετρήσεων είναι σημαντικό η πάνω επιφάνεια του δοκιμίου να είναι παράλληλη με την κάτω, ώστε το δοκίμιο να «πατάει» καλά στην τράπεζα του οργάνου αλλά και ο διεισδυτής να πιέζεται εντελώς κάθετα στην επιφάνεια του υλικού.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά σε 8 δοκίμια μετρήσεις σκληρότητας. Για την μείωση σφάλματος ελήφθησαν 10 μετρήσεις από κάθε δοκίμιο. Για κάθε δεκάδα μετρήσεων υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, που δίνει τα περιθώρια σφάλματος γύρω από τον μέσο όρο. Σε καμία από τις μετρήσεις αυτές δεν προέκυψε σημαντική απόκλιση

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

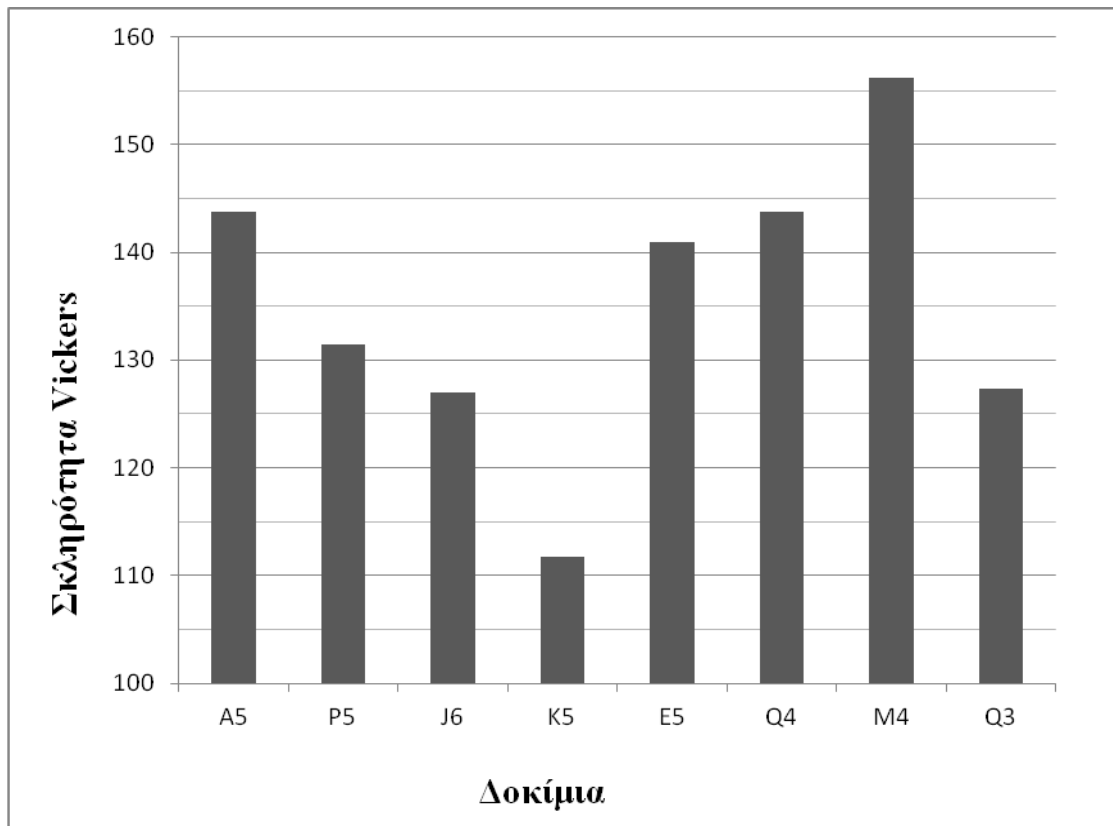
### 5.1 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων

Για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σκληρομέτρηση με την μέθοδο Vickers. Στόχος ήταν να διαπιστωθούν οι διαφορές που είχαν επιφέρει οι θερμικές κατεργασίες και η προσθήκη των κραματικών στοιχείων (τιτάνιο, βανάδιο) σε κάθε δοκίμιο. Τα αποτελέσματα σκληρομετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω.

Όνομα δοκιμίου	HV (Σκληρότητα)	SD (Τυπική απόκλιση)
A5	143,8	1,10
P5	131	4,31
J6	127	2,59
K5	111,7	2,86
E5	141	1,26
Q4	143,8	2,71
M4	156,2	2,99
Q3	127,4	0,73

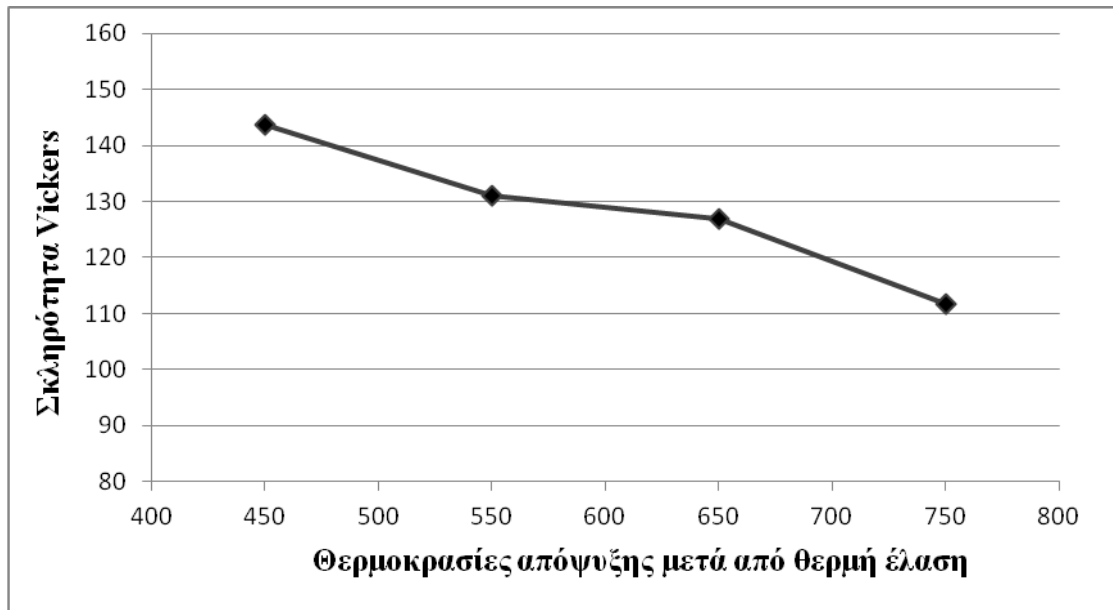
Πίνακας 5: Μέσος όρος σκληρότητας και τυπικής απόκλισης όλων των δοκιμίων.





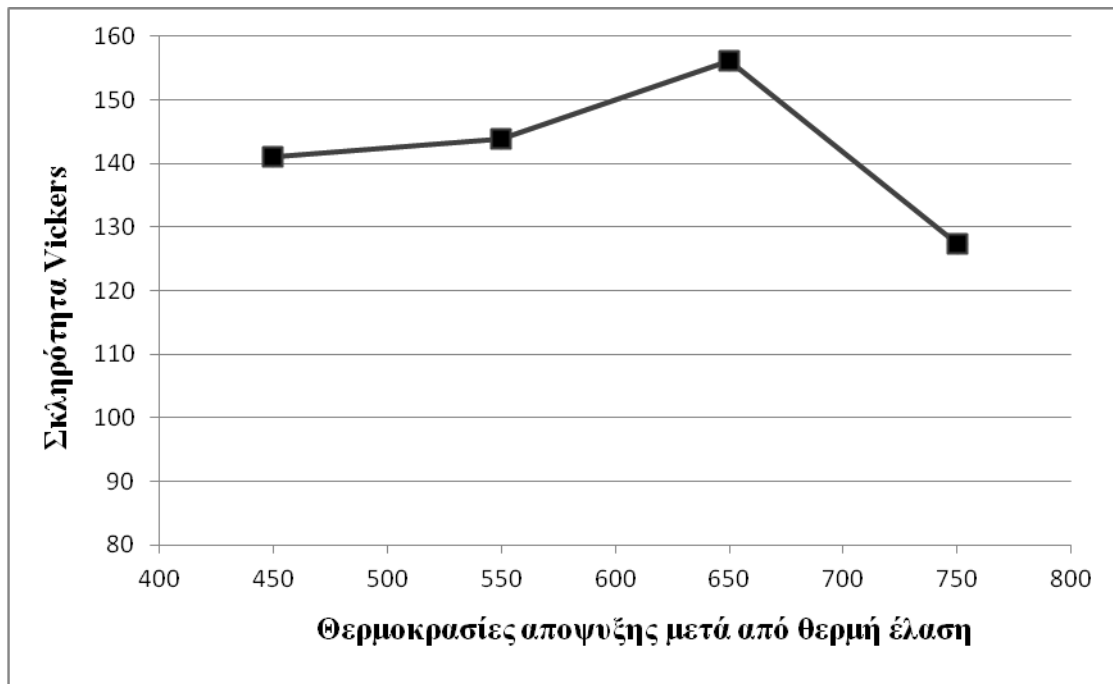
*Εικόνα 23: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας όλων των δοκιμίων.*

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα τα δοκίμια της ομάδας Β (E5, Q4, M4, Q3) έχουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη σκληρότητα από τα δοκίμια της ομάδας Α (A5, P5, J6, K5). Το δοκίμιο με την μεγαλύτερη σκληρότητα αποτελεί το M4 (με 156,2 HV), το οποίο έχει προσθήκη τιτανίου – βαναδίου και θερμοκρασία απόψυξης στους 450°C . Αντίθετα, το δοκίμιο με την μικρότερη σκληρότητα είναι το K5 (με 111,7 HV), το οποίο έχει μόνο προσθήκη τιτανίου και θερμοκρασία απόψυξης 750°C.



*Εικόνα 24: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας για τα δοκίμια της ομάδας Α σε σχέση με τις θερμοκρασίες απόψυξης μετά την έλαση.*

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ο μέσος όρος της σκληρότητας των δοκιμίων της ομάδας Α. Το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη σκληρότητα είναι το Α5 (με 143,8 HV) και θερμοκρασία απόψυξης 450°C, ενώ αυτό με τη μικρότερη σκληρότητα είναι το Κ5 (με 111,7 HV) με θερμοκρασία απόψυξης 750°C. Επιπλέον, τα δοκίμια Ρ5 και J6 παρουσιάζουν παρόμοια σκληρότητα (131 HV και 127 HV αντίστοιχα) με θερμοκρασίες απόψυξης 550°C και 650°C αντίστοιχα. Ακόμη, παρατηρείται ότι τα δοκίμια της ομάδας Α, τα οποία έχουν προσθήκη τιτανίου, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία απόψυξης για το καθένα, ισοδυναμεί σε μικρότερη σκληρότητα για το αντίστοιχο δοκίμιο.



Εικόνα 25: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας για τα δοκίμια της ομάδας Β σε σχέση με τις θερμοκρασίες απόψυξης μετά την έλαση.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ο μέσος όρος της σκληρότητας των δοκιμίων της ομάδας Β. Το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη σκληρότητα είναι το M4 (με 156,2 HV) και θερμοκρασία απόψυξης 650°C, ενώ αυτό με τη μικρότερη σκληρότητα είναι το Q3 (με 127,4 HV) με θερμοκρασία απόψυξης 750°C. Επιπλέον, τα δοκίμια E5 και Q4 παρουσιάζουν παρόμοια σκληρότητα (141 HV και 143,8 HV αντίστοιχα) με θερμοκρασίες απόψυξης 450°C και 550°C αντίστοιχα. Ακόμη παρατηρείται, ότι σε αντίθεση με τα δοκίμια της ομάδας Α, τα δοκίμια της ομάδας Β, τα οποία έχουν προσθήκη τιτανίου – βαναδίου, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία απόψυξης, αυξάνει και η σκληρότητα τους, εκτός της περίπτωσης των 750°C όπου παρατηρείται πτώση.

## 5.2 Μελέτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM), τύπου JEOL 6380LV, έγινε η μελέτη της μικροδομής του υλικού καθώς και η στοιχειακή ανάλυση τους. Πιο συγκεκριμένα, η δομή που εξετάστηκε ήταν 4 δοκιμίων χάλυβα HSLA με προσθήκη Ti (ομάδα Α) και 4 δοκιμίων χάλυβα HSLA με προσθήκη Ti Και V (ομάδα Β).

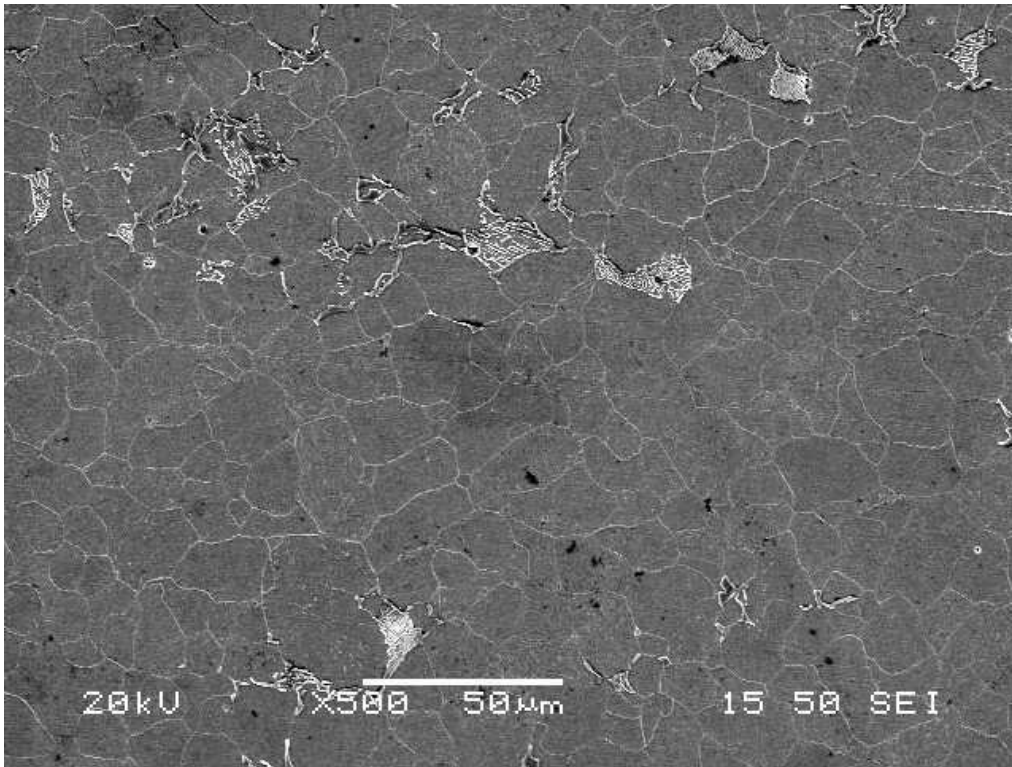
Το υλικό αυτό αποτελείται δύο φάσεις, τη μητρική φάση του α – φερρίτη, η οποία κυριαρχεί στην μικροδομή, καθώς και τη φάση του περλίτη.

Το υλικό μελετήθηκε έπειτα από θερμή έλαση, στις θερμοκρασίες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

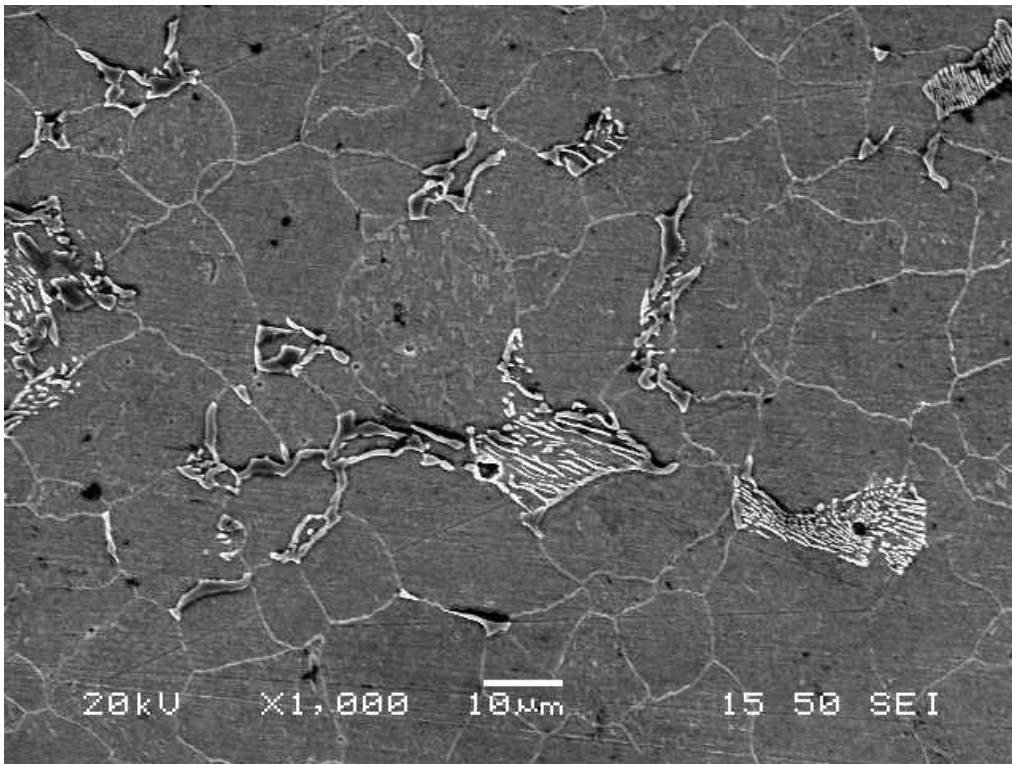
### **5.2.1 Δοκίμια με προσθήκη Ti (ομάδα Α)**

#### **Δοκίμιο K5 (750 °C )**

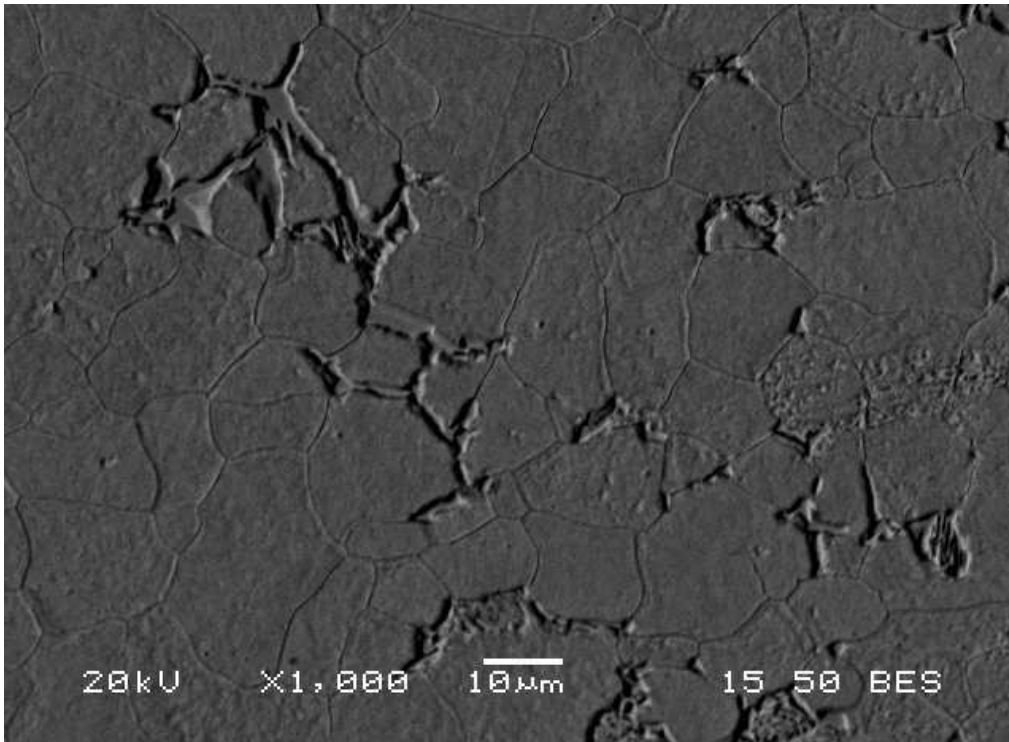
Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του περλίτη. Διακρίνεται λεπτόκοκκο υλικό, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 15 – 20 μm, στην μικροδομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου K5, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο. Αυτό συμβαίνει διότι η περιεκτικότητα σε τιτάνιο είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να ανιχνευθεί.



*Εικόνα 26: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x500.*



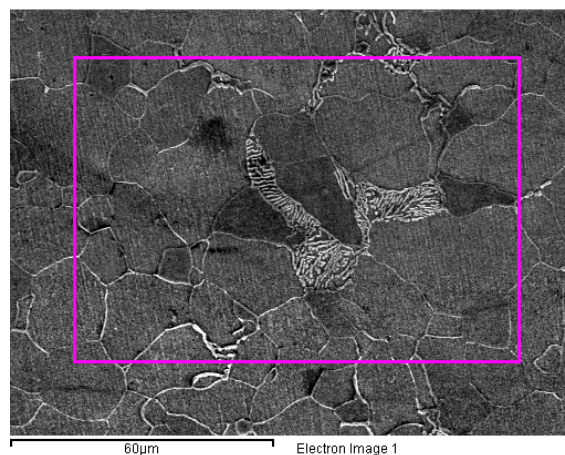
*Εικόνα 27: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x1000.*



Εικόνα 28: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου K5 με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

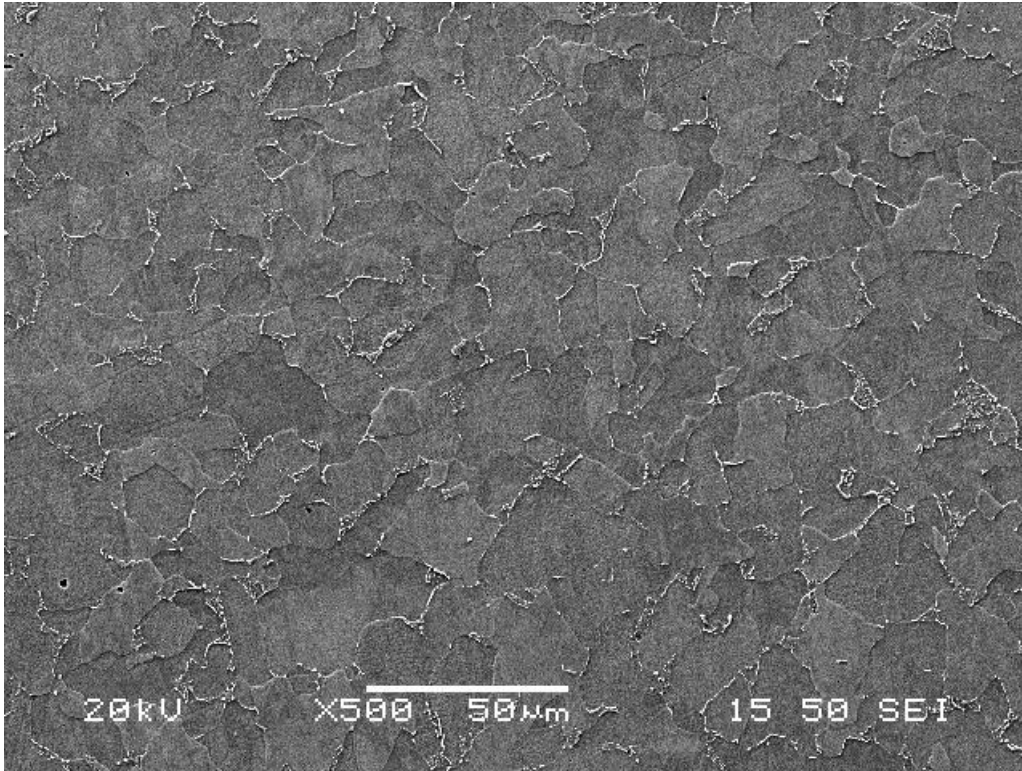
Πίνακας 6: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου K5



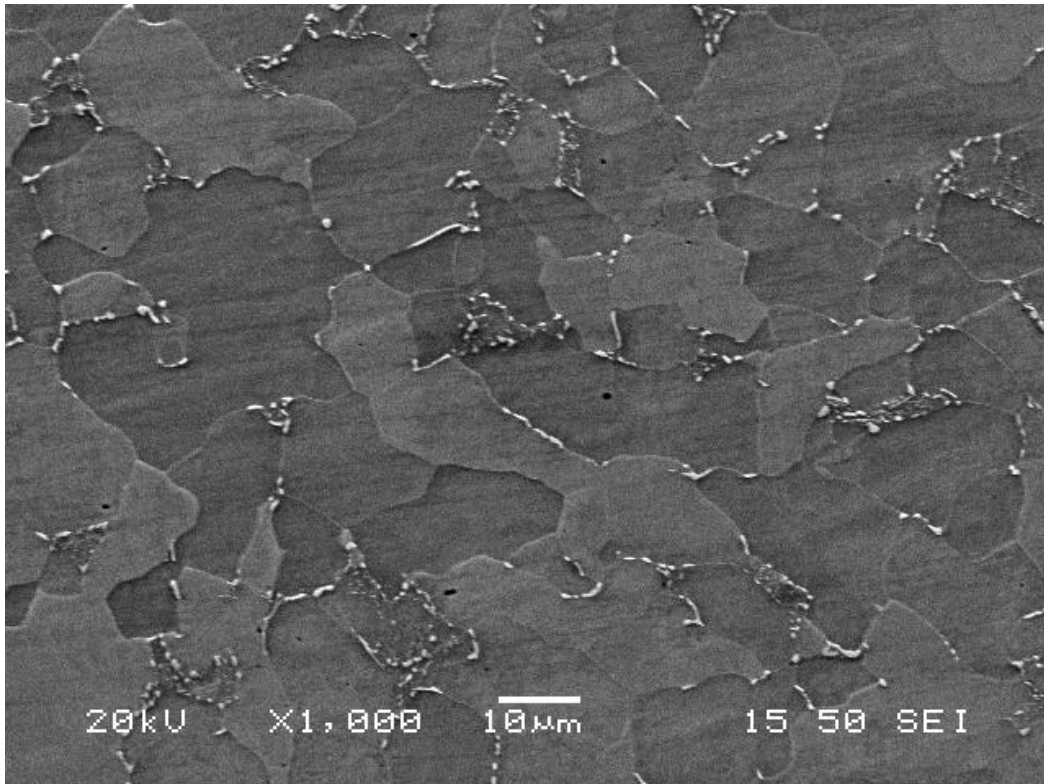
Εικόνα 29: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου K5

### Δοκίμιο J6 (650 °C)

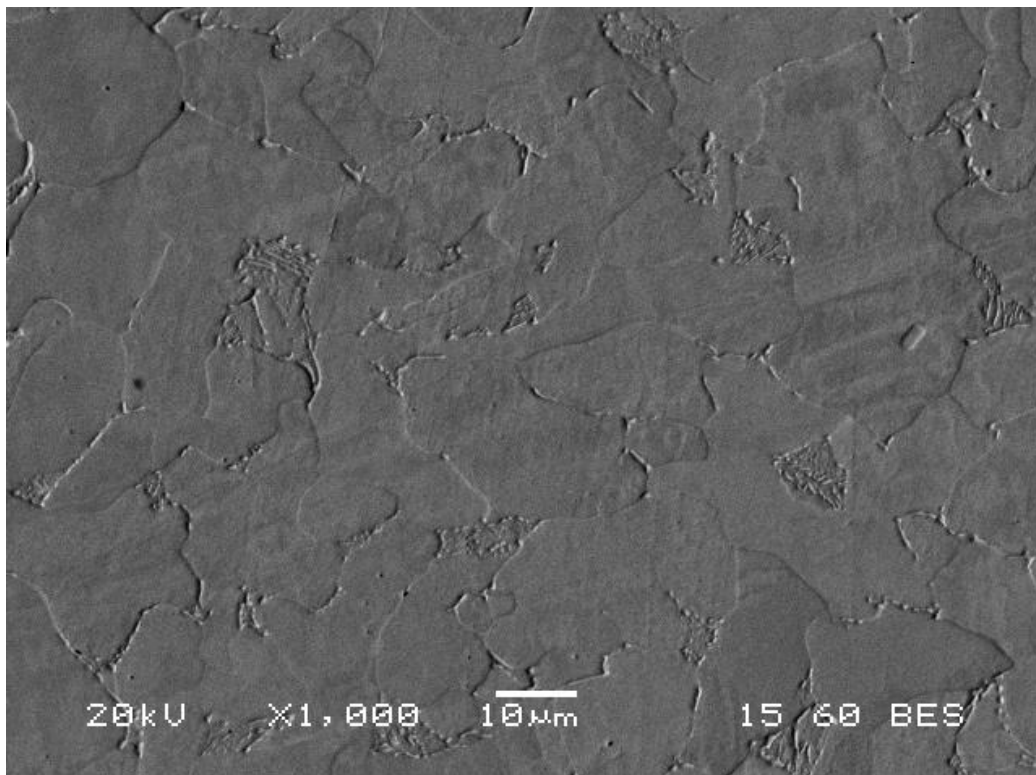
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή με κυρίαρχη φάση στο υλικό τον φερρίτη. Το υλικό είναι λεπτόκοκκο, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 10 – 20  $\mu\text{m}$ , όπου στην δομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης.



*Εικόνα 30: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x500.*



*Εικόνα 31: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x1000.*

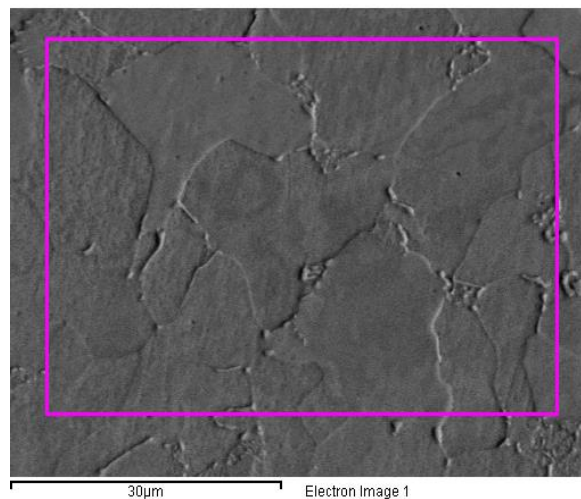


*Εικόνα 32: Μικρογραφία σπασθосκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου J6 με μεγέθυνση x1000.*



Element	Weight %	Atomic %
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

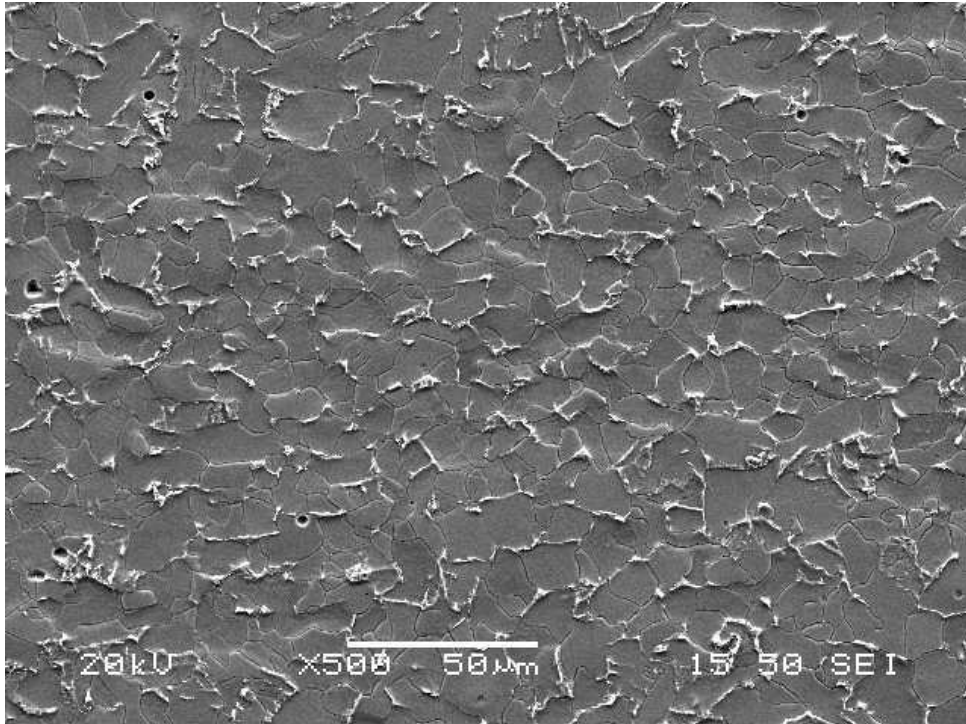
Πίνακας 7: Μικροανάλυση (EDS) του συνόλου της δομής του δοκιμίου J6.



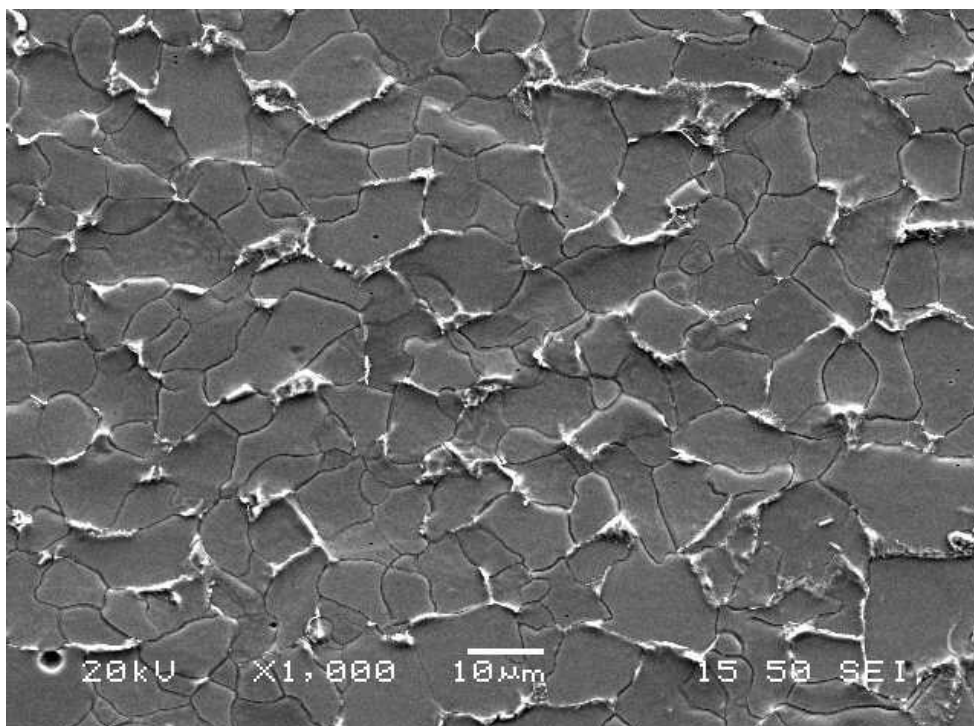
Εικόνα 33: Μικροανάλυση (EDS) του συνόλου της δομής του δοκιμίου J6.

### **Δοκίμιο P5 (550 °C)**

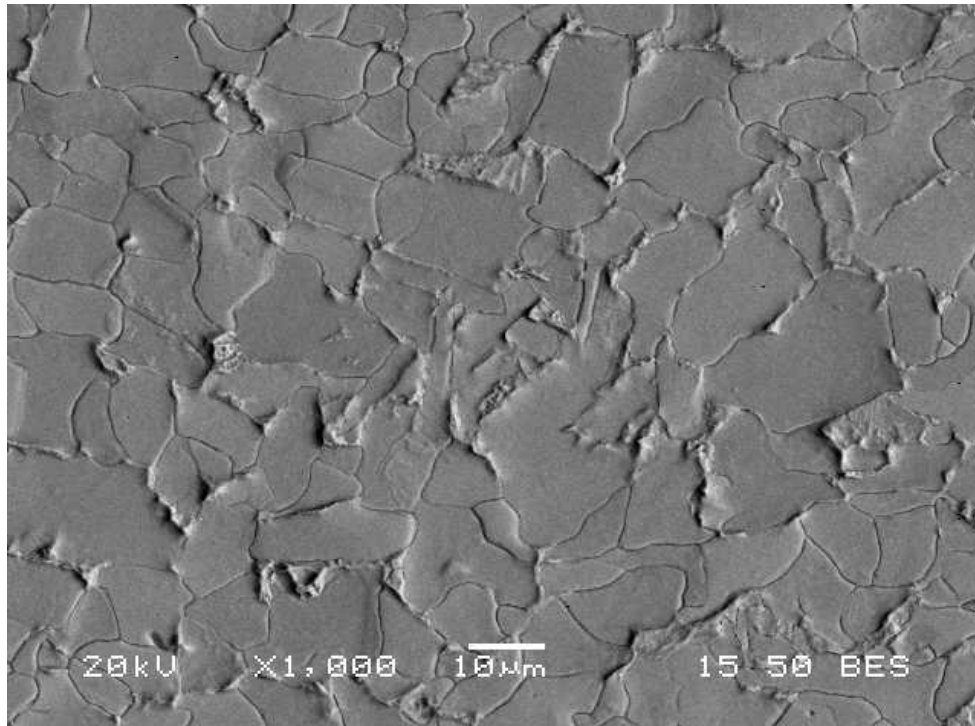
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή με κυρίαρχη φάση τον φερρίτη. Το υλικό είναι πολύ λεπτόκοκκο, περισσότερο από τα δύο προηγούμενα δοκίμια, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 5 – 10 µm και στην μικροδομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης, ενώ οι κόκκοι του υλικού παρουσιάζονται λιγότερο παραμορφωμένοι από τα δοκίμια J6 και K5. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου P5, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο.



*Εικόνα 34: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x500.*



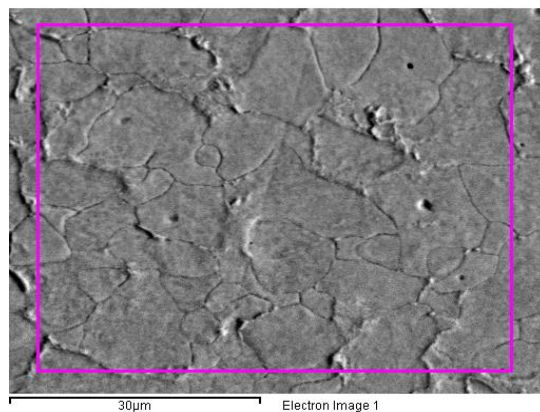
*Εικόνα 35: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x1000.*



Εικόνα 36: Μικρογραφία οπισθοσκηδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου P5 με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

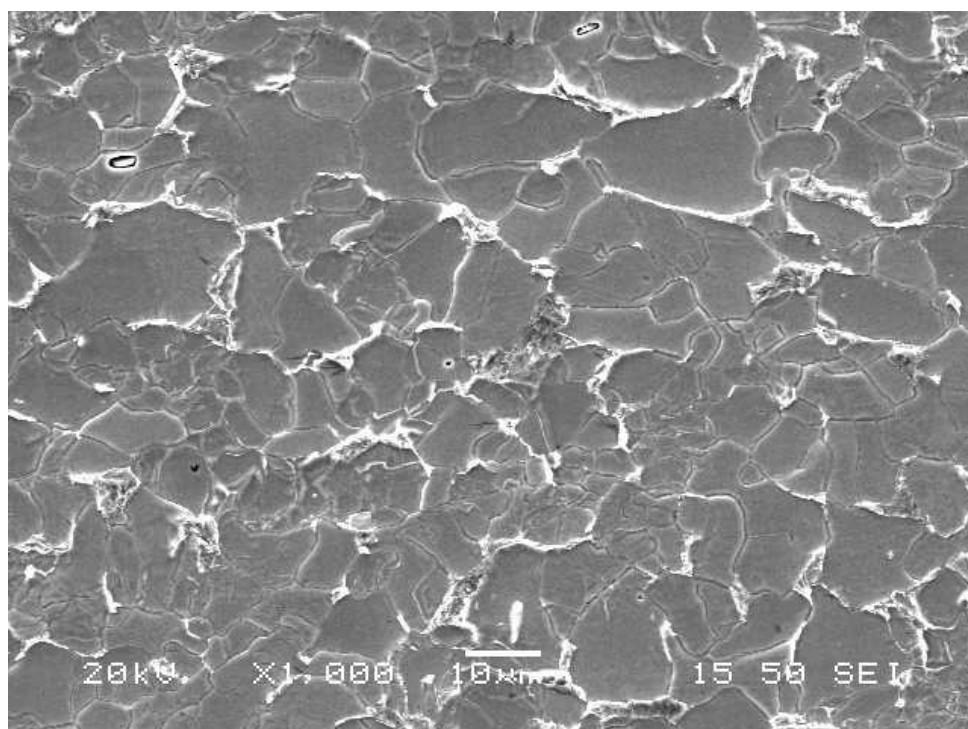
Πίνακας 8: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου P5.



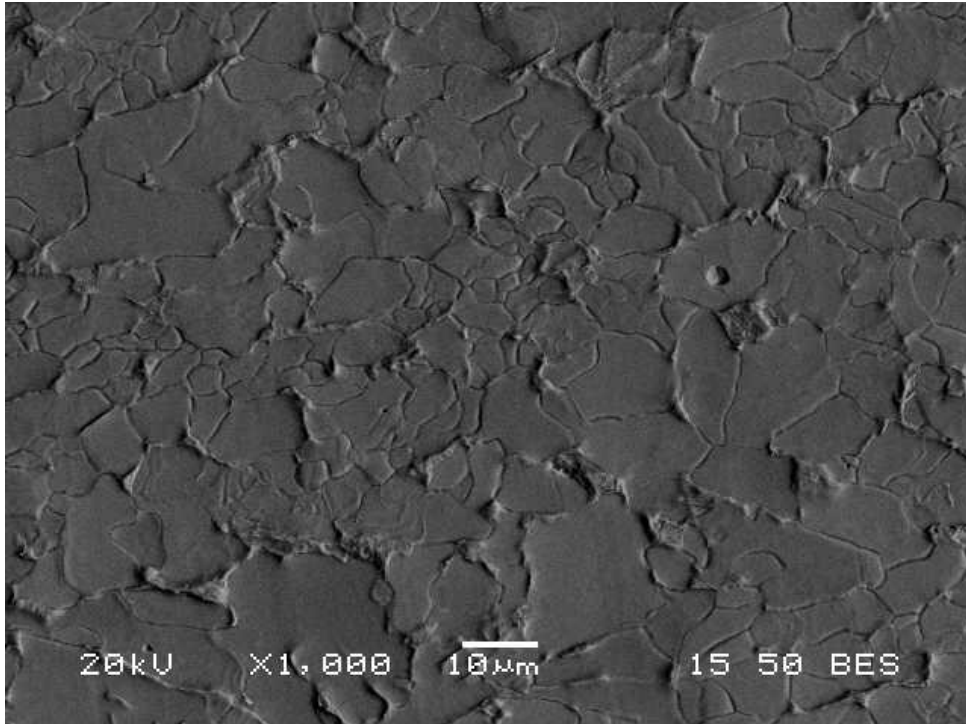
Εικόνα 37: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου P5.

### Δοκίμιο A5 (450°C)

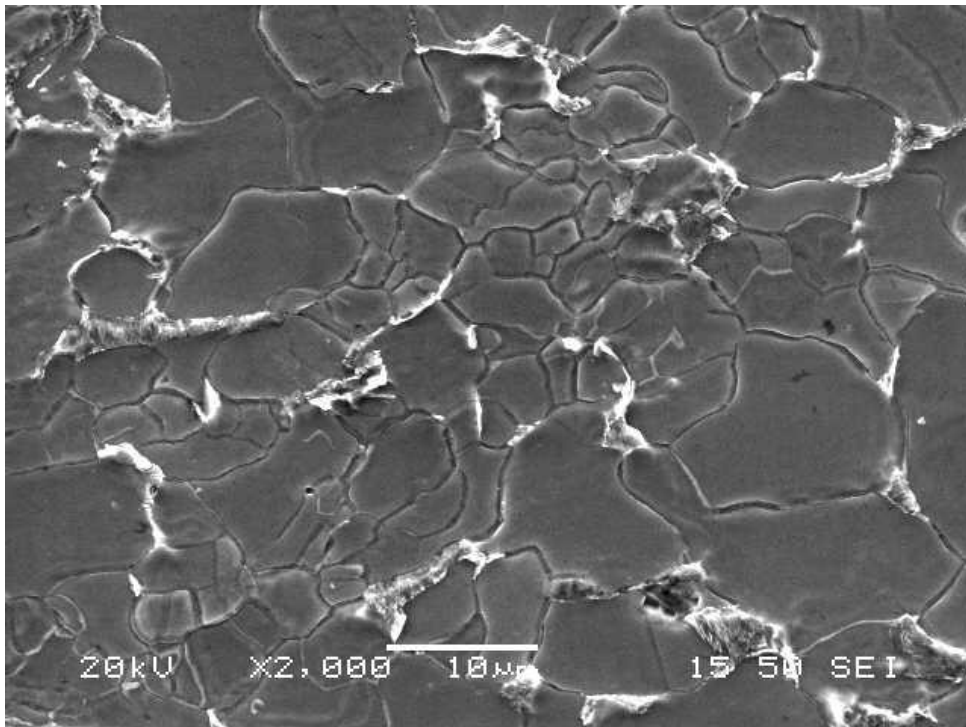
Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του περλίτη. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει λεπτόκοκκο υλικό, με μία σχετικά ανομοιόμορφη κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Παρατηρούνται δηλαδή μεγέθη της τάξεως των 1-5 $\mu\text{m}$  και ακόμη πιο λεπτομερή, ενώ υπάρχουν και μεγέθη της τάξεως των 10-20 $\mu\text{m}$ . Στην μικροδομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου A5, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο.



*Εικόνα 38: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x1000.*



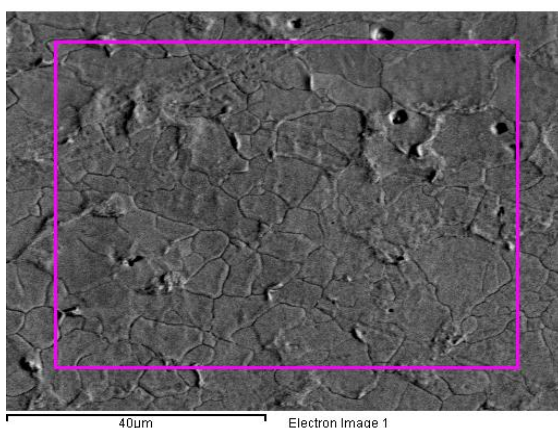
*Εικόνα 39: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x1000.*



*Εικόνα 40: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου A5 με μεγέθυνση x2000.*

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

Πίνακας 9: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου A5.

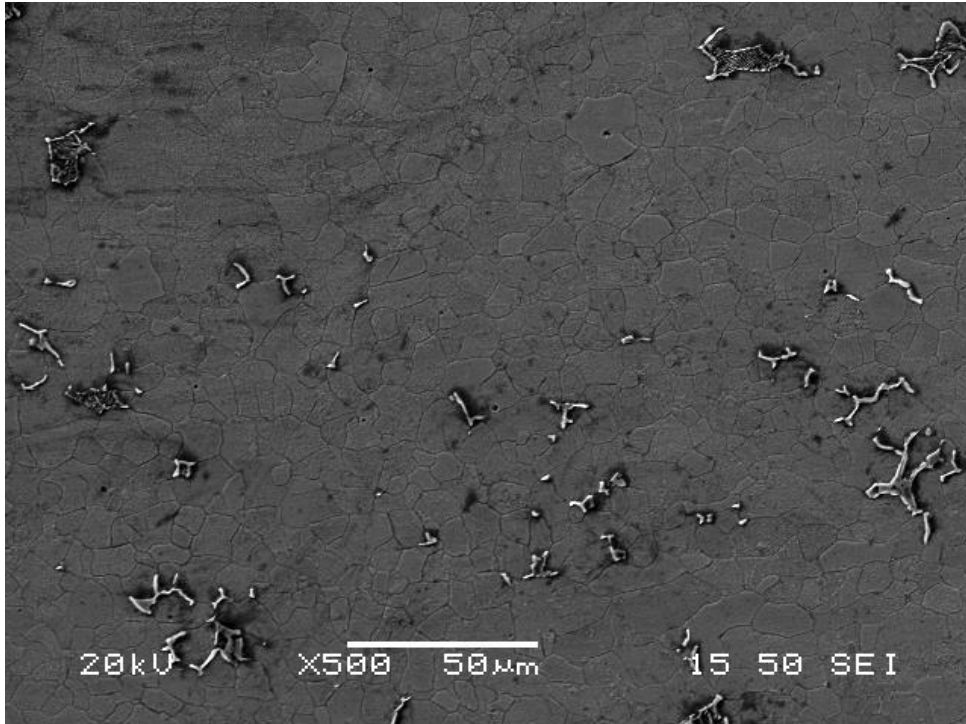


Εικόνα 41: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου A5.

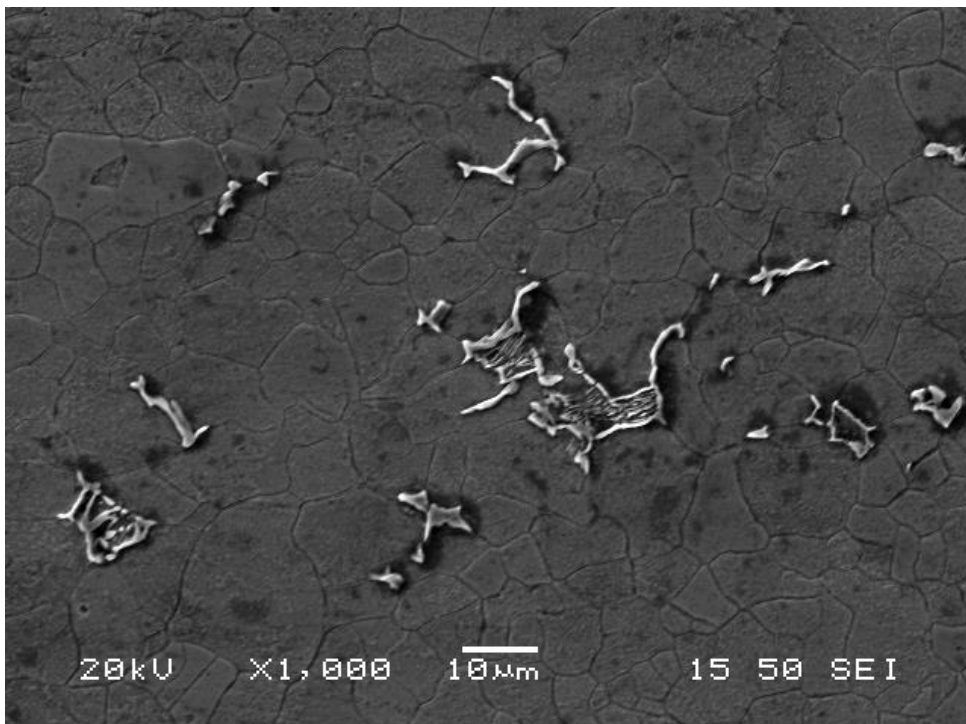
## 5.2.2 Δοκίμια με προσθήκη Ti και V (ομάδα Β)

### Δοκίμιο Q3 (750 °C)

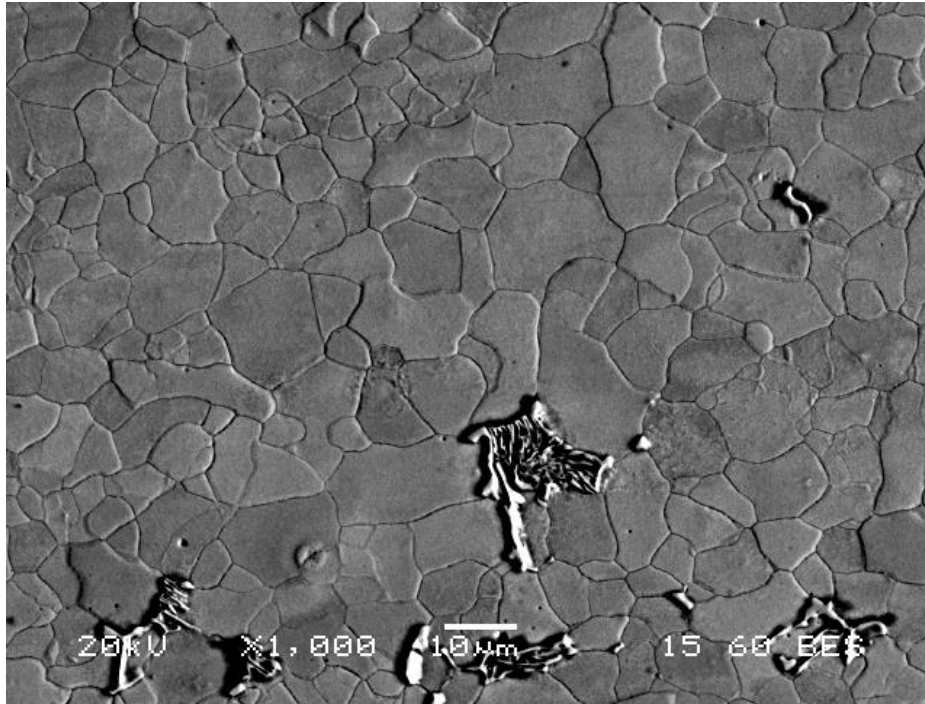
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή, με κυρίαρχη φάση τον φερρίτη. Το υλικό είναι πολύ λεπτόκοκκο, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 5 – 15 μm. Στην μικροδομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου Q5, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο. Αυτό συμβαίνει διότι η περιεκτικότητα σε τιτάνιο και βανάδιο είναι πολύ μικρή και δεν μπορεί να ανιχνευθεί.



Εικόνα 41: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x500.



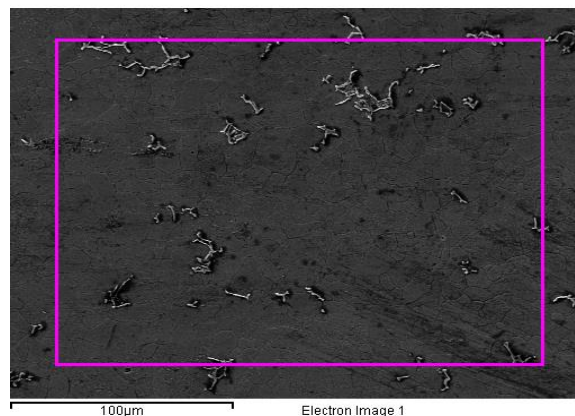
Εικόνα 42: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x1000.



Εικόνα 43: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q3 με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

Πίνακας 10: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q3

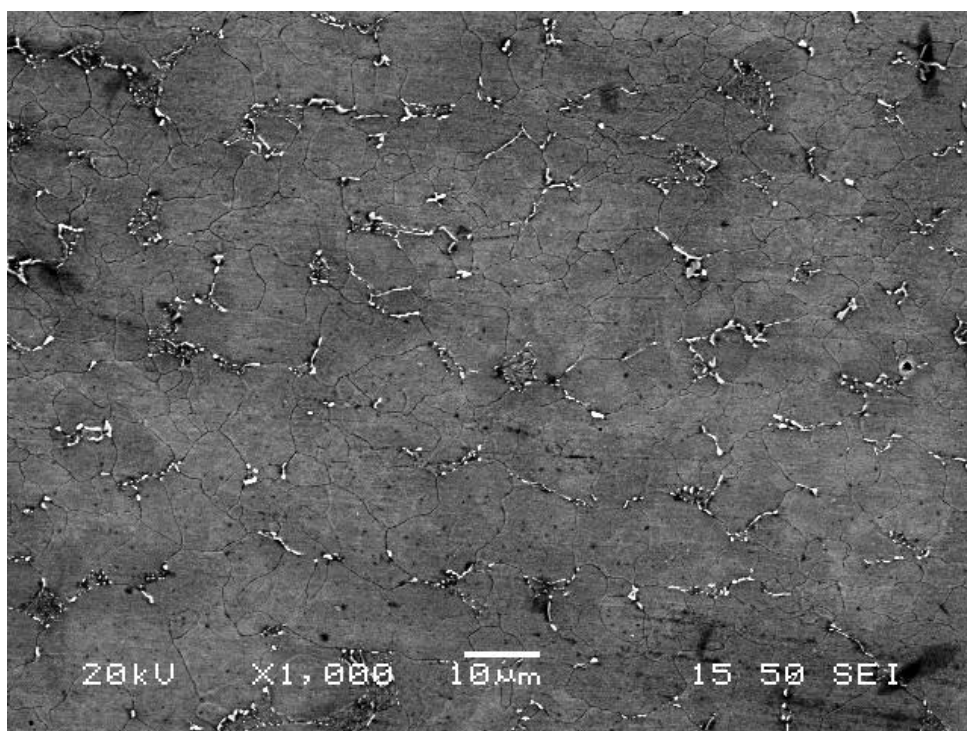


Εικόνα 44: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q3

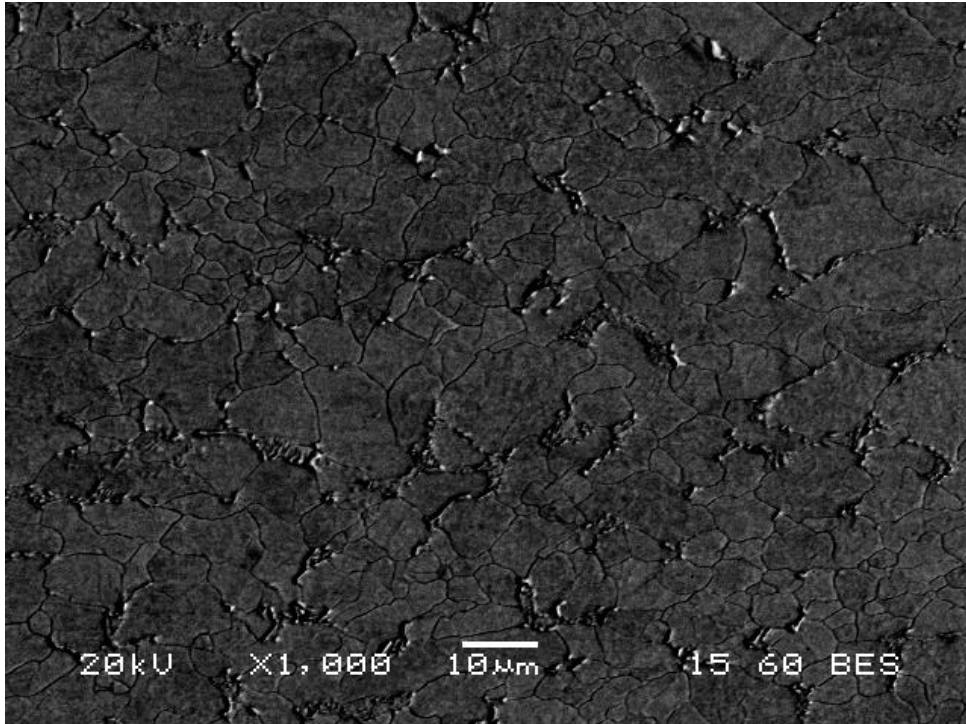


### Δοκίμιο M4 (650 °C)

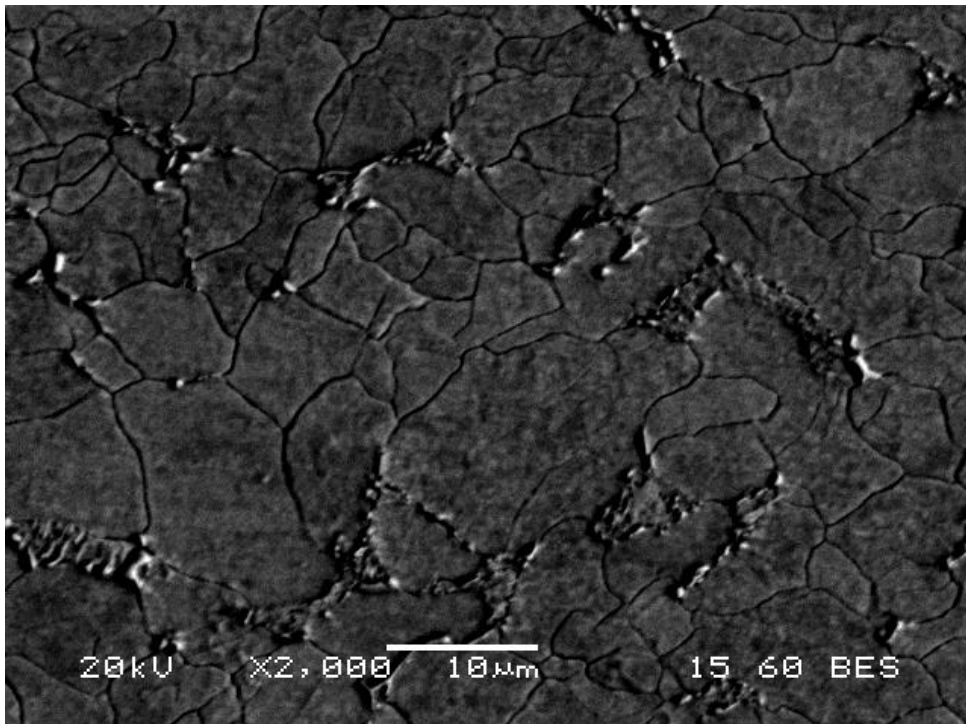
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή, με κυρίαρχη φάση των φερρίτη. Το υλικό είναι λεπτόκοκκο, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 5 – 15  $\mu\text{m}$ , στην μικροδομή του δεν καθίσταται σαφής η διεύθυνση έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου M4, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο.



*Εικόνα 45: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x1000.*



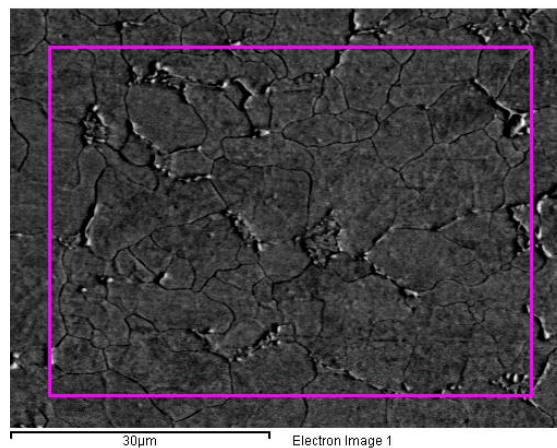
*Εικόνα 46: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x1000.*



*Εικόνα 47: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου M4 με μεγέθυνση x2000.*

Element	Weight%	Atomic%
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

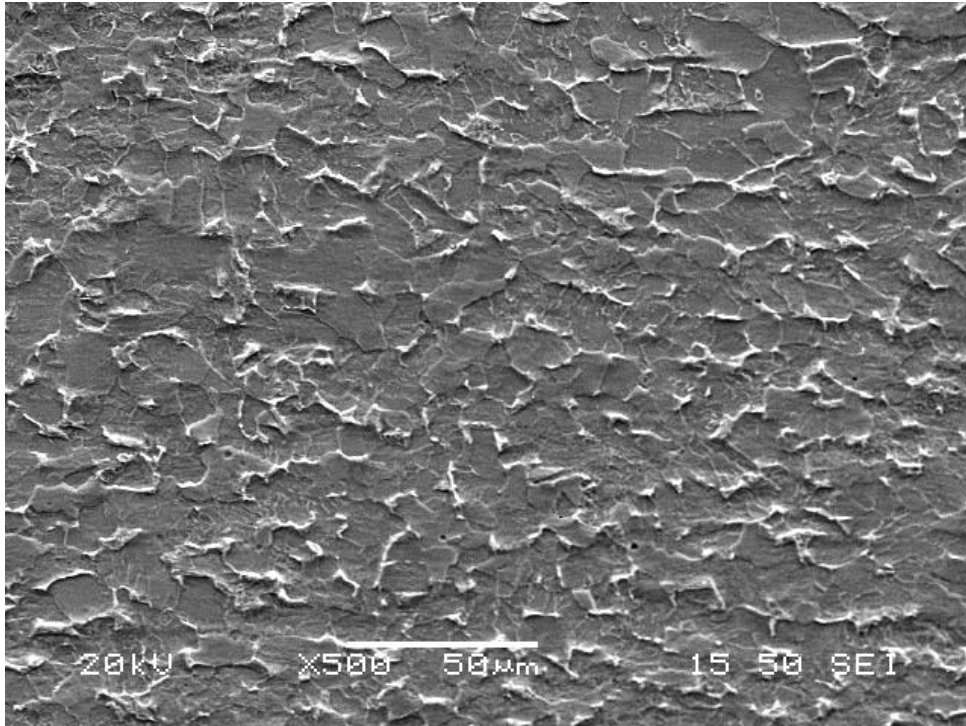
Πίνακας 11: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου M4.



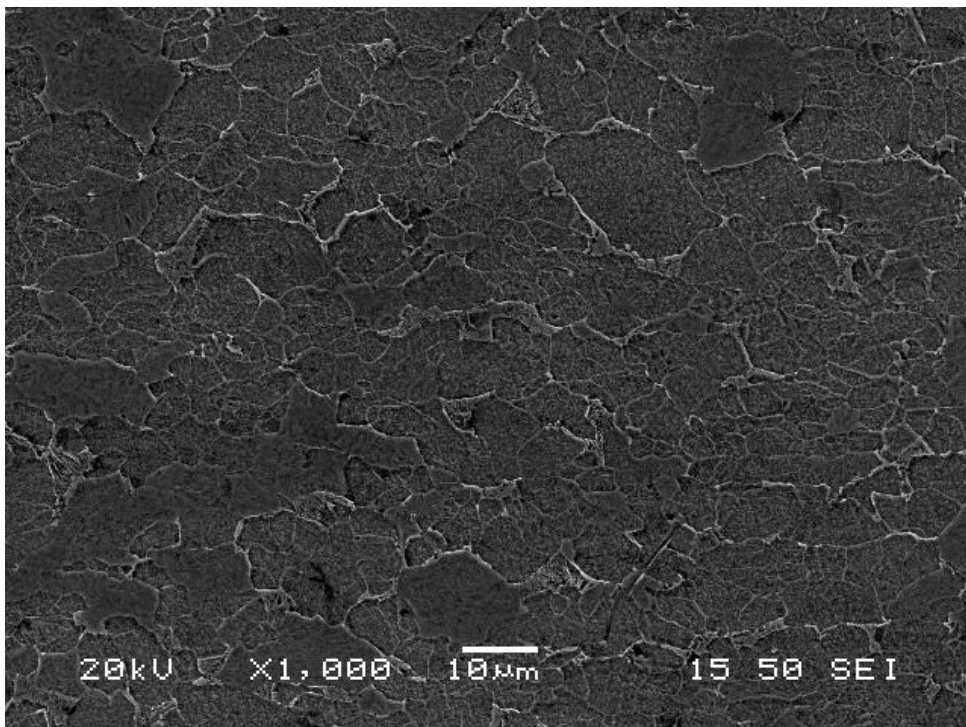
Εικόνα 48: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου M4.

#### Δοκίμιο Q4 (550°C)

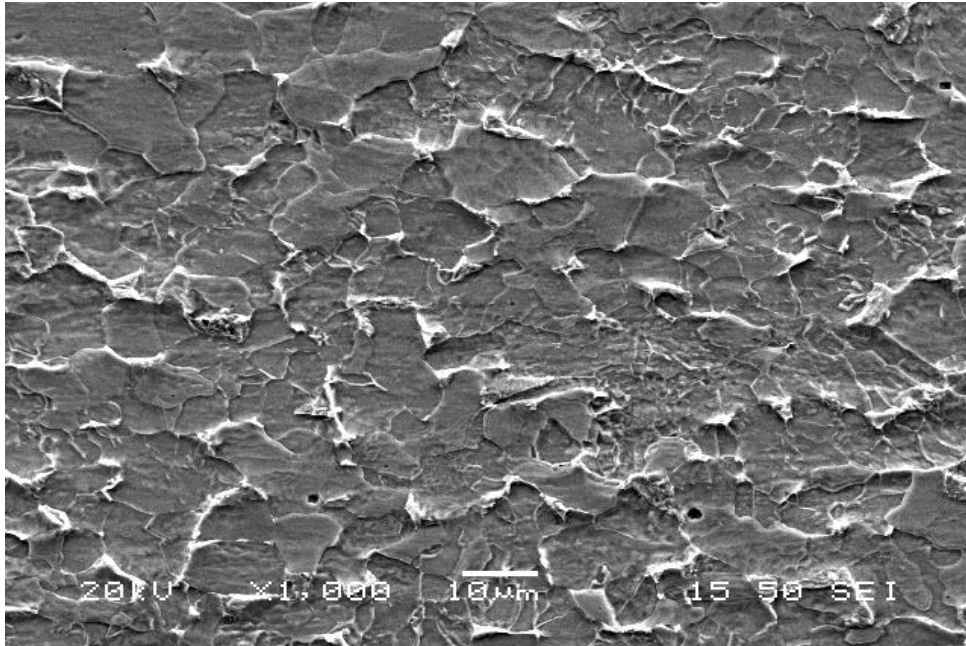
Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση φερριτοπερλιτική μικροδομή, με κυρίαρχη φάση τον φερρίτη. Το υλικό είναι λεπτόκοκκο, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 10 – 15 µm και ακόμη πιο λεπτομερούς κόκκους. Δεν παρατηρείται στην μικροδομή σαφής η διεύθυνση έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου Q4 βλέπουμε ότι το υλικό αποτελείται από σίδηρο.



*Εικόνα 49: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x500.*



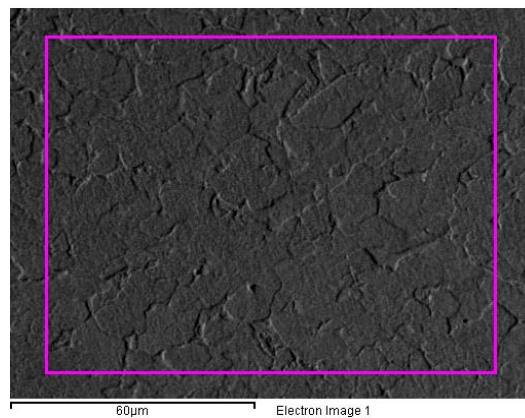
*Εικόνα 50: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x1000.*



Εικόνα 51: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου Q4 με μεγέθυνση x1000.

Element	Weight %	Atomic %
Fe K	98.97	99.03
Co K	1.03	0.97
Totals	100.00	

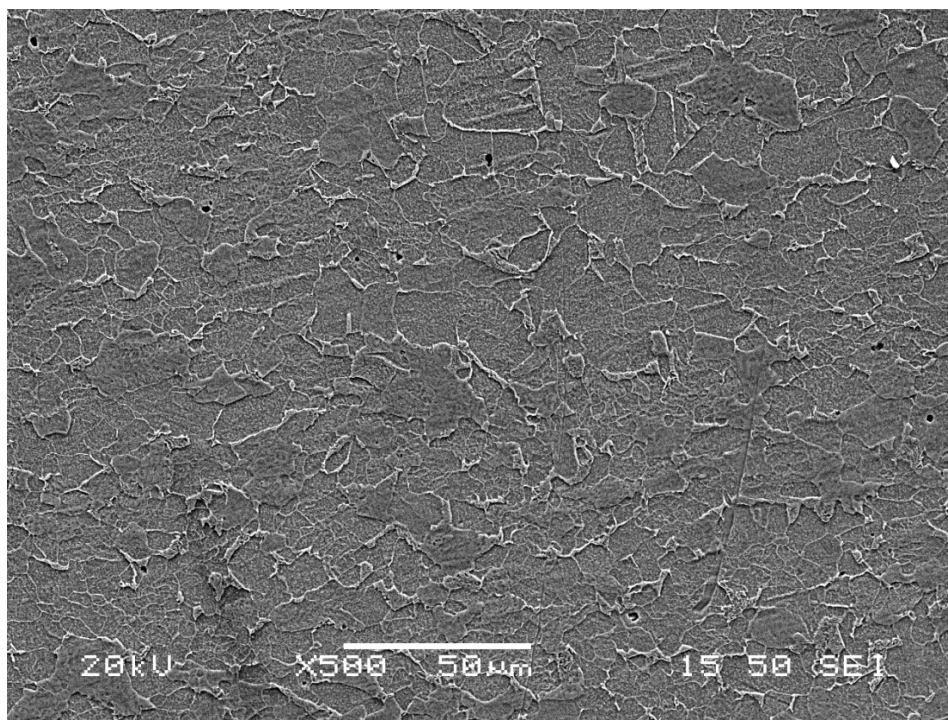
Πίνακας 12: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q4.



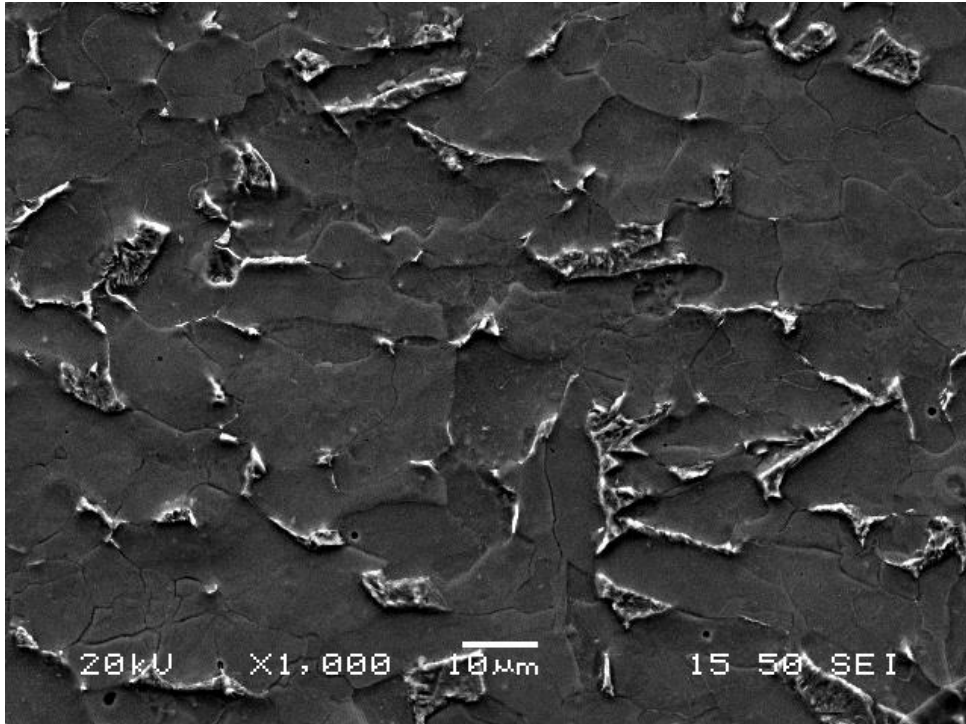
Εικόνα 52: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου Q4.

### Δοκίμιο E5 (450 οC)

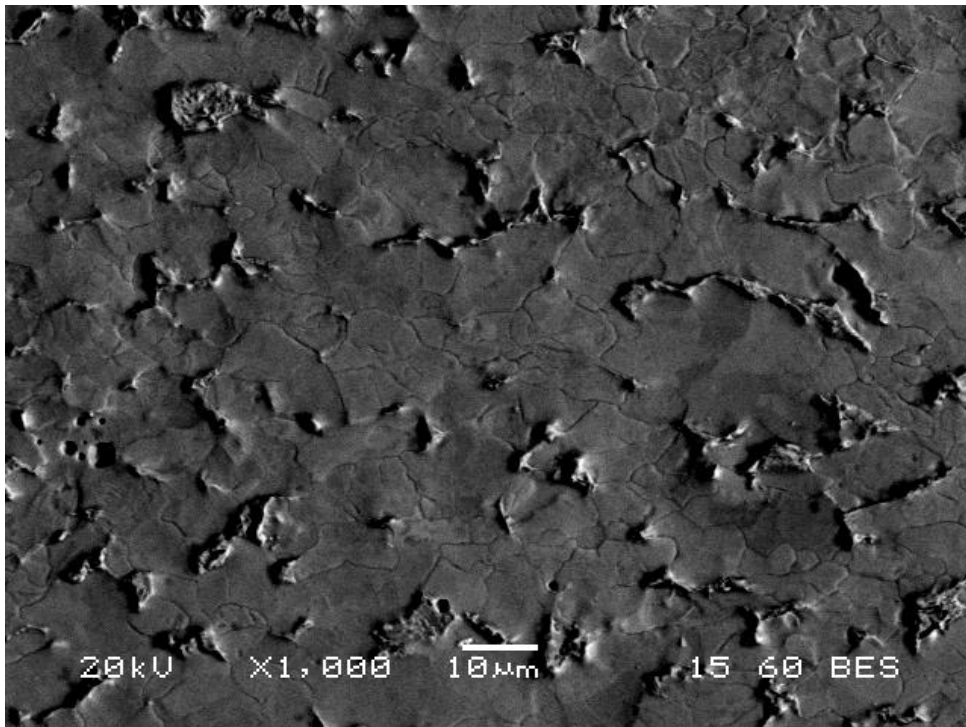
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται φερριτοπερλιτική μικροδομή, με κυρίαρχη φάση στο υλικό τον φερρίτη. Διακρίνεται πολύ λεπτόκοκκο, με μέγεθος κόκκων περίπου της τάξεως των 10μm, δεν παρατηρείται σαφής διεύθυνση της έλασης, ούτε παρουσιάζονται ιδιαίτερα παραμορφωμένοι οι κόκκοι του υλικού. Παρατηρώντας την μικροανάλυση (EDS) σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου E5, το υλικό αποτελείται 100% από σίδηρο.



*Εικόνα 53: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x500.*



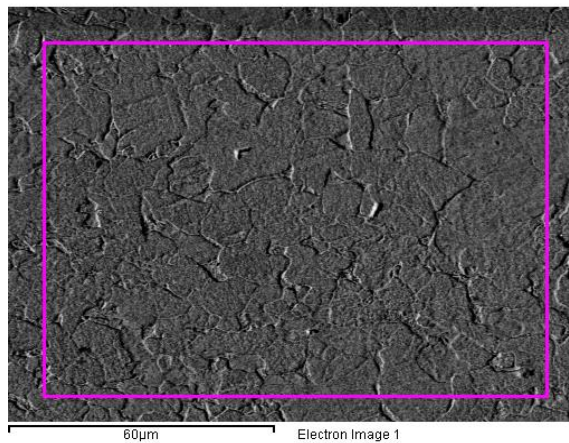
*Εικόνα 54: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x1000.*



*Εικόνα 55: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομής του δοκιμίου E5 με μεγέθυνση x1000.*

Element	Weight%	Atomic %
Fe K	100.00	100.00
Totals	100.00	

Πίνακας 13: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου E5



Εικόνα 56: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου E5



## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### *Βασικά χαρακτηριστικά της μελέτης*

Στην παρούσα εργασία το υλικό προς εξέταση είναι χάλυβας θερμής έλασης, υψηλής αντοχής – χαμηλής κραμάτωσης (high strength – low alloy) με κραματικές προσθήκες τιτανίου (<0,012%κ.β.) και βαναδίου (<0,088%κ.β.). Οι συγκεκριμένοι χάλυβες (HSLA) έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες.

Για την μελέτη του υλικού, ελήφθησαν 8 δοκίμια, εκ των οποίων τα τέσσερα είχαν προσθήκη τιτανίου, και τα άλλα τέσσερα προσθήκη τιτανίου και βαναδίου. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε θερμή έλαση, και ύστερα σε διάφορες θερμικές κατεργασίες (εικόνα 18) σχηματίζοντας την διφασική δομή α – φερρίτη και περλίτη.

Στόχος της μελέτης αυτής ήταν να εξετασθούν οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου χάλυβα, όταν επιβληθεί σε διάφορες θερμικές κατεργασίες καθώς και οι επιδράσεις των κραματικών στοιχείων, που ο συνδυασμός αυτών των δύο επιφέρει σκλήρυνση του υλικού. Δεύτερος βασικός στόχος, με το πέρας των δοκιμών για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, ήταν η μελέτη της μικροδομής του και η συσχέτιση αυτής με τις εξαγόμενες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του.

### *Αποτελέσματα σκληρομέτρησης*

Η σκληρομέτρηση αποτέλεσε τη μοναδική μέθοδο για την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Επιλέχθηκε αυτή η τεχνική για τον λόγο, πως αποτελεί την απλούστερη μέθοδο για την μέτρηση αυτών. Σε όλα τα δοκίμια έγιναν ίσες μετρήσεις (10).

Παρατηρείται (εικόνα 23) ότι τα δοκίμια με προσθήκη τιτανίου – βαναδίου (ομάδα Β) παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα κατά μέσο όρο, από τα δοκίμια τα οποία έχουν κραματική προσθήκη μόνο τιτανίου (ομάδα Α). Επίσης, τα δοκίμια της ομάδας Α καθώς αυξάνει η θερμοκρασία απόψυξης για το καθένα, μειώνεται η σκληρότητα τους (εικόνα 24). Αντίθετα, τα δοκίμια της ομάδας Β, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία απόψυξής τους, αυξάνεται αντίστοιχα η σκληρότητάς τους, μέχρι και τους 650°C, ενώ στους 750°C η σκληρότητα μειώνεται (εικόνα 25).

Επιπλέον, παρατηρείται ότι το δοκίμιο με την μεγαλύτερη σκληρότητα από όλα είναι το M4 με 156,2 HV, το οποίο έχει θερμοκρασία απόψυξης 650°C και μικροκραμάτωση βαναδίου και τιτανίου. Ωστόσο, στην αντίστοιχη θερμοκρασία απόψυξης για την ομάδα A, το δοκίμιο J6 με 127 HV, δεν παρουσιάζει την μεγαλύτερη σκληρότητα.

### ***Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM)***

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) αποτέλεσε μία από τις βασικές μεθόδους για την ανάλυση και σύγκριση των δοκιμίων χάλυβα HSLA. Σε όλα τα δοκίμια εξήχθησαν οι κατάλληλες μικρογραφίες για την πλήρη αναγνώριση όλων των φάσεων που βρίσκονταν σε αυτά. Τα όρια των φάσεων ήταν ευδιάκριτα και έτσι οι φάσεις μπορούσαν να διαχωριστούν και αναγνωριστούν. Όλα τα δοκίμια χαρακτηρίζονται από την μήτρα του  $\alpha$  – φερρίτη και στα όρια αυτού σχηματίζεται ο περλίτης. Μέσω των φωτογραφιών που εξήχθησαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρατηρείται η μικροδομή του υλικού καθώς αυτό υποβλήθηκε σε θερμή έλαση, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό λεπτόκοκκου φερρίτη.

Άλλα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την ηλεκτρονική μικροσκοπία είναι από τις μικρογραφίες με την χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Οι μικρογραφίες αυτές δίνουν πληροφορίες για την κατανομή των στοιχείων και σε όλα τα δοκίμια δεν παρατηρήθηκε συγκέντρωση στοιχείων με μορφή κατακριμνήσματος. Παράλληλα με τις μικρογραφίες του SEM χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική του EDS, για την στοιχειακή ανάλυση του υλικού. Το στοιχείο που αναγνωρίστηκε είναι μόνον ο σίδηρος.

### ***Συσχέτιση μικροδομής - μετρήσεων σκληρότητας***

Τα αποτελέσματα από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) δείχνουν ότι το υλικό αποτελείται από λεπτόκοκκο φερρίτη και περλίτη.

Από τα δοκίμια της ομάδας A την μεγαλύτερη σκληρότητα έχει το A5, με 143,8 HV και θερμοκρασία απόψυξης 450°C. Επιπλέον από τις εικόνες 26 – 41, παρατηρείται ότι το δοκίμιο A5 έχει πολύ μικρούς κόκκους φερρίτη, της τάξεως των ~5 $\mu$ m και ακόμα μικρότερους, σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Το ίδιο ισχύει και για τα

δοκίμια της ομάδας B, αυτό με την μεγαλύτερη σκληρότητα είναι το M4, με 156,2 HV και θερμοκρασία απόψυξης 650°C. Ακόμη, από τις εικόνες 41 – 57, παρατηρείται ότι το δοκίμιο M4 είναι και αυτό πολύ λεπτόκοκκο σε σχέση με τα άλλα τις ομάδας B και έχει αρκετούς κόκκους τη τάξεως 2 – 5  $\mu\text{m}$ .

Οι κραματικές προσθήκες Ti και V βοηθούν στην εκλέπτυνση των κόκκων του φερρίτη, καθώς και στο σχηματισμό νιτριδίων και καρβιδίων, τα οποία κατακρημνίζονται, κατά την διάρκεια της θερμής έλασης, μετά από αυτή και στην απόψυξη του υλικού. Το τιτάνιο είναι πιο αποτελεσματικό στην εκλέπτυνση κόκκου συγκριτικά με το V, καθώς τα TiN παρουσιάζουν τη μικρότερη διαλυτότητα στον οστενίτη και συνεπώς είναι ιδιαίτερα σταθερά [22]. Όμως, η συνδυασμένη προσθήκη βαναδίου – τιτανίου επιφέρει καλύτερη εκλέπτυνση κόκκου του φερρίτη. Επομένως, αυτό θα μπορούσε να δικαιολογήσει την πιο λεπτομερή μικροδομή των δοκιμίων της ομάδας B, από την ομάδα A.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί επίσης η μικρότερη θερμοκρασία απόψυξης του σκληρότερου δοκιμίου της ομάδας A (A5, CT - 450°C) σε σχέση με την θερμοκρασία των 650°C για το σκληρότερο δοκίμιο της ομάδας B (M4). Το υλικό με την μικρότερη θερμοκρασία απόψυξης έχει σαν αποτέλεσμα, η ταχεία απόψυξη του οστενίτη να διαρκεί περισσότερο, και συνεπώς να υπάρχει μεγαλύτερος πολλαπλασιασμός στη δημιουργία πυρήνων φερρίτη, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον ρυθμό ανάπτυξής τους και επέρχεται σχηματισμός πολλών μικρών κόκκων φερρίτη[14].

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Από την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού (εικόνα 23) προκύπτει πως το δοκίμιο με την μεγαλύτερη σκληρότητα είναι το M4, το οποίο έχει προσθήκη τιτανίου ( $Ti \leq 0,012\% \text{κ.β.}$ ) και βαναδίου ( $V \leq 0,088\% \text{κ.β.}$ ).
- Από τον θερμικό κύκλο (εικόνα 18) η βέλτιστη θερμοκρασία απόψυξης μετά από θερμή έλαση είναι οι  $650^{\circ}\text{C}$ , λόγω της μεγαλύτερης σκληρότητας και ικανοποιητικής μικροδομής που παρουσιάζει το δοκίμιο M4 και προφανώς χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.
- Προκύπτει ότι η προσθήκη βαναδίου – τιτανίου επιφέρει καλύτερη σκληρότητα στο υλικό (εικόνα 23), σε συνδυασμό και με τις θερμικές κατεργασίες, σε σχέση με την προσθήκη μονάχα του τιτανίου.
- Από την μελέτη της μικροδομής του υλικού με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), προκύπτει το συμπέρασμα ότι η φερριτοπερλιτική μικροδομή είναι αρκετά λεπτόκοκκη, με κυρίαρχη φάση τον φερρίτη. Επίσης, με την μέθοδο ανάλυσης EDS, αναγνωρίστηκε μόνο ο σίδηρος, ενώ τα κραματικά στοιχεία τιτάνιο και βανάδιο δεν ανιχνεύθηκαν λόγω της πολύ μικρής προσθήκης τους ( $<0,1\% \text{κ.β.}$ ).
- Από την παρατήρηση της μικροδομής του υλικού, προκύπτει επίσης ότι τα δοκίμια της ομάδας A, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία απόψυξης για το καθένα, παρατηρείται και αντίστοιχα πιο λεπτομερής μικροδομή, δηλαδή μικρότεροι κόκκοι φερρίτη (εικόνες 26 – 40). Αντιθέτως, για τα δοκίμια της ομάδας B καθώς μειώνεται η θερμοκρασία απόψυξης για το καθένα, υπάρχει μικρή διαφοροποίηση στο μέγεθος κόκκων του φερρίτη (εικόνες 41 – 57).

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “ Γενική Μεταλλογνωσία 1”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π
2. Γ.Δ. Παπαδημητρίου: "ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ Ι, Εργαστηριακές Ασκήσεις", Αθήνα 1999
3. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “ Μεταλλογνωσία 2 Τα Κράματα”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π
4. Γ.Δ. Παπαδημητρίου: "Μεταλλοτεχνία"
5. Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “ Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου Και Χάλυβα”, Αθήνα 2000
6. Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής: “Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
7. Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος: “Φυσική Μεταλλουργία”, Εκδόσεις Τζιόλα
8. Γ. Φούρλαρης: “ Μηχανισμοί σκλήρωσης χαλύβων ”, Αθήνα 2011
9. Γ. Φούρλαρης: “ Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου Και Χάλυβα”, Αθήνα 2011
10. Π. Μαυροειδής: " Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος", Αθήνα 2005
11. Aj DeArdo, ed. IF Steels 2000 Conference Proceedings, ISS, Warrendale 2000
12. Altan T, ‘Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts’, Stamping Journal, An FMA Publication December 2006, [www.stampingjournal.com](http://www.stampingjournal.com)
13. Arcelor Mittal, Automotive Worldwide, Martensitic Steels, [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com)
14. ASM International (2010), ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, High-strength Structural and high-strength low-alloy steels, 1037-1051.
15. Auto/Steel Partnership, Advanced High-Strength Steels Product and Process, Application Guidelines, Southfield Michigan, April 2008
16. Choi ID, et.al. Deformation behavior of low carbon TRIP sheet steels at high strain rates, ISIJ Int 2002, vol. 42(12), pp.1483-9
17. De Cooman BC and De Vyt A, Int. Forum for the Properties and Application of IF Steels, IF Steels 2003, ISIJ, Tokyo, (2003), pp.249
18. Engl B, Heidmann U, Muschenborn W, “Cold Formability and Light Weight Construction-Driving forces for recent steel development, in Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties”, ed.W.Bleck, Verlag Mainz, Aachen, 1998, pp.39-50

19. Ghosh P, Ghosh C, RAY RK, ‘‘Precipitation in Interstitial Free High Strength Steels’’, *ISIJ International*, 2009, vol.49 (7), pp. 1080–1086
20. Hilditch T, Toman S, Fabijanic D, ‘‘Post-Forming Heat Treatment of Dual phase steel components for automotive applications using a fluid bed furnace’’, *Materials Forum*, 2007, vol. 31
21. J. R. Davis. *Alloying – Understanding the basics*. ASM International, 2001
22. M. Maalekian. *The Effects of Alloying Elements on Steels (I)*. TU Graz. October 2007
23. Oliver S, Jones T.B, Fourlaris G, ‘‘Dual Phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing’’, *Materials Characterization* 2007, vol. 58, pp.390-400
24. Silva F, Lopes N.I.A., Santos D.B, ‘‘Microstructural characterization of the C-Mn multiphase high strength cold rolled steel’’, *Materials Characterization* 56 2006, pp.3
25. Smith WA, ‘‘Structure and Properties of Engineering Alloys’’, 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill, 1993, pp.119-123
26. Takechi H: *ISIJ Int.*, 1994, vol.34, pp.1
27. Takechi H: *IF STEELS 2000 PROCEEDINGS*, Pittsburgh, 2000, pp.1
28. Varughese R, Pense A.W: ‘‘Microstructural development in the coarse-grained, heat-affected zone in titanium vanadium microalloyed HSLA steels’’, *Materials Characterization*, 1993, vol.30 (1), pp.35-43
29. W. B. Morrison. *Overview of Microalloying in Steel*.
30. *World Auto Steel, ‘‘ Advanced High Strength Steels (AHSS), Application Guideline’’, Version 5, May 2014, www.worldautosteel.org*
31. Zackay VF, Parker ER, Fahr D, Busch R, ‘‘The enhancement of Ductility in High Strength Steel’’, *Transactions of the ASM*, 1967, vol.60, pp.252-259
32. [www.azom.com/article.aspx.ArticleID=2537](http://www.azom.com/article.aspx.ArticleID=2537)
33. [bsbcorp.vn/knowledge-center/thep-can-nong?lang=en](http://bsbcorp.vn/knowledge-center/thep-can-nong?lang=en)
34. [www.diytrade.com/china/pd/6930861/Hot\\_Rolling\\_Mill\\_for\\_Steel\\_Bar\\_Rod.html](http://www.diytrade.com/china/pd/6930861/Hot_Rolling_Mill_for_Steel_Bar_Rod.html)
35. [eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHX115/%CE%94%CE%B9%CE%B4%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%A0%CE%B1%CE%BA%CE%AD%CF%84%CE%BF/%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A4%CE%95%CE%A7%CE%](http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHX115/%CE%94%CE%B9%CE%B4%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%A0%CE%B1%CE%BA%CE%AD%CF%84%CE%BF/%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A4%CE%95%CE%A7%CE%)

9D%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%  
CE%B1%202.pdf

36. [www.incar.thyssenkrupp.com](http://www.incar.thyssenkrupp.com)
37. [www.mepc.com.cn/detail.aspx?articleid=357](http://www.mepc.com.cn/detail.aspx?articleid=357)
38. [www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/mhx\\_symp\\_ylik\\_VI.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/mhx_symp_ylik_VI.pdf)
39. [www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Tensile.htm](http://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Tensile.htm)
40. [www.salzgitter-flachstahl.de/en/Produkte/I\\_Stah](http://www.salzgitter-flachstahl.de/en/Produkte/I_Stah)
41. [www.tatasteeleurope.com/en/products/strip\\_products/hotrolled\\_strip\\_steels/tenform\\_hot-rolled\\_carbon-manganese\\_steel](http://www.tatasteeleurope.com/en/products/strip_products/hotrolled_strip_steels/tenform_hot-rolled_carbon-manganese_steel)
42. <http://wheelerzworld.blogspot.gr/2011/06/volvo-xc60.html>
43. [www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/AHSSDiagram\\_WorldAutoSteel-copy.png](http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/AHSSDiagram_WorldAutoSteel-copy.png)