



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΦΑΣΕΩΝ ΔΙΦΑΣΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΥΠΟΥ DP600 ΚΑΙ
ΣΥΝΑΚΟΛΟΥΘΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Γ. ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

Μάρτιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΦΑΣΕΩΝ ΔΙΦΑΣΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΤΥΠΟΥ DP600 ΚΑΙ
ΣΥΝΑΚΟΛΟΥΘΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις:

(Υπογραφή)

.....
Γ. Φούρλαρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Η. Χαλικιά
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σ. Παπαευθυμίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

Μάρτιος 2019

3.3.3.3	Χάλυβες απαλλαγμένοι από στοιχεία παρεμβολής – Interstitial Free (IF) Steels.....	37
3.3.3.4	Ισοτροπικοί χάλυβες – Isotropic Steels.....	37
3.3.3.5	Ανθρακούχοι – Μαγγανιούχοι χάλυβες – Carbon-Manganese (CM) Steels.....	37
3.3.3.6	Χάλυβες υψηλής αντοχής , χαμηλής κραμάτωσης – High Strength Low Alloy (HSLA) Steels.....	37
3.3.3.7	Διφασικοί χάλυβες – Dual Phase (DP) Steels.....	38
3.3.3.8	Αυξανόμενης Πλαστικότητας κατά την παραμόρφωση – TRIP Steels.....	38
3.3.3.9	Σύνθετης μικροδομής χάλυβες – Complex Phase (CP) Steels.....	38
3.3.3.10	Πλαστικότητας κατά τον προκαλούμενο διδυμισμό.....	38
3.3.3.11	Boron Steels.....	39
3.3.3.12	Μαρτενσιτικοί Χάλυβες – Martensitic Steels.....	39
3.3.3.13	Ferritic-Bainitic (FB) Steels.....	39
3.4	Γενικά στοιχεία διφασικών χαλύβων (Dual Phase).....	40
3.4.1	Ιστορική αναδρομή.....	40
3.4.2	Ονοματολογία διφασικών χαλύβων	41
3.4.3	Οι φάσεις των διφασικών χαλύβων.....	42
3.4.3.1	Φερρίτης.....	42
3.4.3.2	Μαρτενσίτης.....	43
3.4.4	Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός.....	44
3.4.5	Μέσα Βαφής.....	45
3.4.6	Παραγωγή διφασικών χαλύβων.....	46

3.4.7	Επίδραση των κραματικών στοιχείων στους διφασικούς χάλυβες.....	50
3.4.8	Θερμικές κατεργασίες.....	54
3.4.8.1	Έλεγχος μεγέθους κόκκων φερρίτη-μαρτενσίτη.....	55
3.4.9	Μηχανικές Ιδιότητες.....	56
3.4.10	Συγκολλησιμότητα των διφασικών χάλυβων.....	59
3.4.11	Χρήσεις στο αμάξωμα του αυτοκίνητου.....	60
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	62
4.1	Περιγραφή του υλικού.....	62
4.2	Προετοιμασία δοκιμίων.....	63
4.2.1	Κοπή.....	63
4.2.2	Θερμικές κατεργασίες.....	64
4.2.3	Ονομασία δοκιμίων.....	65
4.2.4	Εγκιβωτισμός.....	65
4.2.5	Λείανση.....	66
4.2.6	Στίλβωση.....	67
4.2.7	Χημική προσβολή.....	68
4.3	Μέθοδοι εξέτασης της μικροδομής.....	68
4.3.1	Οπτικό Μικροσκόπιο (Light Optical Microscope , LOM).....	68
4.3.2	Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM).....	69
4.4	Μέθοδοι μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων.....	70
4.4.1	Δοκιμές Σκληρότητας.....	70
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
5.1	Εξέταση της μικροδομής.....	71

5.2 Παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).....	72
5.2.1 Θερμοκρασία 750 °C.....	75
5.2.2 Θερμοκρασία 775 °C.....	84
5.2.3 Θερμοκρασία 800 °C.....	93
5.3 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων.....	102
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	103
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	106
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Γεώργιο Φούρλαρη, Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ο οποίος δέχτηκε να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ για τον χρόνο που διέθεσε, για τις υποδείξεις και την καθοριστική συμβολή του σε οποιοδήποτε ζήτημα προέκυψε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η επιστημονική του καθοδήγηση και συνεργασία είναι υπεύθυνες για την ποιότητα και διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ. Σ. Παπαευθυμίου και την κα. Η. Χαλικιά για την τιμή που μου έκαναν με την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε εξολοκλήρου στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών σε στενή συνεργασία με τον υποψήφιο διδάκτορα Σταύρο Δεληγιάννη. Ευχαριστώ θερμά τον Σταύρο Δεληγιάννη για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, για τις συμβουλές, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε.

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

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 : Όρια περιεκτικότητας κραματικών στοιχείων για τους μη κραματωμένους χάλυβες.....	30
Πίνακας 3.2 : Όρια χημικής σύστασης μεταξύ χαλύβων ποιότητας (quality steels)- ειδικών χαλύβων (special steels).....	32
Πίνακας 3.3 : Η παρουσία διάφορων τύπων διφασικών χαλύβων στο αμάξωμα του αυτοκινήτου.....	42
Πίνακας 5.1 : Χημική ανάλυση ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου αναφοράς.....	73
Πίνακας 5.2 : Σημειακή χημική ανάλυση στην περιοχή του μαρτενσίτη στο δοκίμιο αναφοράς.....	74
Πίνακας 5.3 : Σημειακή χημική ανάλυση στην περιοχή του φερρίτη στο δοκίμιο αναφοράς.....	74
Πίνακας 5.4 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/2min.....	77
Πίνακας 5.5 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/5min.....	80
Πίνακας 5.6 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/30min.....	83
Πίνακας 5.7 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/2min.....	86
Πίνακας 5.8 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/5min.....	89
Πίνακας 5.9 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/30min.....	92
Πίνακας 5.10 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/2min.....	95
Πίνακας 5.11 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/5min.....	98
Πίνακας 5.12 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/30min.....	101
Πίνακας 5.13 : Μέσος όρος σκληρότητας όλων των δοκιμίων.....	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 : Το διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου – άνθρακα.....	19
Εικόνα 3.2 : Το διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου – άνθρακα με φωτογραφίες των μικρογραφικών συστατικών.....	20
Εικόνα 3.3 : Φερριτης.....	21
Εικόνα 3.4 : Περλίτης.....	22
Εικόνα 3.5 : Μπαινίτης.....	23
Εικόνα 3.6 : Μαρτενσίτης.....	23
Εικόνα 3.7 : Παράδειγμα στερεού διαλύματος παρεμβολής και αντικατάστασης.....	26
Εικόνα 3.8 : Κίνηση διαταραχής γύρω από ευμεγέθη κατακρημνίσματα.....	28
Εικόνα 3.9 : Επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη (R & D) των μεγαλύτερων βιομηχανικών τομέων.....	33
Εικόνα 3.10 : Ποσοστιαία χρήση διάφορων υλικών στο αμάξωμα του αυτοκινήτου.....	34
Εικόνα 3.11 : Οφέλη από τη χρήση AHSS χαλύβων.....	35
Εικόνα 3.12 : Σχέση ολκιμότητας – αντοχής σε θραύση για προηγμένους χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας.....	36
Εικόνα 3.13 : Διαφορετικοί διφασικοί χάλυβες, ίδιας αντοχής σε θραύση αλλά διαφορετικές τιμές επιμήκυνσης.....	41
Εικόνα 3.14 : Κυψελίδα χωροκεντρωμένης κυβικής δομής.....	43
Εικόνα 3.15 : Τετραγωνική κυψελίδα.....	43
Εικόνα 3.16 : Εξέλιξη της θερμοκρασίας έναρξης και λήξης του μαρτενιτικού μετασχηματισμού, M_s και M_f αντίστοιχα , αναφορικά με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.....	44
Εικόνα 3.17 : Τυπική μικροδομή διφασικού χάλυβα στο οπτικό μικροσκόπιο.....	46
Εικόνα 3.18 : Παραγωγή διφασικών χαλύβων με ενδοκρίσιμη ανόπτηση.....	47
Εικόνα 3.19 : Διάγραμμα φάσεων για Fe-1% Mn-C στο οποίο παρουσιάζονται τα ποσοστά (%) της φάσης του μαρτενσίτη για ένα κράμα 0,11C, το οποίο υφίσταται βαφή από διάφορες θερμοκρασίες.....	48
Εικόνα 3.20 : Κατανομή του άνθρακα (C) στους διφασικούς χάλυβες.....	48
Εικόνα 3.21 : Μορφή φερρίτη και μαρτενσίτη στους διφασικούς χάλυβες, με δυο μικροσκοπικές τεχνικές παρατήρησης SEM και TEM	49
Εικόνα 3.22 : Γραφική παρουσίαση της περιεκτικότητας του μαρτενσίτη σε άνθρακα σε σχέση με τη σκληρότητα και το ογκομετρικό κλάσμα του μαρτενσίτη.....	51

Εικόνα 3.23 : Επίδραση των κραματικών στοιχείων στη συμπεριφορά του υλικού, στο διάγραμμα TTT.....	52
Εικόνα 3.24 : Επίδραση της περιεκτικότητας του Mn στη θερμοκρασία και στο σχηματισμό ωστενίτη.....	52
Εικόνα 3.25 : Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής χαλύβων DP, μέσω ενδοκρίσιμης ανόπτησης και βαφής.....	54
Εικόνα 3.26 : Euro-NCAP οργάνωση πειράματος για δοκιμή της αντοχής του αυτοκινήτου κατά την κρούση, για μετωπική σύγκρουση.....	58
Εικόνα 3.27 : Δυο ζώνες αυτοκινήτου για τη διαχείριση των επιπτώσεων της σύγκρουσης.....	58
Εικόνα 3.28 : Ποσοστιαία χρήση των πολυφασικών προηγμένων χαλύβων υψηλής αντοχής και η χρήση τους πάνω στο αμάξωμα του αυτοκινήτου.....	60
Εικόνα 3.29 : Cadillac ATS.....	61
Εικόνα 3.30 : Ποσοστιαία χρήση των AHSS χαλύβων σύμφωνα με το πρόγραμμα Future Steel Vehicle (FSV).....	61
Εικόνα 4.1 : Μηχανή κοπής του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της σχολής MMM...63	63
Εικόνα 4.2 : Εγκιβωτισμένα δοκίμια.....	65
Εικόνα 4.3 : Λειαντικός δίσκος της σχολής MMM.....	67
Εικόνα 4.4 : Μηχανή στίλβωσης.....	67
Εικόνα 4.5 : Προσομοίωση δοκιμής σκληρομέτρησης Vickers.....	70
Εικόνα 4.6 : Μηχανή σκληρομέτρησης της σχολής MMM.....	71
Εικόνα 5.1 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, SEI x2000, σε κατάσταση αναφοράς.....	72
Εικόνα 5.2 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς.....	73
Εικόνα 5.3 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς.....	73
Εικόνα 5.4 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς.....	74
Εικόνα 5.5 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς.....	74
Εικόνα 5.6 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	75

Εικόνα 5.7 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	76
Εικόνα 5.8 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	76
Εικόνα 5.9 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	77
Εικόνα 5.10 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/2min.....	77
Εικόνα 5.11 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	78
Εικόνα 5.12 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	79
Εικόνα 5.13 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	79
Εικόνα 5.14 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	80
Εικόνα 5.15 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/5min.....	80
Εικόνα 5.16 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	81
Εικόνα 5.17 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	82
Εικόνα 5.18 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	82
Εικόνα 5.19 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	83
Εικόνα 5.20 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/30min.....	83
Εικόνα 5.21 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	84
Εικόνα 5.22 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	85
Εικόνα 5.23 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	85
Εικόνα 5.24 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	86

Εικόνα 5.25 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/2min.....	86
Εικόνα 5.26 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	87
Εικόνα 5.27 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	88
Εικόνα 5.28 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	88
Εικόνα 5.29 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	89
Εικόνα 5.30 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/5min.....	89
Εικόνα 5.31 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	90
Εικόνα 5.32 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	91
Εικόνα 5.33 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	91
Εικόνα 5.34 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	92
Εικόνα 5.35 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/30min.....	92
Εικόνα 5.36 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	93
Εικόνα 5.37 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	94
Εικόνα 5.38 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση x1000.....	94
Εικόνα 5.39 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση x2000.....	95
Εικόνα 5.40 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/2min.....	95
Εικόνα 5.41 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	96
Εικόνα 5.42 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	97

Εικόνα 5.43 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση x1000.....	97
Εικόνα 5.44 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση x2000.....	98
Εικόνα 5.45 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/5min.....	98
Εικόνα 5.46 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	99
Εικόνα 5.47 : Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	100
Εικόνα 5.48 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση x1000.....	100
Εικόνα 5.49 : Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη απόπτωση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση x2000.....	101
Εικόνα 5.50 : Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/30min.....	101
Εικόνα 5.51 : Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας όλων των δοκιμίων.....	103

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις για ασφαλή, χαμηλού βάρους, ανακυκλώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον αυτοκίνητα, είναι πρόκληση για τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή υλικών που ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις. Οι χάλυβες υπερυψηλής αντοχής περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους χάλυβων οι οποίοι παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες, όπως αντοχή, ολκιμότητα και διαμορφωσιμότητα. Οι διφασικοί χάλυβες-dual phase (DP), ανήκουν στην κατηγορία των χάλυβων υπερυψηλής αντοχής. Οι αυξανόμενη χρήση των DP χάλυβων σε μέρη του αμαξώματος του αυτοκινήτου έγκειται στο γεγονός της παραγωγής ελαφρύτερων οχημάτων, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και κατά συνέπεια την μείωση των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.

Οι εξαιρετικές ιδιότητες των διφασικών χάλυβων (DP) που αναλύθηκαν παραπάνω οφείλονται στην μικροδομή τους. Οι διφασικοί χάλυβες αποτελούνται από δυο φάσεις, δηλαδή την κυρίαρχη φερριτική μήτρα όπου μέσα σε αυτή βρίσκονται οι μαρτενσιτικές νησίδες του μαρτενσίτη. Οι μηχανικές ιδιότητες του διφασικού χάλυβα μεταβάλλονται ανάλογα με τα ποσοστά των δυο αυτών φάσεων.

Σκοπός της διπλωματικής διατριβής είναι να δημιουργηθεί η κατάλληλη μικροδομή μέσω κατάλληλων θερμικών διαδικασιών με στόχο τη μεταβολή του ποσοστού του φερρίτη και του μαρτενσίτη. Αυτό επιτεύχθηκε με ενδοκρίσιμη ανόπτηση σε διάφορες θερμοκρασίες και χρόνους.

Οι τροποποιημένες μικροδομές που επιτευχθήκαν για τον διφασικό χάλυβα DP600 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ανάλογα με το ποσοστό φερρίτη/μαρτενσίτη έχουμε διαφορετικές τιμές σκληρότητας.

Τέλος, στόχος της διπλωματικής διατριβής είναι να εξετάσουμε για ποια θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης και για πόσο χρόνο θα έχουμε ένα δοκίμιο με ίδιες μηχανικές ιδιότητες με αυτό του αρχικού δοκιμίου.

ABSTRACT

The persistent and increasing demand for secure, low weight, recyclable and environmentally friendly cars, is a challenge for automotive companies. This has led in producing materials that fulfill those requirements. Advanced high strength steels contain different types of steels that showcase some excellent properties like strength, ductility and configurability. The dual phase (DP) steels belong to the category of advanced high strength steels. By using DP Steel on car body parts makes them lighter resulting in better fuel economy and reducing the air pollution.

The excellent properties of DP Steels are due to their microstructure. DP Steel are consisting of two phases, the major ferritic matrix and the martensitic islands of martensite that are inside ferritic matrix. Mechanical properties of DP Steels alternate depending on percentage of each phase.

The aim of this diploma thesis is to be created the right microstructure using the right thermal process in order the alternation of ferrite/martensite percentage. That was accomplished by using intercritical anneal in different temperatures and time.

The modified microstructure that were made for DP600 Steel lead us to the conclusion that for different percentage of ferrite/martensite, we get different hardness values.

Finally, the main goal of this diploma thesis is to research for which temperature intercritical anneal and for how long we will have a final product with the same mechanical properties as received sample.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εξελίξεις στην παγκόσμια οικονομία καθώς και η πρόκληση για αναζήτηση προϊόντων και τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον οδήγησε την παγκόσμια χαλυβουργία καθώς και τις αυτοκινητοβιομηχανίες, στη διαρκή αναζήτηση νέων διεργασιών και προϊόντων που να καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις.

Το υλικό που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή είναι οι διφασικοί χάλυβες – dual phase (DP steels), οι οποίοι παράγονται είτε με θερμή είτε με ψυχρή έλαση και χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η ομάδα των DP χάλυβων ανήκουν στην κατηγορία χάλυβων χαμηλής κραμάτωσης και αποτελούνται από μια φερριτική μήτρα που περιέχει μια δεύτερη φάση σκληρού μαρτενσίτη σε μορφή νησίδων.

Από την μια πλευρά, η μαλακή φερριτική φάση που διακρίνεται στην μικροδομή ενός DP χάλυβα προσδίδει στον χάλυβα υψηλή ολκιμότητα. Επιπρόσθετα, η υψηλή τιμή εργοσκληρυνσης σε συνδυασμό με την εξαιρετική επιμήκυνση κάνει τους χάλυβες αυτούς να έχουν πολύ υψηλότερο όριο διαρροής (UTS) από τους συμβατικούς χάλυβες. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της φάσης του σκληρού μαρτενσίτη προσδίδει στον διφασικό χάλυβα υψηλές τιμές σκληρότητας. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό των φάσεων φερρίτη/μαρτενσίτη αλλάζει μετα από θερμική κατεργασία ανόπτησης σε διαφορετικές θερμοκρασίες και διαφορετικούς χρόνους παραμονής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, διερευνάται η συσχέτιση της μηχανικής αντοχής του διφασικού χάλυβα (DP steel) με την μικρογραφική του δομή.

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 διφασικού χάλυβα (Dual Phase steel).
3. Να ανιχνευθεί για ποια θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης και πόσο χρόνο θα πετύχουμε τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με το αρχικό δοκίμιο (AR).

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 ΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΙ Η ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΟΥΣ

3.1.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Στερεά διαλύματα – Φάσεις και διαγράμματα φάσεων

Τα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις καθημερινές εφαρμογές, δεν είναι καθαρά σώματα, αλλά κράματα (alloys), δηλαδή συνδυασμός δυο ή περισσότερων μετάλλων ή μετάλλου (μετάλλων) με αμέταλλο (αμέταλλα) ή επαμφοτερίζον στοιχείο. Δεν είναι ούτε καν ομογενή μίγματα σε μικροσκοπική κλίμακα, αλλά συνίστανται από σώματα που περιέχουν διάφορες διακεκριμένες φάσεις με διαφορετικές ιδιότητες. Μόνο σε μακροσκοπική κλίμακα είναι ομογενή.

Ο όρος φάση (phase) αναφέρεται σε μία ποσότητα ύλης που έχει τις ίδιες ιδιότητες, την ίδια χημική σύσταση και χωρίζεται από το περιβάλλον της με μία περατωτική επιφάνεια.

Τα στοιχεία τα οποία βρίσκονται στη μικρότερη αναλογία μέσα σε ένα κράμα, ονομάζονται κραματικά στοιχεία (alloying elements) ή στοιχεία προσθήκης. Οι γραφικές παραστάσεις, που περιγράφουν σε συντεταγμένες θερμοκρασίας - συγκέντρωσης, τις περιοχές ύπαρξης ή συνύπαρξης των φάσεων ενός συστήματος ονομάζονται διαγράμματα ισορροπίας φάσεων (phase equilibrium diagrams).

Μερικές από τις σημαντικές πληροφορίες που μας παρέχει ένα διάγραμμα ισορροπίας φάσεων είναι οι παρακάτω:

- Ποιες φάσεις υπάρχουν και με ποια χημική σύσταση σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες, σε συνθήκες εξαιρετικά αργής απόψυξης (συνθήκες ισορροπίας).
- Τη διαλυτότητα, σε στερεά κατάσταση ενός στοιχείου στο άλλο (συνθήκες ισορροπίας).
- Τη θερμοκρασία στην οποία οι διαφορετικές φάσεις αρχίζουν να τήκονται και τη θερμοκρασία στην οποία ένα ψυχόμενο κράμα αρχίζει να στερεοποιείται, σε συνθήκες ισορροπίας, καθώς και τη θερμοκρασιακή περιοχή μέσα στην οποία πραγματοποιείται η στερεοποίηση.

Τέλος, ως πολυμορφισμός ή αλλοτροπία, ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα στοιχεία, όπως για παράδειγμα ο σίδηρος (Fe), παρουσιάζουν σε στερεή κατάσταση περισσότερες από μία κρυσταλλικές δομές, που καθεμία είναι σταθερή σε ορισμένη θερμοκρασιακή περιοχή.

Αλλοτροπικές μορφές καθαρού σιδήρου και στερεά διαλύματα σιδήρου

Ο καθαρός σίδηρος παρουσιάζεται ανάλογα με τη θερμοκρασία και την πίεση, με δυο αλλοτροπικές μορφές. Η μία (σίδηρος α) κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (bcc) και η άλλη (σίδηρος γ) στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (fcc).

Ο σίδηρος α εμφανίζεται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 910°C, καθώς και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1390 °C (ονομάζεται σε εκείνη την περίπτωση σίδηρος δ). Ενδιάμεσα εμφανίζεται ο σίδηρος γ.

Τόσο ο σίδηρος α όσο και ο σίδηρος γ σχηματίζουν στερεά διαλύματα παρεμβολής, δηλαδή άτομα μικρών διαστάσεων όπως ο άνθρακας, το άζωτο, το βόριο και το υδρογόνο, παρεμβάλλονται μέσα στην κρυσταλλική δομή του, δηλαδή συνωστίζονται μεταξύ των κενών των ατόμων του σιδήρου.

Το σημαντικότερο και χρησιμότερο άτομο παρεμβολής στο σίδηρο είναι ο άνθρακας και ακολουθούν σε χρησιμότητα το άζωτο και το βόριο. Το οξυγόνο είναι ενοχλητικό, επιβλαβές ή ανεκτό κατά περίπτωση στοιχείο, ενώ το υδρογόνο είναι επιβλαβέστατο. Στα βιομηχανικά κράματα απαιτείται αυστηρός έλεγχος των περιεκτικότητων τους, ανεξάρτητα του αν συμπεριφέρονται ως χρήσιμες κραματικές προσθήκες ή ως ακαθαρσίες.

Το στερεό διάλυμα άνθρακα στο σίδηρο γ ονομάζεται ωστενίτης, ενώ το στερεό διάλυμα άνθρακα στο σίδηρο α ονομάζεται α-φερρίτης (ή απλώς φερρίτης).

Το διάγραμμα σιδήρου – άνθρακα (Fe – C)

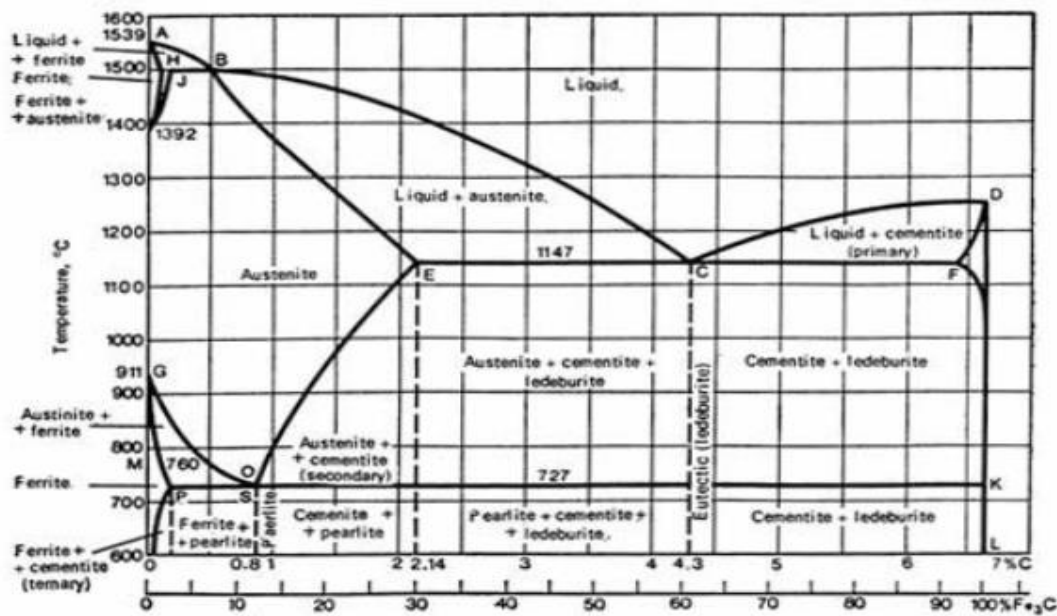
Πρόκειται για διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων σιδήρου-άνθρακα, με προϋποθέσεις ισχύος:

- Θέρμανση και απόψυξη εξαιρετικά αργή

- Χωρίς άλλα κραματικά στοιχεία εκτός από τον άνθρακα

Στην πραγματικότητα είναι διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - σεμεντίτη (Fe - Fe₃C) το οποίο είναι μετασταθές, καθώς το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης), δεν αποτελεί φάση ευσταθούς, αλλά μετασταθούς ισορροπίας.

Από το διάγραμμα βλέπουμε τις διάφορες κατηγορίες κραμάτων Fe-C, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα.



Εικόνα 3.1 : Το διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - άνθρακα

Τα κράματα Fe-C με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,025% έως 2,1%, ονομάζονται χάλυβες. Για περιεκτικότητες μικρότερες από 0,025% τα κράματα Fe-C ονομάζονται σίδηροι, ενώ για περιεκτικότητες άνω του 2,1% μιλάμε για λευκούς χυτοσιδήρους.

3.1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι χάλυβες ονομάστηκαν έτσι από τον ομώνυμο μυθικό λαό που - σύμφωνα με τους αρχαίους Έλληνες - είχε κατοικήσει στην ενδοχώρα του Ευξείνου Πόντου, και στον οποίον αποδίδονταν η πατρότητα της ανακάλυψης αυτού του σκληρού μετάλλου. Η ονομασία "ατσάλι" (acier, acaio) που χρησιμοποιείται συχνά στην καθομιλούμενη διάλεκτο προέρχεται από το δεύτερο συνθετικό του λατινικού "ferrum acies" που

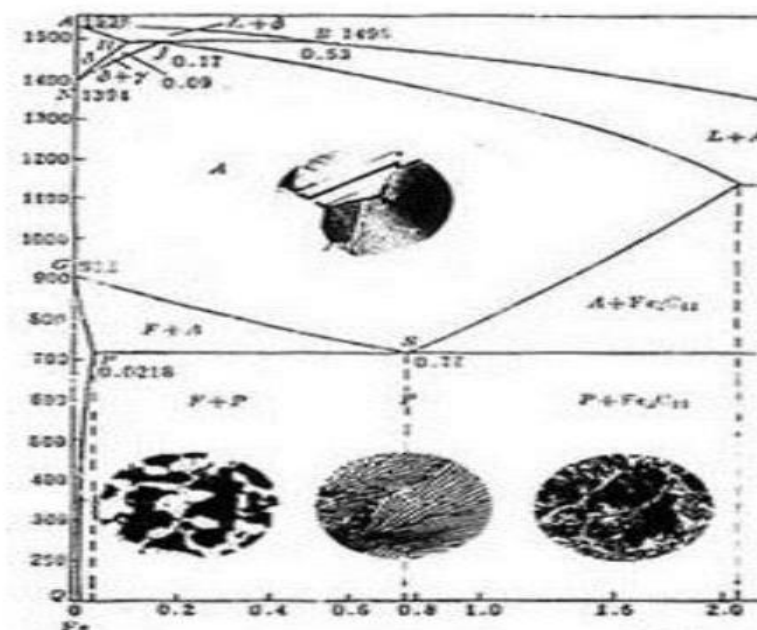
σημαίνει "σίδηρος οξύς (κοφτερός)", διότι με χάλυβα κατασκευάζονταν η κόψη μαχαιριών, σπαθιών, κ.λ.π.

Οι χάλυβες περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου - σεμεντίτη. 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.

Είναι απαραίτητη επομένως, η αναφορά στο μετασταθές διάγραμμα Fe-C ή σιδήρου - σεμεντίτη, και μάλιστα στο αριστερό του τμήμα, που αφορά τις χαμηλές περιεκτικότητες σε άνθρακα. Σύμφωνα με τον ορισμό, χάλυβες είναι τα κράματα σιδήρου - άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.025 έως 2.1%, αλλά στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται χάλυβες με περιεκτικότητα 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 λέμε, να ωστενιτοποιηθεί.

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

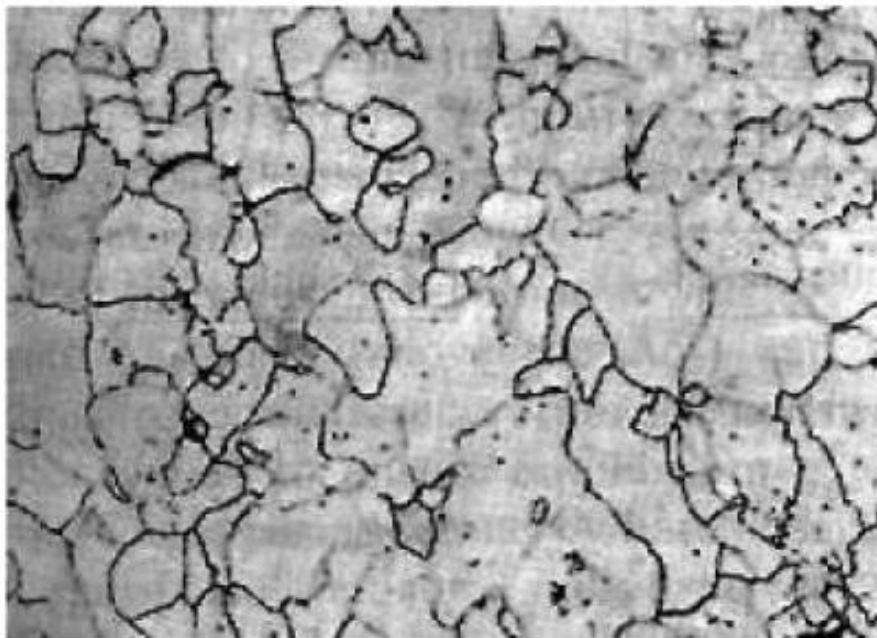


Εικόνα 3.2 : Το διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου – άνθρακα με φωτογραφίες των μικρογραφικών συστατικών

Φάσεις και μικρογραφικά συστατικά των χαλύβων

Κατ' αρχήν, ας διακρίνουμε μεταξύ τους τις διάφορες φάσεις, μικρογραφικά συστατικά και ενώσεις που συναντάμε σε συνθήκες αργής απόψυξης των χαλύβων, δίνοντας τους σχετικούς ορισμούς και βασικές πληροφορίες.

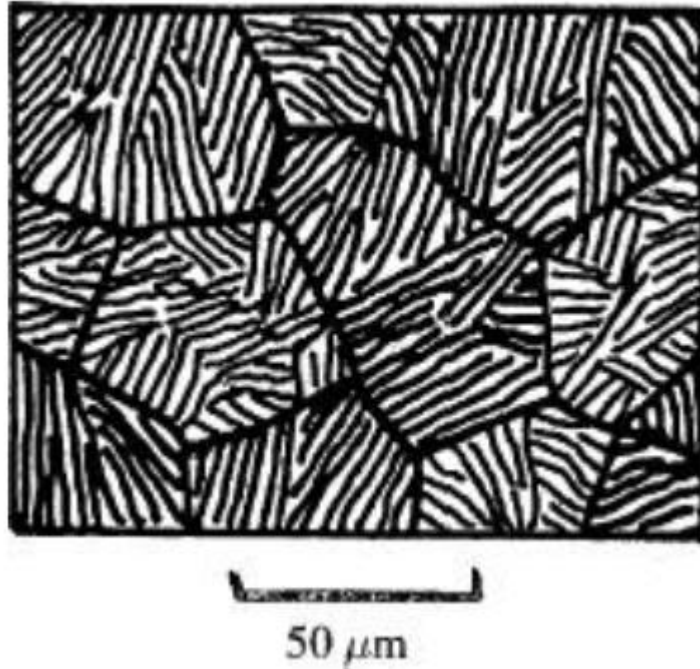
- **Ωστενίτης (austenite).** Αναφέρθηκε ήδη ότι πρόκειται για στερεό διάλυμα άνθρακα στο σίδηρο γ . Ο άνθρακας έχει σχετικά καλή διαλυτότητα σε αυτόν που φτάνει στο 2,11% στους 1149 °C. Είναι όλκιμη φάση και έχει σκληρότητα 250 έως 300 HB.
- **Σεμεντίτης (cementite).** Είναι χημική ένωση και πιο συγκεκριμένα καρβίδιο του σιδήρου (Fe_3C). Έχει σκληρότητα περίπου 800 HB και είναι πολύ εύθραυστος. Αποχωρίζεται από τον ωστενίτη κατά την απόψυξη ενός υπερευθηκτοειδούς χάλυβα ($C > 0,8\%$) στη μορφή του προ-ευθηκτοειδούς σεμεντίτη σε θερμοκρασία λίγο ανώτερη των 723°C, αλλά περιέχεται επίσης και στον περλίτη.
- **Φερρίτης (ferrite).** Αναφέρθηκε ήδη ότι πρόκειται για στερεό διάλυμα άνθρακα στο σίδηρο α . Εδώ η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι πολύ μικρότερη (0,005% σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και 0,021% στους 723°C). Μπορεί να διαλύσει και άλλα στοιχεία όπως Cr, Ni, Si, P. Είναι όλκιμος και έχει σκληρότητα χαμηλή, από 80 έως 100 HB. Περιέχεται επίσης και στον περλίτη.



Εικόνα 3.3 : Φερρίτης

- **Περλίτης (perlite).** Πρόκειται για μικρογραφικό συστατικό του χάλυβα και όχι φάση. Κάθε κόκκος περλίτη αποτελείται από πλακοειδείς κρυσταλλίτες εναλλάξ φερρίτη και σεμεντίτη. Προέρχεται από το μετασχηματισμό του ωστενίτη

όταν η θερμοκρασία κατά την αργή απόψυξη φτάσει στους 723 °C. Είναι όλκιμος και μαλακός με σκληρότητα περίπου 200-250 HB. Αν γίνει θερμική κατεργασία σε θερμοκρασία κάτω των 723 °C, σφαιροποιείται ο σεμεντίτης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας του χάλυβα. Όσο μικρότερα είναι τα σφαιρίδια του σεμεντίτη μέσα στη φερριτική μήτρα, τόσο πιο καλά αποτελέσματα έχουμε.



Εικόνα 3.4 : Περλίτης

- **Μπαινίτης (bainite).** Πρόκειται για βελονοειδές μικρογραφικό συστατικό που αποτελείται από σφαιροειδείς κρυσταλλίτες σεμεντίτη που περιβάλλουν βελονοειδείς κρυστάλλους φερρίτη. Προκύπτει από τον ωστενίτη με μεγαλύτερη ταχύτητα απόψυξης. Έχει σκληρότητα 400HB.



Εικόνα 3.5 : Μπαϊνίτης

- **Μαρτενσίτης (martensite).** Είναι φάση εκτός ισορροπίας που προκύπτει από τον ωστενίτη, με ορισμένες προϋποθέσεις, χωρίς το μηχανισμό της διάχυσης. Έχει βελονοειδή μικρογραφική δομή χωρίς δυνατότητα κατοπινής εξέλιξης, εκτός εάν θερμανθεί (επαναφορά). Μπορούμε να πούμε ότι είναι φερρίτης υπέρκορος σε άνθρακα. Είναι πολύ σκληρός και με σκληρότητα που είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα (500 έως 650HB).



Εικόνα 3.6 : Μαρτενσίτης

Επίδραση κραματικών στοιχείων στο διάγραμμα Fe – C

Η επίδραση των στοιχείων προσθήκης στη μικροδομή, στη θερμοκρασία ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού ($C=0,8\%$, $723^{\circ}C$), αλλά και σε πολλές ιδιότητες των χαλύβων, είναι πολύ σημαντική.

Ανάλογα με την επίδραση στη μορφολογία του διαγράμματος Fe-C, αλλά και στις ιδιότητες, διακρίνουμε τα διάφορα κραματικά στοιχεία σε:

- Γάμμα (γ)-φερρογόνα στοιχεία. Είναι αυτά που προκαλούν διεύρυνση της περιοχής σταθερότητας του ωστενίτη (γ -φάση). Παραδείγματα: Mn, Ni, Co
- Άλφα (α)-φερρογόνα στοιχεία. Είναι αυτά που προκαλούν διεύρυνση της περιοχής σταθερότητας του φερρίτη (α -φάση), συρρικνώνοντας την περιοχή σταθερότητας του ωστενίτη. Παραδείγματα: Mo, Si, Cr, V, W, Al, Ti, Nb
- Καρβιδιογόνα στοιχεία. Είναι αυτά που έχουν σημαντική τάση δημιουργίας καρβιδίων, δηλαδή εμφανίζουν χημική συγγένεια με τον C. Τέτοια στοιχεία, με τάση δημιουργίας καρβιδίων μεγαλύτερη από αυτήν του σιδήρου είναι τα: Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti.

3.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Υπάρχουν πέντε βασικές κατηγορίες σκλήρυνσης των μετάλλων. Η σκλήρυνση με επίδραση του μεγέθους των κόκκων του υλικού, η σκλήρυνση στερεού διαλύματος, η σκλήρυνση από κατακρήμνιση, η σκλήρυνση με μετασχηματισμούς φάσεων και η σκλήρυνση εξαιτίας ενδοτράχυνσης.

Σκλήρυνση με επίδραση του μεγέθους

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

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

$$\sigma_{\psi} = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

Όπου d είναι η μέση διάμετρος των κόκκων και σ_0 , k είναι σταθερές.

Έλεγχος μεγέθους κόκκων

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 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 φύσης, 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 χάλυβων, 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:

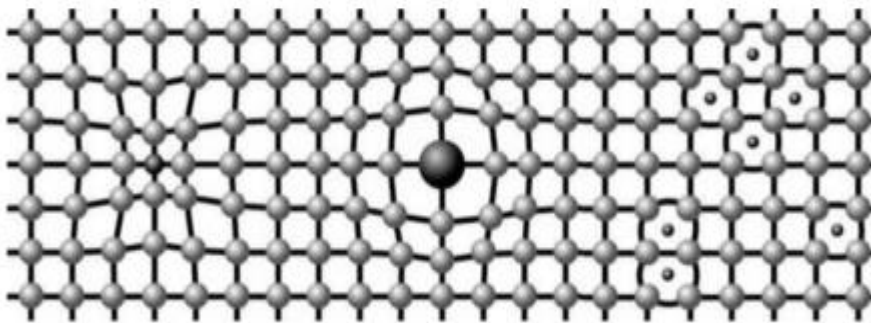
$$r_c = 6 \cdot R_f / \pi \cdot (3/2 - 2/Z)^{-1}$$

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.

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. Διακρίνονται δυο περιπτώσεις σκλήρυνσης στερεού διαλύματος, στερεό διάλυμα παρεμβολής και στερεό διάλυμα αντικατάστασης.

Τα άτομα που σχηματίζουν στερεό διάλυμα παρεμβολής (Εικόνα) έχουν μικρό μέγεθος και σχηματίζουν τα νέφη ή ατμόσφαιρες Cottrell στην διεσταλμένη περιοχή των διαταραχών. Συγκεντρώνονται δηλαδή στην εφελκόμενη 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).



Εικόνα 3.7 : Παράδειγμα στερεού διαλύματος παρεμβολής και αντικατάστασης

Στα στερεά διαλύματα αντικατάστασης η γραμμή διαταραχής μπορεί να θεωρηθεί 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 πρόσθετη τάση. Κατά τον Cottrell η κίνηση των διαταραχών μπορεί να συμπαρασύρει άτομα αντικαταστάσεως, τα οποία κατά προτίμηση, καταλαμβάνουν θέσεις του

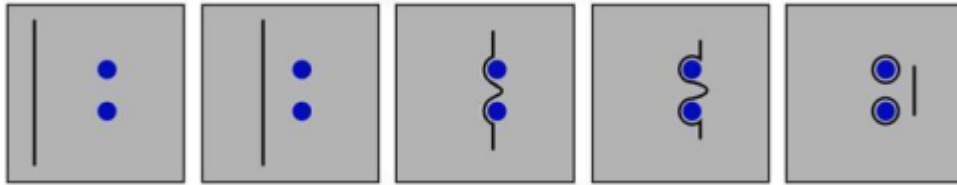
πλέγματος κοντά στις διαταραχές, όταν η αλληλεπίδραση ατόμων αντικαταστάσεως - διαταραχής οδηγεί σε μείωση της ενέργειας

Σκλήρυνση από κατακρήμνιση

Η σκλήρωση από κατακρήμνιση μιας δευτέρας φάσεως σε λεπτό διαμερισμό είναι από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους σκληρώσεως. Αν και η κατακρήμνιση απομακρύνει από την μήτρα του κράματος ένα κραματικό στοιχείο, κι απαλείφει 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 αυτή της μήτρας, ώστε οι διαταραχές δεν μπορούν να τα διασχίσουν. Δηλαδή δεν ακολουθούν την πλαστική παραμόρφωση της μαλακής μήτρας.

Εάν τα κατακρημνίσματα είναι ευμεγέθη, τότε οι διαταραχές καμπυλώνονται γύρω τους και τα παρακάμπτον με ένα μηχανισμό που μοιάζει με τις πηγές Frank.



Εικόνα 3.8 : Κίνηση διαταραχής γύρω από ευμεγέθη κατακρημνίσματα

Όσο τα σωματίδια είναι λεπτότερα και πυκνότερα μέσα στη μήτρα, τόσο η σκλήρωση είναι πιο αποτελεσματική. Εάν τα σωματίδια είναι πολύ λεπτά και συνεκτικά προς την μήτρα, τότε οι διαταραχές δεν μπορούν να καμφθούν σε τόσο μικρές ακτίνες καμπυλότητας, της τάξης της ακτίνας του σωματιδίου.

Σκλήρυνση με επίδραση μετασχηματισμών φάσης

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 φερριτοπερλιτικές 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.

Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση

Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση είναι το φαινόμενο όπου ένα όλκιμο μέταλλο γίνεται σκληρότερο και ισχυρότερο όταν παραμορφώνεται πλαστικά. Μερικές φορές καλείται και σκλήρυνση με κατεργασία, ή ψυχρηλασία επειδή η θερμοκρασία στην οποία η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα είναι ψυχρή σε σχέση με την απόλυτη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. Τα περισσότερα μέταλλα επιδέχονται σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση σε θερμοκρασία δωματίου.

Μερικές φορές εξυπηρετεί να εκφράσουμε το βαθμό της πλαστικής παραμόρφωσης ως επί τοις εκατό % ψυχρηλασία παρά σαν παραμόρφωση. Η επί τοις εκατό ψυχρηλασία ορίζεται από τη σχέση:

$$CW = [A_0 - A_d / A_0] \cdot 100$$

Όπου A_0 είναι το αρχικό εμβαδό της ενεργού διατομής που δέχεται την πλαστική παραμόρφωση και A_d το εμβαδό μετά τη παραμόρφωση. Το τίμημα της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση είναι η μείωση της όλκιμότητας.

Το φαινόμενο της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση εξηγείται βάσει των αλληλεπιδράσεων παραμόρφωσης μεταξύ διαταραχής – διαταραχή. Η πυκνότητα των διαταραχών σε ένα μέταλλο αυξάνει με την παραμόρφωση ή την ψυξηλασία εξ' αιτίας του πολλαπλασιασμού ή του σχηματισμού νέων διαταραχών. Συνεπώς όσο η μέση απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των διαταραχών μειώνεται τόσο οι διαταραχές τοποθετούνται πιο κοντά η μία στην άλλη.

Κατά μέσο όρο, οι αλληλεπιδράσεις παραμόρφωσης μεταξύ των διαταραχών είναι απωθητικές. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι η κίνηση της διαταραχής εμποδίζεται από την παρουσία άλλων διαταραχών. Καθώς η πυκνότητα των διαταραχών αυξάνει, η αντίσταση στην κίνηση της διαταραχής από άλλες διαταραχές γίνεται πιο έντονη. Επομένως, η επιβαλλόμενη τάση που είναι απαραίτητη για να παραμορφώσει ένα μέταλλο αυξάνει με την αύξηση της ψυξηλασίας.

Τα αποτελέσματα της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση μπορούν να εξαλειφθούν με θερμική επεξεργασία ανόπτησης.

3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η ταξινόμηση των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με το EN 10020:2000 σε κατηγορίες. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο οι χάλυβες κατηγοριοποιούνται με δυο τρόπους:

A. Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με την χημική σύσταση

Έτσι λοιπόν έχουμε τους:

- **Μη κραματωμένους Χάλυβες (Non Alloy Steels):** Οι μη κραματωμένοι χάλυβες είναι ποιότητες χάλυβα στις οποίες κανένα από τα κραματικά τους στοιχεία δεν ξεπερνά τα όρια που ορίζονται στον πίνακα 1.
- **Ανοξειδωτοι Χάλυβες (Stainless Steels):** Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι χάλυβες με κατ' ελάχιστο 10,5% χρώμιο και μέγιστο 1,2% άνθρακα.
- **Άλλοι κραματωμένοι χάλυβες (Other Alloy Steels):** Σαν κραματωμένοι χάλυβες ονομάζονται αυτοί που δεν συμμορφώνονται με τον ορισμό των ανοξειδωτων χαλύβων και στους οποίους τουλάχιστον ένα κραματικό στοιχείο ξεπερνά σε συγκέντρωση τις τιμές που αναφέρονται στον πίνακα 1.

Specified Element	Limit Value % by mass
Aluminium (Al)	0,3
Boron (B)	0,0008
Bismuth (Bi)	0,10
Cobalt (Co)	0,30
Chromium (Cr)	0,30
Copper (Cu)	0,40
Lathanides (La)	0,10
Manganese (Mn)	1,65^{a)}
Molybdenum (Mo)	0,08
Niobium (Nb)	0,06
Nickel (Ni)	0,30
Lead (Pb)	0,40
Selenium (Se)	0,10
Silicon (Si)	0,60
Tellurium (Te)	0,10
Titanium (Ti)	0,05
Vanadium (Va)	0,10
Tungsten (W)	0,30
Zirconium (Zr)	0,10
Others (except carbon, phosphorus, sulphur, nitrogen)	0,10
	a) Where manganese is specified only as a maximum the limit value is 1,80% and the 70% rule does not apply.

Πίνακας 3.1: Όρια περιεκτικότητας κραματικών στοιχείων για τους μη κραματωμένους χάλυβες

B. Ταξινόμηση σύμφωνα με τις κατηγορίες ποιότητας

Το EN 10020:2000 ταξινομεί τους κραματωμένους και μη κραματωμένους χάλυβες περαιτέρω στις λεγόμενες κύριες ποιοτικές κλάσεις. Η προηγούμενη κύρια ομάδα των

“βασικών χάλυβων” παραλείπεται και έχει συγχωνευτεί με τους μη κραματωμένους χάλυβες ποιότητας.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες ταξινομούνται από την περιεκτικότητα σε νικέλιο και τις βασικές ιδιότητες.

Πιο συγκεκριμένα η ταξινόμηση σύμφωνα με τις κατηγορίες ποιότητας είναι η παρακάτω:

Μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας (non alloy quality steels): Οι μη κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας είναι τύποι χάλυβων οι οποίοι, σε γενικές γραμμές, έχουν ειδικές απαιτήσεις ιδιοτήτων, για παράδειγμα, αντοχή, έλεγχος του μεγέθους των κόκκων, και/ή ικανότητα μορφοποίησης.

Μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες (non alloy special steels): Οι μη κραματωμένοι ειδικοί χάλυβες έχουν, ειδικά όσον αφορά μη μεταλλουργικά εγκλείσματα, μια υψηλότερη καθαρότητα από τους μη κραματωμένους χάλυβες ποιότητάς που αναφέρονται στην προηγούμενη κατηγορία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται για εμβάπτιση ή σκλήρυνση της επιφάνειας και χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφη ανταπόκριση σε τέτοιες κατεργασίες. Η ακριβής προσαρμογή της χημικής σύστασης και της ειδικής προσοχής στη μέθοδο κατασκευής και καταγραφής παρέχει βελτιωμένες ιδιότητες για την εκπλήρωση υψηλότερων απαιτήσεων. Αυτές οι απαιτήσεις, συνήθως περιλαμβάνουν στενά καθορισμένες τιμές ορίου διαρροής ή ικανότητας σκλήρυνσης, μερικές φορές σε συνδυασμό με μια καταλληλόλητα για ψυχρή διαμόρφωση, συγκόλληση ή αντοχή σε κρούση.

Κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας (alloy quality steels): Οι κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας είναι ποιότητες χάλυβα για τους οποίους υπάρχουν απαιτήσεις σε σχέση με, για παράδειγμα, την αντοχή, τον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων και/ή την ικανότητα διαμόρφωσης. Ως κραματωμένοι χάλυβες ποιότητας θεωρούνται οι παρακάτω χάλυβες:

1. Συγκολλησιμοί λεπτόκοκκοι κατασκευαστικοί χάλυβες συμπεριλαμβανομένων των χάλυβων για δοχεία πίεσης και σωλήνων που ικανοποιούν όλες τις παρακάτω απαιτήσεις:
 - SMYS (Ελάχιστο όριο διαρροής) <math>< 380 \text{ N/mm}^2</math>
 - Περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία χαμηλότερη από τα όρια που δίνονται στον πίνακα 3.2.
 - Ελάχιστο όριο διαρροής στους $-50^\circ\text{C} \leq 27\text{J}$
2. Κραματωμένοι χάλυβες για σιδηροδρομικές ράγες
3. Κραματωμένοι χάλυβες για εφαρμογές εν ψυχρώ διαμόρφωσης που περιέχουν μικροκραματικά στοιχεία (*grain refining elements*)
4. Κραματωμένοι χάλυβες που έχουν τον χαλκό σαν το μόνο προσδιορισμένο κραματικό στοιχείο.

Specified Elements	Limit Value % by mass
Chromium (Cr)	0,50
Copper (Cu)	0,50
Manganese (Mn)	1,80
Molybdenum (Mo)	0,10
Niobium (Nb)	0,08
Nickel (Ni)	0,50
Titanium (Ti)	0,12
Vanadium (Va)	0,12
Zirconium (Zr)	0,12

Πίνακας 3.2: Όρια χημικής σύστασης μεταξύ χαλύβων ποιότητας (quality steels)-ειδικών χαλύβων (special steels).

Κραματωμένοι ειδικοί γάλυβες (alloy special steels): Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει ποιότητες γάλυβα, εκτός από ανοξείδωτους γάλυβες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ακριβή έλεγχο της χημικής σύστασης και από ειδικές συνθήκες κατασκευής και ελέγχου της διεργασίας για τη διασφάλιση βελτιωμένων ιδιοτήτων, οι οποίες συχνά προδιαγράφονται σε συνδυασμό και εντός στενά ελεγχόμενων ορίων.

Όλοι οι κραματωμένοι γάλυβες που δεν ανήκουν στην κατηγορία των ποιοτικών χαλύβων (alloy quality steels) ανήκουν στην κατηγορία των ειδικών (alloy special steels).

Η κατηγορία των κραματικών χαλύβων, περιλαμβάνει κραματωμένους γάλυβες για διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές όπως εξοπλισμός υπό πίεση, ρουλεμάν, εργαλειογάλυβες, και γάλυβες με ειδικές φυσικές ιδιότητες.

Ανοξείδωτοι γάλυβες: Οι ανοξείδωτοι γάλυβες ορίζονται στο EN 10020 σύμφωνα με την χημική τους σύσταση. Κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

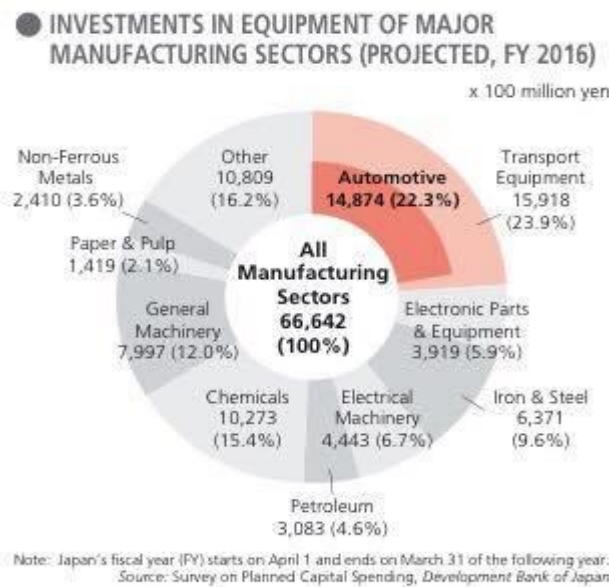
- Βάση της περιεκτικότητας σε νικέλιο λιγότερο από 2,5% Ni και περισσότερο από 2,5% Ni.
- Σύμφωνα με την κύρια ιδιότητα τους σε corrosion resisting, heat resisting και creep resisting.

3.3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

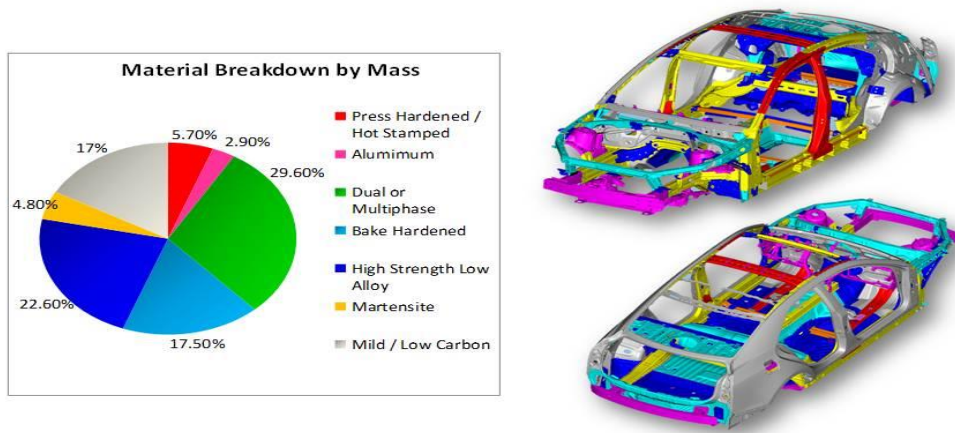
Οι εξελίξεις στην παγκόσμια οικονομία καθώς και η πρόκληση για αναζήτηση προϊόντων και τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον οδήγησε την παγκόσμια χαλυβουργία καθώς και τις αυτοκινητοβιομηχανίες, στη διαρκή αναζήτηση νέων διεργασιών και προϊόντων που να καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις. Η αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί διεθνώς ένα σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας. Τα χρήματα τα οποία επενδύονται κάθε χρόνο σε έρευνα και ανάπτυξη για την εξέλιξη αυτού του κλάδου, αποτέλεσαν το 22.3% το 2016 των παγκοσμίων επενδύσεων από το σύνολο των βιομηχανικών επενδύσεων.

Η ανάπτυξη λοιπόν καινούργιων υλικών αυτοκινητοβιομηχανίας είναι επιτακτικός στόχος.



Εικόνα 3.9 : Επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη (R & D) των μεγαλύτερων βιομηχανικών τομέων το έτος 2016

Έτσι λοιπόν στην ανάπτυξη και παραγωγή προϊόντων χάλυβα πέφτει ένα πολύ μεγάλο βάρος για την ικανοποίηση των παγκόσμιων απαιτήσεων των αυτοκινητοβιομηχανιών. Παρόλα αυτά στις μέρες, όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες του πλανήτη δίνουν τεράστια έμφαση στην ασφάλεια των επιβατών. Έτσι λοιπόν αυτό οδηγεί σε αυξημένη επιλογή των χαλύβων συγκριτικά με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία όπως αναπτύσσεται και στην Εικόνα 3.10.

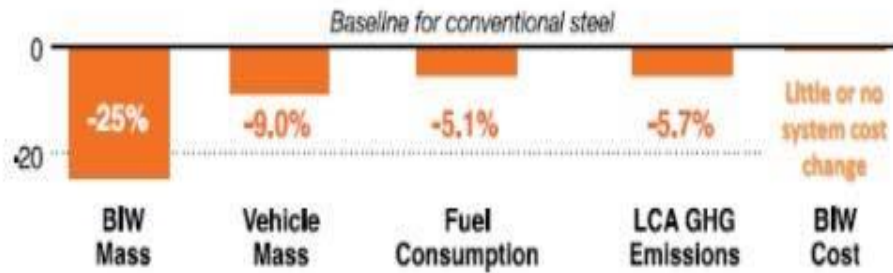


Εικόνα 3.10 : Ποσοστιαία χρήση διάφορων υλικών στο αμάξωμα του αυτοκινήτου

3.3.2 Προηγμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (AHSS)

Τα προβλήματα ασφάλειας και περιβάλλοντος τα οποία πρέπει να επιλυθούν στη βιομηχανία των αυτοκινήτων οδήγησαν στην ανάπτυξη των Advanced High Strength Steels. Αυτοί οι χάλυβες είναι σύνθετα, εκλεπτυσμένα υλικά με καθορισμένη χημική σύνθεση και πολυφασικές μικροδομές που είναι αποτέλεσμα ελεγχόμενων διεργασιών θέρμανσης και ψύξης. Διάφοροι μηχανισμοί σκλήρυνσης δοκιμάζονται ώστε να επιτευχθεί ένα επιθυμητό εύρος αντοχής, ολκιμότητας, σκληρότητας και κόπωσης. Αυτοί οι χάλυβες είναι εξαιρετικά ελαφριοί και κατασκευασμένοι ώστε να πληρούν τους κανονισμούς ασφαλείας, μειωμένων εκπομπών και σταθερής απόδοσης σε προσιτό κόστος.

Οι AHSS είναι μια οικογένεια χαλύβων που περιλαμβάνει τους Dual Phase (DP), Complex-Phase (CP), Ferritic-Bainitic (FB), Martensitic (MS), Transformation-Induced Plasticity (TRIP) and Twinning Induced Plasticity (TWIP). Όλοι τους ανήκουν στην 1η και 2η γενιά AHSS και μπορούν να καλύψουν τις λειτουργικές απαιτήσεις απόδοσης ορισμένων εξαρτημάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι DP και TRIP χάλυβες χρησιμοποιούνται στις ζώνες παραμόρφωσης των αυτοκινήτων λόγω της δυνατότητάς τους να απορροφούν υψηλά ποσοστά ενέργειας. Για την καμπίνα των επιβατών χρειάζονται χάλυβες εξαιρετικά υψηλής αντοχής για τη βελτίωση της ασφάλειας. Τέτοιου είδους χάλυβες είναι συνήθως οι μαρτενσιτικοί και οι βασισμένοι στο βόριο Press Hardened Steels (PHS). Έτσι λοιπόν τα οφέλη της χρήσης των High Strength Steels περιγράφονται στην εικόνα.



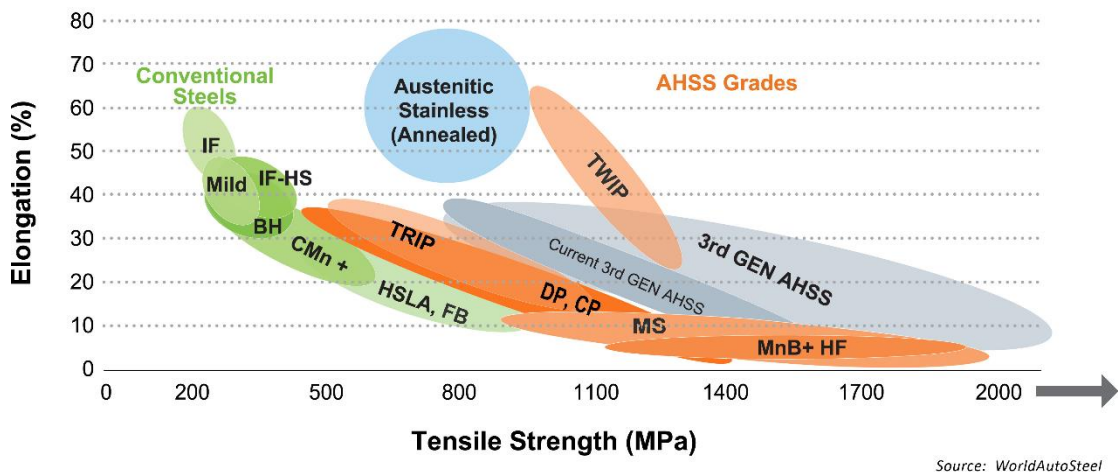
Εικόνα 3.11 : Οφέλη από τη χρήση AHSS χαλύβων

3.3.3 Κατηγορίες Χαλύβων Αυτοκινητοβιομηχανίας

Οι χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας μπορούν να οριστούν με διάφορους τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι από μεταλλουργικής πλευράς. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται οι: **α)** χάλυβες χαμηλής αντοχής όπως οι χάλυβες χωρίς στοιχεία παρεμβολής (Interstitial Free – IF) και οι συμβατικοί χάλυβες χαμηλού ποσοστού σε άνθρακα (Mild Steels), **β)** στους συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής (Carbon – Manganese, Bake Hardenable, Isotropic, High – Strength IF, τους χάλυβες υψηλής αντοχής, χαμηλής κραμάτωσης), στους οποίους μπορούν να συμπεριληφθούν και οι φερριτικοί – μπαινιτικοί, twinning induced plasticity, χάλυβες θερμής διαμόρφωσης και οι θερμικά κατεργασμένοι μετά τη διαμόρφωση και τέλος **γ)** στους προηγμένους χάλυβες υψηλής αντοχής – AHSS (dual phase, transformation induced plasticity , complex phase, και τους μαρτενσιτικούς χάλυβες(martensitic steels)).

Ο δεύτερος τρόπος κατηγοριοποίησης βασίζεται στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής (High-Strength Steel - HSS) προσδιορίζονται σαν εκείνοι οι χάλυβες οι οποίοι έχουν αντοχή σε θραύση μεταξύ 270 και 700 MPa. Οι ακόμα πιο υψηλής αντοχής χάλυβες (Ultra-High- Strength Steel - UHSS) είναι εκείνοι οι χάλυβες οι οποίοι έχουν όριο θραύσης μεγαλύτερο των 700MPa.

Ο τρίτος τρόπος κατηγοριοποίησης των χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας σχετίζεται με μια άλλη μηχανική ιδιότητα. Αυτή η ιδιότητα είναι η συνολική επιμήκυνση, η οποία σχετίζεται με τη διαμορφωσιμότητα, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12 : Σχέση ολκιμότητας – αντοχής σε θραύση για προηγμένους χάλυβες αυτοκινητοβιομηχανίας

3.3.3.1 Χάλυβες Χαμηλής Περιεκτικότητας σε Άνθρακα (Mild Steels)

Είναι οι χάλυβες οι οποίοι έχουν ουσιαστικά φερριτική μικροδομή. Η αντοχή σε θραύση οφείλεται στο συνδυασμό στοιχείων στο στερεό διάλυμα, που αποτελούνται από καρβίδια και / ή νιτρίδια και στους εκλεπτυσμένους κόκκους. Είναι εξαιρετικά ολκιμοί, ενώ μπορεί να περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία, όπως χρώμιο, νίβιο, μολυβδαίνιο, τιτάνιο, νικέλιο, βανάδιο. Τα χαμηλά ποσοστά άνθρακα, τον κάνουν ευάλωτο στην οξείδωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

3.3.3.2 Χάλυβες Σκλήρωσης κατά τη διαδικασία έψησης (Bake Hardenable Steels)

Έχουν μια βασική φερριτική μικροδομή και αυξάνουν την αντοχή τους κυρίως μέσω σκλήρυνσης με στερεό διάλυμα. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των χάλυβων είναι η χημική σύστασή τους και η διαδικασία που ακολουθείται για να διατηρηθεί ο άνθρακας σε στερεό διάλυμα κατά τη πειραματική διαδικασία και να αφαιρεθεί ο άνθρακας από το στερεό διάλυμα κατά τη διάρκεια της σκλήρωσης στο στάδιο του ψησίματος της μπογιάς των εξαρτημάτων. Αυτή η διαδικασία αυξάνει το όριο διαρροής του σχηματιζόμενου εξαρτήματος.

3.3.3.3 Χάλυβες απαλλαγμένοι από στοιχεία παρεμβολής (Interstitial Free Steels)

Οι χάλυβες απαλλαγμένοι από στοιχεία παρεμβολής, έχουν φερριτική μικροδομή, χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά ποσοστά άνθρακα μικρότερα του 0,01% κ.β. και αντοχή η οποία βασίζεται σε ένα συνδυασμό κραματικών στοιχείων σε στερεό διάλυμα, κατακρημνίσματα καρβιδίων νιοβίου ή τιτανίου και / ή νιτριδίων νιοβίου ή τιτανίου και στην εκλέπτυνση των κόκκων. Έχουν εξαιρετική διαμορφωσιμότητα, αλλά δεν έχουν πολύ υψηλή αντοχή σε θραύση, με το όριο θραύσης τους να κυμαίνεται από 290 έως 388 MPa. Σε αυτήν την κατηγορία χαλύβων, προστίθεται φώσφορος με στόχο την αύξηση της αντοχής σε θραύση. Τα ποσοστά του φωσφόρου δεν πρέπει να είναι αυξημένα, γιατί ο IF χάλυβας γίνεται ψαθυρός. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, συχνά προστίθενται μικρό ποσοστό Βορίου.

3.3.3.4 Ισοτροπικοί Χάλυβες (Isotropic Steels)

Έχουν φερριτική μικροδομή. Η ανάπτυξη αυτού του τύπου των χαλύβων οφείλεται στην επίτευξη χαρακτηριστικής τιμής Δr ίσης με μηδέν, η οποία οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του φαινομένου σχηματισμού “αυτιών” (earring) κατά τις διεργασίες της μορφοποίησης.

3.3.3.5 Ανθρακούχοι – Μαγγανιούχοι Χάλυβες (Carbon-Manganese Steels)

Η αντοχή των Carbon-Manganese Steels αυξάνεται με σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος.

3.3.3.6 Χάλυβες υψηλής αντοχής, χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloy (HSLA) Steels)

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής – χαμηλής κραμάτωσης περιέχουν κραματικά στοιχεία, των οποίων η περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) κυμαίνεται μεταξύ 0,05 – 0,25 % κ.β. Η αντοχή αυξάνεται κυρίως από στοιχεία μικροκραμάτωσης όπως το τιτάνιο, βανάδιο, νιόβιο, τα οποία συμβάλλουν στην εκλέπτυνση των κόκκων. Άλλα κραματικά στοιχεία τα οποία μπορεί να περιέχονται είναι, το ζirkόνιο, ο χαλκός, το πυρίτιο, το νικέλιο, το χρώμιο και ο φώσφορος, τα οποία χρησιμοποιούνται για αύξηση της αντοχής σε διάβρωση. Οι χάλυβες HSLA έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, χωρίς στενά καθορισμένη χημική σύσταση, όπως η υψηλή αντοχή σε θραύση, η

σκληρότητα, η συγκολλησιμότητα και η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Διαχωρίζονται σε έξι κατηγορίες, τους χάλυβες αντοχής σε ατμοσφαιρική διάβρωση, τους μικροκραματωμένους φερριτικούς – περλιτικούς, τους περλιτικούς θερμής έλασης, τους βελονοειδείς φερριτικούς, τους διφασικούς και τους χάλυβες με ελεγχόμενη μορφολογία εγκλεισμάτων.

3.3.3.7 Διφασικοί Χάλυβες (Dual Phase Steels)

Οι διφασικοί χάλυβες αποτελούνται από μια φερριτική μήτρα, η οποία περιλαμβάνει μια σκληρή δεύτερη φάση σε διασπορά και υπό μορφή νησίδων, τον μαρτενσίτη. Το ποσοστό των περιεχομένων φάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την επεξεργασία που θα υποστεί. Οι υψηλοί βαθμοί σκληρότητας και η εξαιρετική διαμορφωσιμότητα οφείλονται στις μαρτενσιτικές νησίδες. Οι διφασικοί χάλυβες θα μελετηθούν αναλυτικότερα στη συνέχεια της συγκεκριμένης διατριβής.

3.3.3.8 Αυξανόμενης Πλαστικότητας κατά την Παραμόρφωση (TRIP Steels)

Η μικροδομή των χαλύβων TRIP αποτελείται από υπολειπόμενο ωστενίτη σε μια αρχικά φερριτική/μπαινιτική μήτρα. Επιπλέον σε ένα ελάχιστο ποσοστό περίπου 5% του υπολειπόμενου ωστενίτη υπάρχουν σκληρές φάσεις όπως του μαρτενσίτη και του μπαινίτη. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετασχηματίζεται σταδιακά σε μαρτενσίτη (επίδραση του φαινομένου TRIP, μετασχηματισμού υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης).

3.3.3.9 Σύνθετης Μικροδομής Χάλυβες (Complex Phase Steels)

Οι χάλυβες σύνθετης μικροδομής αποτελούνται από φερρίτη και ένα αυξανόμενο ποσοστό από μια σκληρή φάση (μαρτενσίτη ή / και μπαινίτη) καθώς και από κατακρημνίσματα νιοβίου, τιτανίου ή βαναδίου, τα οποία προσδίδουν επιπλέον σκληρότητα στο χάλυβα. Παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή κατά την παραμόρφωση λόγω κρούσης, γι' αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σε τμήματα του αυτοκινήτου που εμπλέκονται με την απορρόφηση ενέργειας κατά την κρούση.

3.3.3.10 Πλαστικότητα κατά τον προκαλούμενο διδυμισμό (TWIP Steels)

Οι χάλυβες πλαστικότητας κατά τον προκαλούμενο διδυμισμό, οι οποίοι περιέχουν υψηλά ποσοστά Mn σε ποσοστό που αγγίζει το 25% κ.β. περίπου της συνολικής μάζας και το οποίο κάνει τη δομή αυτού του χάλυβα πλήρως ωστενιτική σε θερμοκρασία δωματίου. Οφείλουν τις ιδιότητές τους σε ένα μηχανισμό σκλήρυνσης, το διδυμισμό (twinning) λόγω παραμόρφωσης, που εμφανίζονται μέσα στους κόκκους του ωστενίτη. Τα όρια αυτών των διδυμιών λειτουργούν ως όρια κόκκων και προκαλούν αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Συνδυάζουν πολύ υψηλό όριο αντοχής σε θραύση με πολύ υψηλές τιμές διαμορφωσιμότητας. Έχει όριο θραύσης υψηλότερο από 1000MPa.

3.3.3.11 Boron Steels

Οι Boron Steels παρουσιάζουν υψηλές αντοχές και παράγονται με θερμική διαμόρφωση και σταμπάρισμα (stamping) με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η δημιουργία πολύπλοκων σχημάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της μάζας των προς χρήση τμημάτων που απαιτούνται στα αμαξώματα. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα ακολουθούνται από μειονεκτήματα όπως τα υψηλά κόστη κατά τη διαμόρφωση αυτών των τμημάτων, οι αργοί χρόνοι για την ολοκλήρωσή τους καθώς και δυσκολίες κατά τη συγκόλλησή τους.

3.3.3.12 Μαρτενσιτικοί Χάλυβες (Martensitic Steels)

Οι Μαρτενσιτικοί χάλυβες, οι οποίοι σχηματίζονται από τον ωστενίτη που υπάρχει κατά τη διάρκεια θερμής έλασης ή ανόπτησης με σχεδόν καθολικό μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της βαφής. Μπορεί να περιέχουν πολύ μικρά ποσοστά μπαινίτη ή / και φερρίτη. Οι μαρτενσιτικοί χάλυβες χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές αντοχής σε εφελκυσμό της τάξεως των 1700MPa. Οι τιμές αυτές μπορούν να επιτευχθούν μέσω κατάλληλων θερμικών κατεργασιών. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται κοντά στο 0,2% w/w. Η σκληρότητα μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας κραματικά στοιχεία όπως χρώμιο, πυρίτιο, μολυβδαίνιο, νικέλιο και βανάδιο σε διάφορα ποσοστά το καθένα.

3.3.3.13 Ferritic – Bainitic (FB Steels)

Είναι οι χάλυβες με φερριτική – μπαινιτική μικροδομή, και έχουν μέση αντοχή σε εφελκυσμό συγκριτικά με τους παραπάνω τύπους των AHSS χαλύβων. Η αύξηση της

σκληρότητας αυτών των χαλύβων οφείλεται είτε στην εκλέπτυνση των κόκκων ή στην αύξηση του ποσοστού του μπαινίτη.

3.4 Γενικά στοιχεία διφασικών χαλύβων (Dual Phase)

Οι DP χάλυβες αποτελούνται από μια φερριτική μήτρα που περιέχει μια δεύτερη φάση σκληρού μαρτενσίτη σε μορφή νησίδων. Σε γενικές γραμμές, αν αυξηθεί το κλάσμα όγκου της δεύτερης σκληρής φάσης, μπορεί να αυξηθεί η αντοχή του υλικού. Οι διφασικοί χάλυβες παράγονται με ελεγχόμενη ψύξη είτε από την ωστενιτική φάση σε προϊόντα θερμής έλασης ή από την περιοχή των δύο φάσεων ωστενίτη και φερρίτη για συνεχώς ανοπτημένα προϊόντα ψυχρής έλασης και προϊόντα θερμής επικάλυψης. Με αυτόν τον τρόπο, μέρος του ωστενίτη θα μετασχηματιστεί σε φερρίτη πριν την ταχεία ψύξη η οποία θα μετασχηματίσει τον ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Κάποιες άλλες φάσεις επίσης μπορούν να προκύψουν, όπως ο μπαινίτης και ο υπολειπόμενος ωστενίτης λόγω της διαδικασίας παραγωγής. Ανάλογα με τη σύσταση και την πορεία κατεργασίας, χάλυβες που απαιτούν ενισχυμένη ικανότητα αντίστασης στη δημιουργία ρωγμών μπορούν να έχουν μια μικροδομή που περιέχει σημαντικές ποσότητες μπαινίτη.

Η μικροδομή ενός DP χάλυβα διακρίνεται από μια μαλακή φερριτική φάση, όπου είναι γενικά συνεχής, γεγονός που προσδίδει στον χάλυβα υψηλή ολκιμότητα. Όταν αυτοί οι χάλυβες παραμορφώνονται, όπως π.χ. σε μια σύγκρουση αυτοκινήτου, συγκεντρώνονται τάσεις στις χαμηλότερης αντοχής φερριτική φάση, η οποία περιβάλλει τις νησίδες του μαρτενσίτη. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η υψηλή τιμή εργοσκλήρυνσης (n-value) αυτών των χαλύβων. Αυτός ο βαθμός εργοσκλήρυνσης σε συνδυασμό με την εξαιρετική επιμήκυνση κάνει τους χάλυβες να έχουν πολύ υψηλότερο όριο διαρροής (UTS) από όσο οι συμβατικοί χάλυβες.

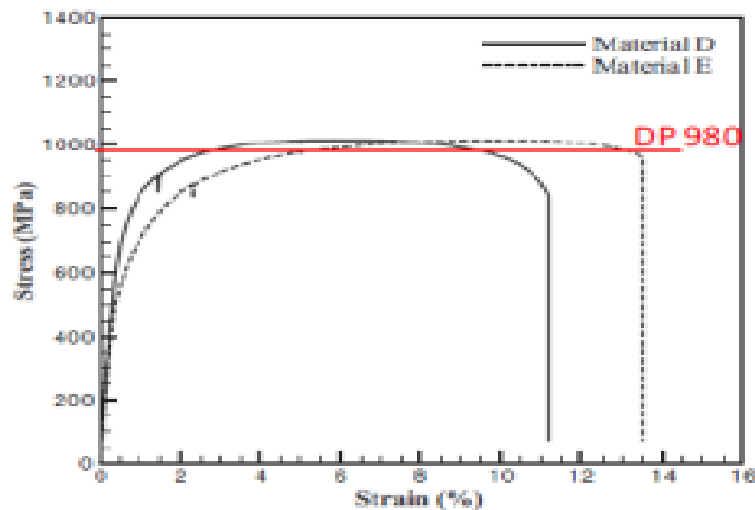
3.4.1 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση των διφασικών χαλύβων οι οποίοι αποτελούνται από δύο φάσεις, τη φάση του φερρίτη και τη φάση του μαρτενσίτη, ξεκινάει από τα αρχαία χρόνια, όπου κατασκευάζονταν τα σπαθιά των samurai στην Ιαπωνία. Το όνομα dual phase επινοήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '70 και είναι πλέον η επίσημη – παγκόσμια περιγραφή της φερριτικής – μαρτενσιτικής μικροδομής αυτών των θερμικά επεξεργασμένων χαλύβων, χαμηλής περιεκτικότητας σε C. Η πρώτη αναφορά με το όνομα dual phase steels έγινε από τους Hayami και Furukawa, όπου στη συνέχεια έγινε αποδεκτή από την διεθνή κοινότητα η χρήση του όρου dual phase steels, για την περιγραφή του χάλυβα που περιέχει δυο φάσεις – το φερρίτη και τον μαρτενσίτη.

Μαρτενσίτης είναι η φάση η οποία προκύπτει πριν την βαφή του ωστενίτη σε δραστικό ψυκτικό μέσο. Αναφορές για αυτή τη μέθοδο παραγωγής διαφορετικών τύπων χαλύβων έχουμε από τα αρχαία χρόνια στην Κύπρο, όπου μετά από ανασκαφές ανακαλύφθηκαν μαχαίρια τα οποία μετά από έρευνα από μεταλλουργούς παρατηρήθηκε πως είχε χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ενανθράκωσης και βαφής.

3.4.2 Ονοματολογία Διφασικών Χαλύβων

Η ονοματολογία των διφασικών χαλύβων βασίζεται σε γράμματα και αριθμούς. Αν για παράδειγμα έχουμε ένα διφασικό χάλυβα DP600, το DP είναι η ονομασία όλων των διφασικών χαλύβων και η οποία αναφέρεται στο μεταλλουργικό τύπο του χάλυβα, όπως έχει γίνει παγκοσμίως αποδεκτό, ενώ το νούμερο δίπλα από αυτή την ονομασία αναφέρεται στην ελαστική αντοχή του συγκεκριμένου υλικού σε θραύση. Η τιμή αυτή ποικίλλει ανάλογα με τη χημική σύσταση και τη διαδικασία παραγωγής των χαλυβδόφυλλων.



Εικόνα 3.13 : Διαφορετικοί διφασικοί χάλυβες, ίδιας αντοχής σε θραύση αλλά διαφορετικές τιμές επιμήκυνσης

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται τύποι διφασικού χάλυβα με ίδια ονομαστική αντοχή σε θραύση αλλά διαφορετικές τιμές επιμήκυνσης. Επιπλέον στον παρακάτω πίνακα θα δούμε τις ήδη υπάρχουσες κατηγορίες DP χαλύβων και που εφαρμόζονται ακριβώς στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το όνομα των χαλύβων αποτελείται από τον τύπο του χάλυβα και 2 αριθμούς. Ο πρώτος υποδηλώνει το όριο διαρροής, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, και ο δεύτερος το όριο θραύσης.

DP300/500	Roof outer, door outer, body side outer, package tray, floor panel
DP350/600	Floor panel, hood outer, body side outer, cowl, fender, floor reinforcements
DP500/800	Body side inner, quarter panel inner, rear rails, rear shock reinforcements
DP600/980	Safety cage components (B-pillar, floor panel tunnel, engine cradle, front sub-frame package tray, shotgun, seat
DP700/1000	Roof rails
DP800/1180	B-pillar upper

Πίνακας 3.3 : Η παρουσία διάφορων τύπων διφασικών χαλύβων στο αμάξωμά του αυτοκινήτου

3.4.3 Οι φάσεις των διφασικών χαλύβων

Οι διφασικοί χάλυβες όπως προαναφέραμε αποτελούνται από δύο φάσεις. Τη φάση του φερριτίτη σε ποσοστό περίπου 70 – 80% και τη φάση του μαρτενσίτη σε ποσοστό 20 – 30%.

3.4.3.1 Φερριτίτης

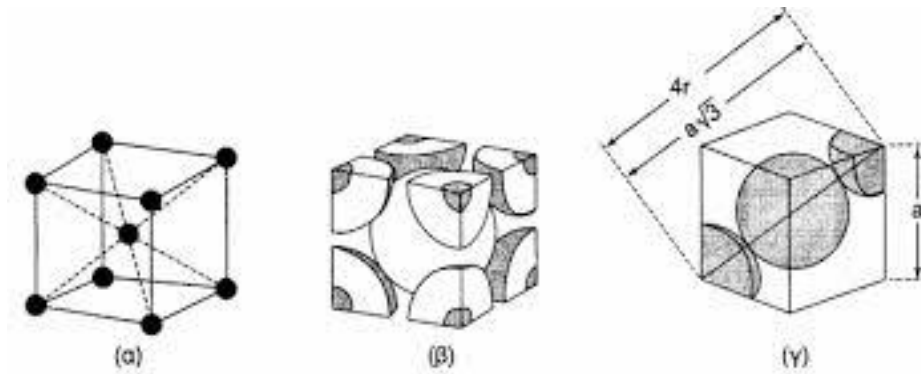
Ο φερριτίτης λοιπόν είναι φάση χωροκεντρωμένης κυβικής δομής και αποτελεί το στερεό διάλυμα παρεμβολής του C στο α-Fe. Ο φερριτίτης αποτελεί τη μαλακή φάση στους διφασικούς χάλυβες. Οι ιδιότητες των πλήρων φερριτικών χαλύβων εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων. Η σχέση **Hall - Petch**, υποδεικνύει τη σχέση μεταξύ του ορίου διαρροής και του μεγέθους των κόκκων, έτσι ώστε με εκλέπτυνση του μεγέθους των κόκκων να βελτιωθεί η αντοχή, η διαμορφωσιμότητα και η ολκιμότητα.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \text{ (Σχέση Hall - Petch)}$$

Όπου,

d = μέση διάμετρος των κόκκων (μm) και

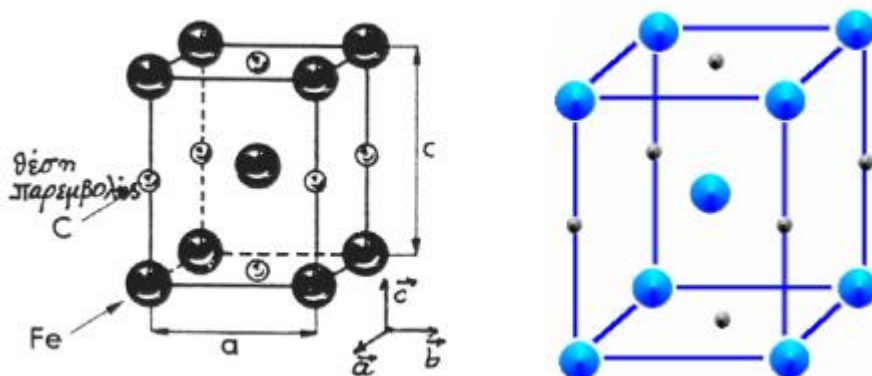
σ_0, k = σταθερές



Εικόνα 3.14 : Κυψελίδα χωροκεντρωμένης κυβικής δομής

3.4.3.2 Μαρτενσίτης

Ο μαρτενσίτης προκύπτει από την ταχύτατη ψύξη από την ωστενιτική περιοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο μαρτενσίτης αποτελεί μια πολύ σκληρή μετασταθή φάση η οποία σχηματίζεται από μη διαχυσιακούς διαμητηκούς μετασχηματισμούς του πλέγματος του ωστενίτη, με μια συντονισμένη δηλαδή κίνηση των ατόμων, παράγοντας μια παραμορφωμένη τετραγωνική δομή.

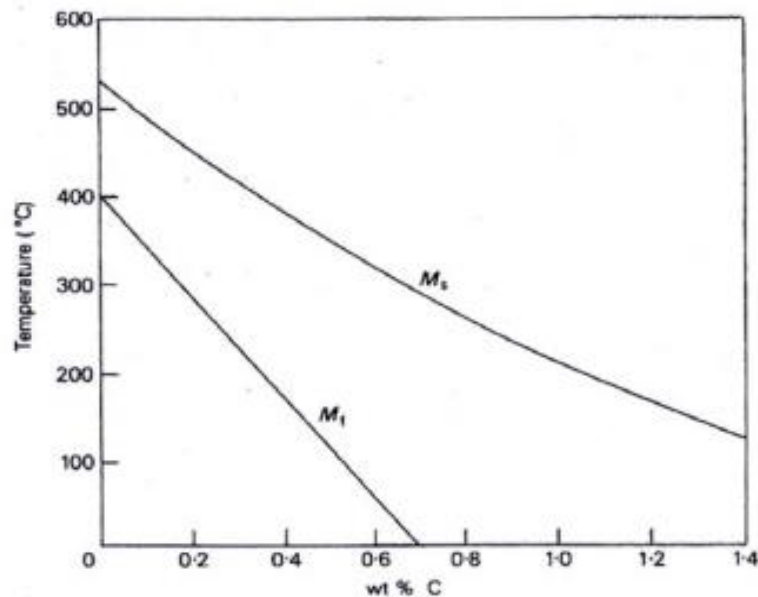


Εικόνα 3.15 : Τετραγωνική κυψελίδα

Η περιεκτικότητα του άνθρακα που υπήρχε στο στερεό διάλυμα του ωστενίτη παραμένει σαν στερεό διάλυμα σε υπέρκορη κατάσταση εντός του μαρτενσίτη. Ο μετασχηματισμός αυτός του μαρτενσίτη ονομάζεται μαρτενσιτικός μετασχηματισμός η δομή του οποίου παρατηρείται με τη μορφή πλακιδίων ή βελόνων, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα (πλακίδια: $C < 0.6\%$ κ.β., βελόνες $C > 1\%$, $0.6\% < C < 1\%$ κ.β.: και οι δύο μορφολογίες). Η νέα αυτή φάση διατηρεί τη χημική σύσταση της μητρικής ωστενιτικής φάσης.

3.4.4 Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός

Όπως αναφέρθηκε, η δομή των διφασικών χαλύβων οφείλεται στο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός πραγματοποιείται χωρίς θερμική ενεργοποίηση, αλλά κατά τη διάρκεια της απόψυξης του χάλυβα (βαφή) σε δραστικό ψυκτικό μέσο. Η θερμοκρασία κατά την οποία ξεκινάει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ονομάζεται θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_s .



Εικόνα 3.16 : Εξέλιξη της θερμοκρασίας έναρξης και λήξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, M_s και M_f αντίστοιχα, αναφορικά με την περιεκτικότητα σε άνθρακα

Η θερμοκρασία αυτή δεν είναι κοινή για όλους τους χάλυβες, αλλά ποικίλλει ανάλογα με το ποσοστό του άνθρακα και από την παρουσία κραματικών στοιχείων, τα οποία μεταβάλλουν τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στη θερμοκρασία M_s , για μικροκραματωμένους χάλυβες,

μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση του Andrews:

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 423 (\%C) - 30.4 (\%Mn) - 17.7 (\%Ni) - 12.1 (\%Cr) - 7.5 (\%Mo)$$

Ενώ σύμφωνα με τον Eldis για τη σύσταση διφασικών χαλύβων:

$$M_s(^{\circ}C) = 531 - 391.2 (\%C) - 43.3 (\%Mn) - 21.8 (\%Ni) - 16.2 (\%Cr)$$

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός μετά τη θερμοκρασία M_s συνεχίζεται μέχρι τη θερμοκρασία M_f , η οποία είναι η θερμοκρασία λήξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Στη θερμοκρασία αυτή θα έχει μετασχηματιστεί όλος ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη, εκτός κι αν ο χάλυβας περιέχει κατάλληλα κραματικά στοιχεία τα οποία οδηγούν στο να μην έχει μετασχηματιστεί πλήρως ο ωστενίτης. Το ποσοστό αυτό που δε μετασχηματίστηκε ονομάζεται υπολειπόμενος ωστενίτης.

Το ποσοστό του μαρτενσίτη που σχηματίστηκε μετά τη βαφή του χάλυβα από μια θερμοκρασία μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f = 1 - \exp - [0.01](M_s - T_q)$$

f: Είναι το ποσοστό του μαρτενσίτη που μετασχηματίστηκε μετά από τη βαφή

T_q: Η θερμοκρασία από την οποία έγινε η βαφή του χάλυβα

M_s: Η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού

Όπως μπορούμε να δούμε από την εξίσωση το ποσοστό του μαρτενσίτη που σχηματίζεται είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας M_s και όχι του χρόνου παραμονής στη δοσμένη θερμοκρασία M_s .

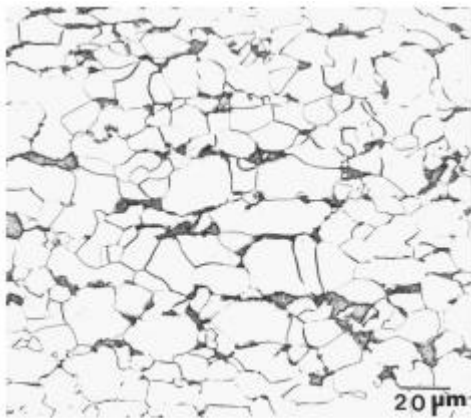
3.4.5 Μέσα Βαφής

Κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας βαφής η οποία περιλαμβάνει θέρμανση μέχρι τους 900°C και στην συνέχεια ψύξη προκειμένου η ωστενιτική φάση να μετατραπεί σε φάσεις με υψηλή σκληρότητα όπως π.χ. ο μπαινίτης και ο μαρτενσίτης.

Η ταχύτητα απόψυξης σε ψυκτικό μέσο είναι πολύ σημαντική, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να οδηγήσει στις τελικές ιδιότητες του χάλυβα και εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια του υλικού
- Τη μάζα και το σχήμα του υλικού
- Την ειδική θερμότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα
- Τη δραστικότητα – ψυκτική ικανότητα του λουτρού
- Τη διαφορά θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου και του αντικειμένου

3.4.6 Παραγωγή διφασικών χαλύβων

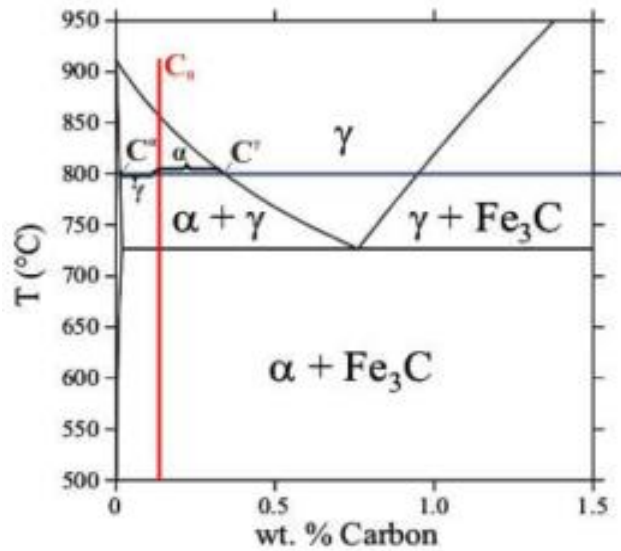


Εικόνα 3.17: Τυπική μικροδομή διφασικού χάλυβα στο οπτικό μικροσκόπιο

Οι διφασικοί χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία συναντώνται ως γαλβανισμένοι, σαν ήλεκτρο-γαλβανισμένοι και σαν προϊόντα θερμής και ψυχρής έλασης.

Η παραγωγή των διφασικών χαλύβων μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες κατεργασίες: Με θερμική έλαση, κατά την οποία δίνεται προσοχή στη σύσταση του χάλυβα – στην επιλογή και στο ποσοστό των κραματικών στοιχείων που συμπεριλαμβάνονται, στις συνθήκες κατά τις οποίες πραγματοποιείται και στο ρυθμό και στο μέσο απόψυξης. Η χρήση της θερμής έλασης έχει σα θετικό στοιχείο το ότι δεν έχει την απαίτηση

μεγάλων επενδύσεων, ενώ στα αρνητικά προσμετρά την αυστηρότητα όσον αφορά τη χημεία και τις ακολουθούμενες διεργασίες καθώς και το ότι το πάχος των παραγόμενων ελασμάτων δεν μπορεί να είναι πολύ μικρό. Άλλη μέθοδος είναι αυτή της ψυχρής έλασης κατά την οποία μπορούμε να πετύχουμε ελάσματα πολύ μικρού πάχους. Μετά από την ψυχρή έλαση, πραγματοποιείται ενδοκρίσιμη ανόπτηση – μεταξύ των θερμοκρασιών A_1 και A_3 κατά την οποία προκύπτει δομή φερρίτη και ωστενίτη, το ποσοστό των οποίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής σε αυτή.

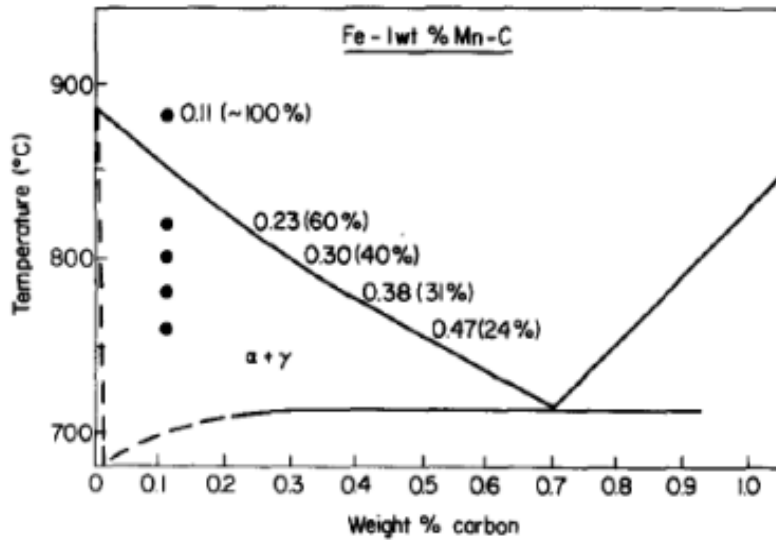


Εικόνα 3.18 : Παραγωγή διφασικών χαλύβων με ενδοκρίσιμη απόπτωση

Με βαφή, προκύπτει η μικροδομή του μαρτενσίτη, ενώ ο βαθμός απόψυξης εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία. Ορισμένες φορές λόγω της βαφής μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα ψαθυρότητας ή στην ικανότητα διαμόρφωσης του υλικού, τα οποία μπορούν να επιλυθούν με επαναφορά πριν ή κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης. Ο γαλβανισμός σε λουτρό ψευδαργύρου για λίγα δευτερόλεπτα, ο οποίος είναι σημαντικός και για την προστασία από τη διάβρωση, μπορεί να βοηθήσει σε αυτό το σκοπό.

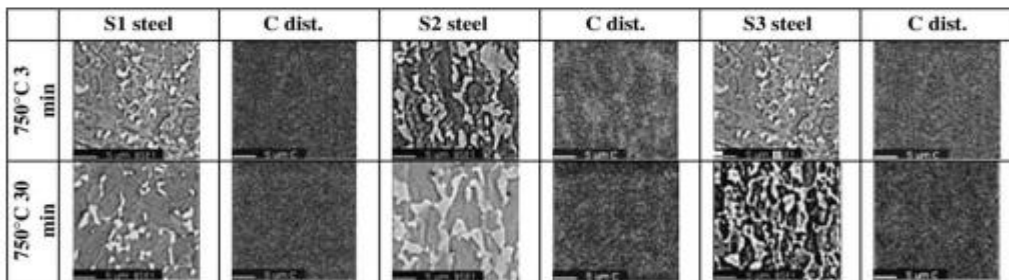
Οι χάλυβες με μικροδομή αποτελούμενη από φερρίτη και μαρτενσίτη, μελετήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '60 από διάφορους ερευνητές και διάφορες εταιρίες και ερευνητικά κέντρα όπως στην BISRA (British Iron and Steel Research Association) στο Ηνωμένο Βασίλειο και η Inland Steel Corporation στην Αμερική πολύ πριν την ονομασία των χαλύβων αυτών. Η ώθηση στην περαιτέρω ανάπτυξη των χαλύβων αυτών, δόθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70, όταν η απαίτηση για βελτιωμένη διαμορφωσιμότητα, μείωση του βάρους, οικονομία καυσίμων και αυξημένη ασφάλεια έκανε επιτακτική τη χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε Ιαπωνία και Αμερική. Οι διάφορες μελέτες που έγιναν ανέδειξαν πως η διαμορφωσιμότητα σε συνδυασμό με την αντοχή μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό κατάλληλης σύστασής του και των ακολουθούμενων κατάλληλων διεργασιών κατά την επεξεργασία των χαλύβων αυτών.

Από τα πρώτα πράγματα που εξέτασαν οι ερευνητές, ήταν το πως επηρεάζει η σύσταση του χάλυβα τις ιδιότητές του. Το 1981 οι Sherman και Davies μελέτησαν την επίδραση της περιεκτικότητας του άνθρακα στον μαρτενσίτη στις μηχανικές ιδιότητες και πιο συγκεκριμένα στην κόπωση – όπου παρατηρήθηκε πως με την αύξηση της περιεκτικότητας έχουμε αύξηση της αντοχής καθώς ευνοϊκή επίδραση όσον αφορά την κόπωση.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα φάσεων για Fe-1% Mn-C στο οποίο παρουσιάζονται τα ποσοστά (%) της φάσης του μαρτενσίτη καθώς και της περιεκτικότητας του άνθρακα στο μαρτενσίτη για ένα κράμα 0,11C, το οποίο υφίσταται βαφή από διάφορες θερμοκρασίες

Οι El Sesy και El Baradie, παρατήρησαν την επίδραση της περιεκτικότητας του άνθρακα στη δομή και στις ιδιότητες των διφασικών χαλύβων, μελέτη από την οποία προέκυψε πως το ποσοστό του άνθρακα στο μαρτενσίτη αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας ενδοκρίσιμης ανόπτησης ή από το ογκομετρικό κλάσμα του μαρτενσίτη. Η επίδραση του άνθρακα είναι διπλή. Στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες. Έτσι σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές, αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του μαρτενσίτη και σε μικροδομή χαρακτηριζόμενη από διδυμισμό, ενώ μειωμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα οδηγεί σε μειωμένη αντοχή σε σκληρότητα και σε πλακοειδή μικροδομή. Επίσης παρατηρήθηκε πως με μείωση του ποσοστού του άνθρακα στο μαρτενσίτη, έχουμε αύξηση στην ομοιόμορφη επιμήκυνση (uniform elongation) του χάλυβα. Με μείωση της περιεκτικότητας του άνθρακα στο φερρίτη παρουσιάζεται αύξηση

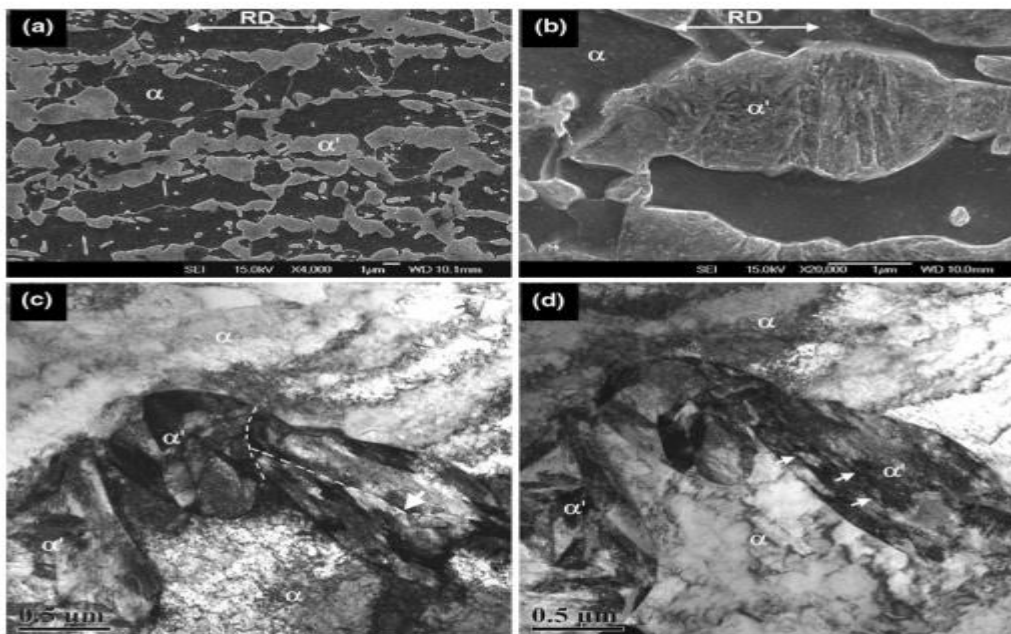


Εικόνα 3.20: Κατανομή του άνθρακα (C) στους διφασικούς χάλυβες

της ολκιμότητας. Για την παρατήρηση της κατανομής του C μέσα στο υπό εξέταση υλικό,

οι Zeytin et.al, έκαναν χρήση του Electron Probe Micro – Analysis (EPMA), μικροαναλυτή προσαρμοσμένου σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Σε άλλες μελέτες έχει γίνει έρευνα όσον αφορά το πως επηρεάζει τις ιδιότητες του χάλυβα το ποσοστό του φερρίτη και του μαρτενσίτη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Οι Sherman και Davies, μελέτησαν την επίδραση του ογκομετρικού κλάσματος του μαρτενσίτη στην κόπωση, κατά την οποία παρατηρήθηκε πως η συμπεριφορά ποικίλλει ανάλογα με το ποσοστό του μαρτενσίτη. Αύξηση του ποσοστού του μαρτενσίτη, βελτιώνει τη συμπεριφορά σε κόπωση του χάλυβα. Αυτό όμως ισχύει μέχρι ένα ποσοστό της τάξεως του 30%, μετά από το οποίο οι ιδιότητες δεν είναι αναλογικές με το ποσοστό. Από την άλλη μεριά, ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών κατά την κόπωση μειώνεται με αύξηση της περιεκτικότητας του μαρτενσίτη – ο οποίος όμως θα πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε C. Επίσης με αύξηση του ογκομετρικού κλάσματος του μαρτενσίτη, αυξάνεται η αντοχή και η ολκιμότητα. Οι Bello και Hassan, προσδιόρισαν πως η σκληρότητα του χάλυβα αυξάνεται με την αύξηση του άνθρακα, όμως μέχρι ενός ποσοστού του μαρτενσίτη, αφού πέρα από αυτό παρατηρείται μείωση στη σκληρότητα, ιδιότητα που ίσως οφείλεται στην ύπαρξη χονδρομερούς (coarse) μαρτενσίτη. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε όσον αφορά την αντοχή κατά την κρούση, κατά τη θερμική επεξεργασία που ακολουθήθηκε. Οι Akbarpour και Ekrami, ανέφεραν πως αύξηση του ποσοστού του φερρίτη οδηγεί σε μείωση του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσης, ενώ η ολκιμότητα αυξάνεται.



Εικόνα 3.21: Μορφή φερρίτη και μαρτενσίτη στους διφασικούς χάλυβες, με δυο μικροσκοπικές τεχνικές παρατήρησης SEM και TEM

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ιδιότητες ενός διφασικού χάλυβα, επηρεάζονται από το ποσοστό του άνθρακα και το ποσοστό του μαρτενσίτη. Ταυτόχρονα όμως υπάρχει

αλληλεξάρτηση των δύο φάσεων μεταξύ τους. Έτσι, το ποσοστό του άνθρακα στο μαρτενσίτη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$|\%C|_{\text{ara}} = |\%C|_{\text{m}}v_{\text{m}}\rho_{\text{m}} + |\%C|_{\text{f}}(1 - v_{\text{m}})\rho_{\text{f}},$$

όπου, v_{m} το ογκομετρικό κλάσμα του μαρτενσίτη

$|\%C|_{\text{m}}$, $|\%C|_{\text{f}}$, $|\%C|_{\text{a}}$ η περιεκτικότητα του άνθρακα στο μαρτενσίτη, στο φερρίτη και στο κράμα και

ρ_{m} , ρ_{f} , ρ_{a} η πυκνότητα του μαρτενσίτη, του φερρίτη και του κράματος,

ενώ η περιεκτικότητα του άνθρακα στο φερρίτη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$|\%C|_{\text{m}} = |\%C|_{\text{a}} / v_{\text{m}}$$

Επίσης μπορεί να υπολογιστεί και από τη σχέση:

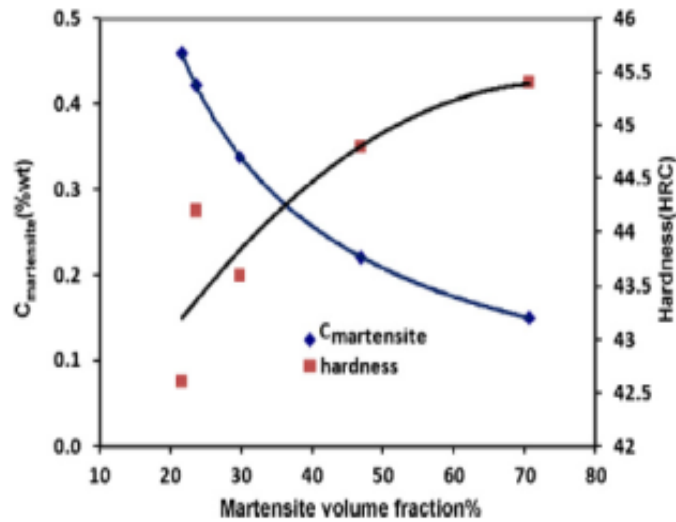
$$C_{\text{a}} = C_{\text{f}}V_{\text{f}} + C_{\text{m}}V_{\text{m}}$$

Οι Birgani, και Pouranvari, μετά από μελέτες που έκαναν παρατήρησαν πως με αύξηση του ογκομετρικού κλάσματος του μαρτενσίτη μειώνεται το ποσοστό του άνθρακα. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική αφού η αντοχή του μαρτενσίτη καθορίζεται κυρίως από το ποσοστό του άνθρακα.

3.4.7 Επίδραση των κραματικών στοιχείων στους διφασικούς χάλυβες

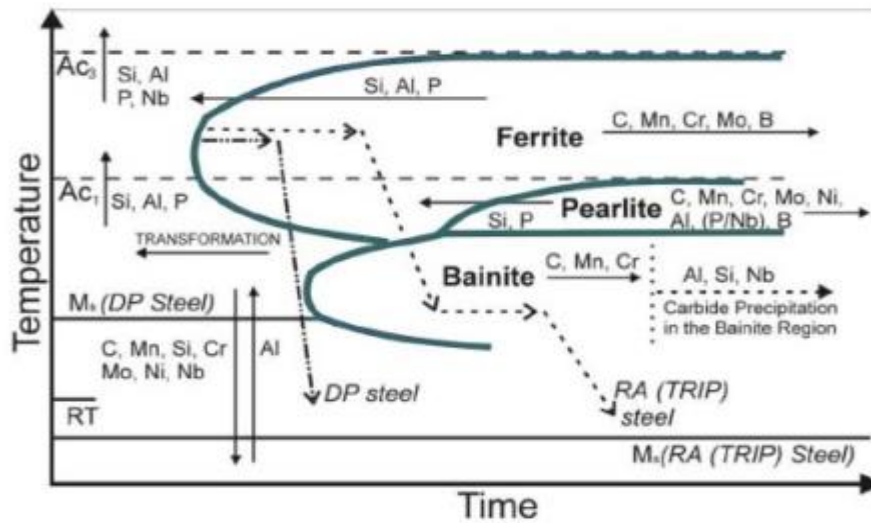
Οι διφασικοί χάλυβες ανήκουν στην κατηγορία των χαλύβων χαμηλής κραμάτωσης. Η αντοχή των διφασικών χαλύβων σχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα, του μαρτενσίτη και του φερρίτη. Με αυξημένη περιεκτικότητα άνθρακα αυξάνεται η αντοχή του μαρτενσίτη άρα και του χάλυβα μειώνεται όμως η ολκιμότητα του φερρίτη. Γι' αυτό είναι προτιμητέα όχι η αύξηση του ποσοστού του άνθρακα, αλλά η αύξηση του ποσοστού

του μαρτενσίτη. Με χαμηλή επίσης περιεκτικότητα σε άνθρακα αυξάνεται η διαμορφωσιμότητα και η συγκολλησιμότητα των διφασικών χαλύβων.



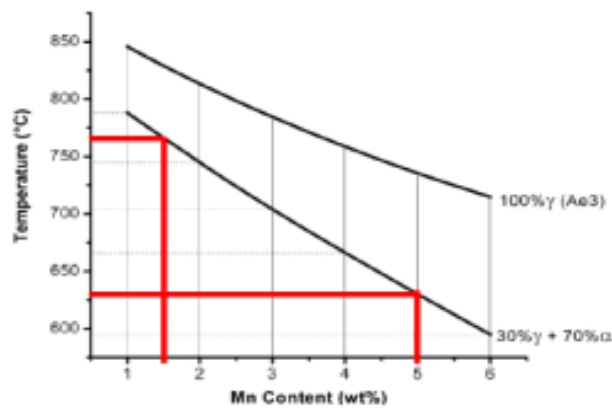
Εικόνα 3.22: Γραφική παρουσίαση της περιεκτικότητας του μαρτενσίτη σε άνθρακα σε σχέση με τη σκληρότητα και το ογκομετρικό κλάσμα του μαρτενσίτη

Εκτός από την περιεκτικότητα σε C, πολύ σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία, στην εξέλιξη, στη συμπεριφορά και στις ιδιότητες των διφασικών χαλύβων έχει η παρουσία των κραματικών στοιχείων όχι μόνο ως προς το ποια θα είναι αλλά και ως προς το ποσοστό συμμετοχής τους. Τα κραματικά στοιχεία μπορεί να διαχωριστούν ανάλογα με το αν σταθεροποιούν την φάση του ωστενίτη (austenite stabilizers) όπως π.χ. το μαγγάνιο, το νικέλιο και ο χαλκός, ή αν σταθεροποιούν την φάση του φερρίτη (ferrite stabilizers) όπως το μολυβδαίνιο, το πυρίτιο, το τιτάνιο, το βανάδιο, το νιόβιο κτλ. Με την παρουσία τους μπορεί να μετατεθούν οι θερμοκρασίες και οι περιεκτικότητες στα διαγράμματα φάσεων.



Εικόνα 3.23: Επίδραση των κραματικών στοιχείων στη συμπεριφορά του υλικού, στο διάγραμμα TTT

Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί από κραματικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να προστεθούν, για την παραγωγή της επιθυμητής μικροδομής. Για την αύξηση της αντοχής του φερρίτη – και κατ’ επέκταση του χάλυβα – χρησιμοποιούνται κραματικά στοιχεία όπως το Si και το Mn με κάποιο μέγιστο όριο ως προς τη χρησιμοποιούμενη ποσότητα. Η προσθήκη Mn, το οποίο στους διφασικούς χάλυβες χρησιμοποιείται σε ποσοστό 1 – 1,5%, βοηθά στη μείωση της ταχύτητας απόψυξης που απαιτείται για το σχηματισμό του μαρτενσίτη, αλλά είναι και ευεργετικό όσον αφορά την εκλέπτυνση των κόκκων. Επιπροσθέτως, αυξάνει την εμβαπτότητα του μαρτενσίτη, ενώ μειώνει την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 .



Εικόνα 3.24: Επίδραση της περιεκτικότητας του μαγγανίου (Mn) στη θερμοκρασία και στο σχηματισμό ωστενίτη

Η μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα των διφασικών χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας, οδηγεί στη μείωση της σκληρότητας του χάλυβα. Γι' αυτό το λόγο, αυξάνεται λίγο το ποσοστό του περιεχόμενου μαγγανίου, για να αντισταθμιστεί η μείωση της σκληρότητας λόγω μείωσης του άνθρακα. Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση των ερευνητικών εργαστηρίων χάλυβα της Nippon, η προσθήκη Si οδηγεί σε υψηλή αντοχή κατά την κόπωση. Άλλοι ερευνητές παρατήρησαν βελτίωση της ολκιμότητας ως προς δεδομένη αντοχή σε εφελκυσμό. Προστίθεται επίσης Si για τη σκλήρυνση μέσω του σχηματισμού στερεού διαλύματος.

Η προσθήκη βαναδίου (V) στους διφασικούς χάλυβες σύμφωνα με τον Rashid, ενισχύει το σχηματισμό μαρτενσίτη, ενώ οδηγεί σε αυξημένη αντοχή σε θραύση σε σύγκριση με αυτούς που δεν περιέχουν. Οδηγεί επίσης σε εκλέπτυνση των κόκκων, ενώ προσδίδει μεγαλύτερη σκληρότητα απ' ό,τι η παρουσία Nb ή Ti στο κράμα. Η χρήση του Ti έγκειται στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων μέσω της παρεμπόδισης της δημιουργίας χονδρόκοκκων φάσεων κατά τη διάρκεια της έλασης. Επίσης τα κραματικά στοιχεία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και στη θερμοκρασία έναρξης και λήξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, κατά τις διάφορες ενδοκρίσιμες θερμοκρασίες.

Σημαντική είναι επίσης η επίδραση των κραματικών στοιχείων στο βαθμό απόψυξης του χάλυβα μετά από τη θερμική του επεξεργασία. Το Cr και ο Mo χρησιμοποιούνται σε ποσοστό μικρότερο του 0,6% κ.β. στους διφασικούς χάλυβες, για τη μετακίνηση της καμπύλης TTT προς τα δεξιά μειώνοντας το ρυθμό απόψυξης, που έχει θετική επίδραση στη μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Έτσι, δεδομένου της παρόμοιας συμπεριφοράς που προβάλλουν τα κραματικά στοιχεία Cr, Mo και Mn οι Tanaka et al. εξέφρασαν την επίδρασή τους στο ρυθμό απόψυξης – μέσω του ισοδύναμου μαγγανίου, Mn_{eq} (%) μέσω του τύπου:

$$\log Cr [K/s] = - 1.73 (Mn)_{eq} [\%] + 3.95$$

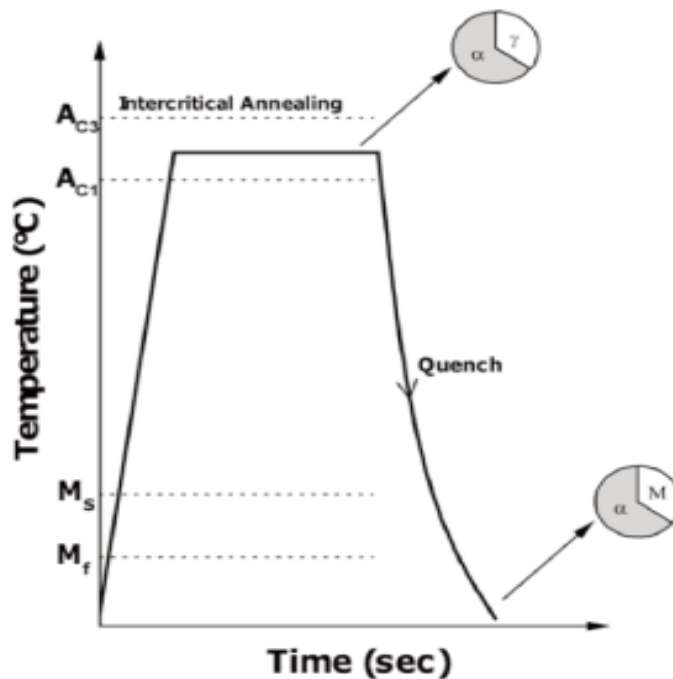
όπου, $(Mn)_{eq} = (Mn) + 1.3 (Cr) + 2.67(Mo)[\%]$

Συμπεραίνουμε λοιπόν σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο ρυθμός απόψυξης, για το σχηματισμό χαλύβων διφασικής μικροδομής, είναι τόσο μικρότερος όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία.

3.4.8 Θερμικές κατεργασίες

Η βελτίωση των ιδιοτήτων των διφασικών χαλύβων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ενδοκρίσιμες θερμικές κατεργασίες, με θέρμανση δηλαδή του υλικού μεταξύ των θερμοκρασιών A_1 και A_3 . Η θερμοκρασία που θα επιλεγθεί, ο χρόνος παραμονής και η επιλογή του τρόπου ψύξης ή βαφής εξαρτάται από τις απαιτούμενες παραγόμενες ιδιότητες.

Η συνήθης διαδικασία παραγωγής διφασικών χαλύβων αποτελείται από δύο στάδια, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι και άλλες διεργασίες δεν μπορούν να ακολουθηθούν. Έτσι, το ένα στάδιο όπως προαναφέρθηκε αποτελείται από ενδοκρίσιμη ανόπτηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί για παράδειγμα σε φούρνο ανόπτησης, μεταβάλλοντας τα ποσοστά του φερρίτη και του ωστενίτη και η οποία ακολουθείται από το δεύτερο στάδιο, αυτό της απότομης ψύξης – βαφής η οποία συνήθως πραγματοποιείται στο νερό μετασχηματίζοντας έτσι τη φάση του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Η διαδικασία αυτή είναι και αυτή η οποία έχει ακολουθηθεί στην παρούσα διατριβή και η οποία σχηματικά αποδίδεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.25: Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής DP χαλύβων μέσω ενδοκρίσιμης ανόπτησης και βαφής

Σύμφωνα με τους Birgani και Pouranvari ο υπολογισμός των ενδοκρίσιμων θερμοκρασιών A_1 και A_3 μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$A_1 (^\circ\text{C}) = 751 - 16.3C - 27.5Mn - 5.5Cu - 5.9Ni + 34.9Si + 12.7Cr + 3.4Mo$$

$$A_3 (^\circ\text{C}) = 881 - 206C - 15Mn - 26.5Cu - 20.1Ni - 0.7Cr + 53.1Si + 41.7V$$

Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν παραπάνω είναι ενδεικτικές και αναφέρονται σε χάλυβες που μελέτησαν οι ερευνητές Birgani και Pouranvari. Έτσι λοιπόν, ενδέχεται να υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές που προκύπτουν από αντικατάσταση των κραματικών στοιχείων του υπό εξέταση υλικού. Θα πρέπει δηλαδή να γίνει χρήση πειραματικών τεχνικών οι οποίες θα μας δώσουν πιο ακριβή στοιχεία όσον αφορά τις ενδοκρίσιμες θερμοκρασίες.

Ο ρυθμός απόψυξης μετά τις θερμικές κατεργασίες είναι ένας οικονομικός τρόπος διαμόρφωσης των διφασικών χάλυβων. Όπως προαναφέρθηκε μπορεί να παραχθούν χάλυβες υψηλής αντοχής με χαμηλή περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην επίδραση της βαφής τόσο στην μικροδομή όσο και στις μηχανικές ιδιότητες των διφασικών χάλυβων. Με αύξηση του ρυθμού απόψυξης αυξάνεται το ποσοστό του μαρτενσίτη του υπό μελέτη υλικού.

3.4.8.1 Έλεγχος μεγέθους κόκκων φερρίτη-μαρτενσίτη

Το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη και του μαρτενσίτη επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων DP. Ο Rashid αναφέρει πως η αύξηση της αντοχής του μαρτενσίτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με μείωση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη. Επιπλέον, σύμφωνα με την εξίσωση Hall – Petch, προκύπτει αύξηση στο όριο διαρροής (σ_y), λόγω μείωσης του μεγέθους των κόκκων (d).

Η επίτευξη μικρού μεγέθους κόκκων μπορεί να επιτευχθεί και να ελεγχθεί με την προσθήκη κραματικών στοιχείων, με σωστό όμως συνδυασμό για να προκύψουν και οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Στην επίτευξη της κατάλληλης δομής μπορεί να γίνει χρήση της μεθόδου μετασχηματισμού με προκαλούμενη παραμόρφωση, Strain Induced Transformation Method (SITM), η οποία έγκειται στην ανάπτυξη τάσεων μέσω της θερμής έλασης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εκλεπτυσμένοι κόκκοι φερρίτη. Υπάρχουν επίσης επιπλέον τεχνικές, οι οποίες επιτυγχάνουν εκλέπτυνση των κόκκων μέσω διεργασιών άσκησης τάσης στον χάλυβα, όπως η High Pressure Torsion – HPT, η Equal

Channel Angular Pressing (ECAP), η Accumulative Roll Bonding (ARB). Οι παραπάνω τεχνικές περιλαμβάνουν και ανοπτήσεις, οι οποίες όπως αναφέρει ο Rashid δεν έχουν δώσει μετρήσιμα αποτελέσματα που να δείχνουν αύξηση του μεγέθους των κόκκων, έχει παρατηρηθεί όμως διατήρηση του μικρού μεγέθους των κόκκων και ορισμένες φορές και εκλέπτυνση.

Σύμφωνα με τους Calcagnotto στη μελέτη που έκαναν, παρατήρησαν πως με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων προκύπτει αύξηση στο όριο διαρροής και στην αντοχή σε θραύση ενώ υπάρχει μικρή επιρροή στην επιμήκυνση. Το μέγεθος του λαιμού μετά τη θραύση, παρουσιάζει αύξηση με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων αφού το λεπτόκοκκο υλικό έχει μεγαλύτερη ολκιμότητα με αποτέλεσμα να σχηματίζεται λαιμός μέχρι σημειακής αποκόλλησης.

3.4.9 Μηχανικές Ιδιότητες

Η σκληρότητα των διφασικών χαλύβων εξαρτάται από το ποσοστό του μαρτενσίτη ο οποίος και αποτελεί τη σκληρή φάση του υλικού. Έτσι με αύξηση του ποσοστού του μαρτενσίτη αυξάνεται η σκληρότητα. Η μεταβολή αυτή μπορεί να επιτευχθεί με θερμικές κατεργασίες και βαφή. Οι Birgani Pouranvari στη μελέτη τους ανέδειξαν πως το μέγιστο όριο θραύσης επιτυγχάνεται σε ποσοστό 50% του μαρτενσίτη και όχι σε πλήρως μαρτενσιτική δομή. Παρόλα αυτά στην επιστημονική κοινότητα υπάρχει διχογνωμία σχετικά με την μελέτη των Birgani Pouranvari, αφού άλλοι πιστεύουν στην ισχύ του κανόνα του μοχλού και κάποιοι άλλοι στο συμπέρασμα της αναντιστοιχίας μεταξύ του ογκομετρικού κλάσματος του μαρτενσίτη και των μηχανικών ιδιοτήτων των διφασικών χαλύβων.

Από πολλούς ερευνητές έχει μελετηθεί επίσης η αντοχή σε θραύση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Με θερμική κατεργασία των διφασικών χαλύβων πάνω από τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και με απότομη βαφή, αυξάνεται το ογκομετρικό κλάσμα μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής σε θραύση. Ιδιαίτερη όμως προσοχή θα πρέπει να δοθεί γιατί μια πλήρως μαρτενσιτική δομή θα οδηγήσει σε πολύ μεγάλη σκληρότητα και αντοχή κατά τον εφελκυσμό, αλλά θα απουσιάσει η ολκιμότητα η οποία θα είναι πάρα πολύ μικρή.

Όπως αναφέρθηκε και σύμφωνα με τους Calcagnotto et al., η εκλέπτυνση των κόκκων είναι ουσιώδης αφού λειτουργεί ως μηχανισμός σκλήρωσης των μετάλλων και αυξάνει την αντοχή τους, χωρίς απώλειες σε ολκιμότητα. Επέρχεται αύξηση του ορίου διαρροής και της αντοχής σε θραύση, ενώ αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει η επιμήκυνση η οποία

διαφαίνεται να επηρεάζεται αρνητικά. Μια από τις πολύ βασικές ιδιότητες των AHSS χαλύβων και ιδιαίτερα των DP είναι η πολύ καλή ολκιμότητα που παρουσιάζουν, ιδιότητα απαραίτητη για την αυτοκινητοβιομηχανία.

Η απορροφούμενη ενέργεια κρούσης είναι πολύ σημαντική για την ικανοποιητική σχεδίαση και παραγωγή ενός οχήματος. Η απορροφούμενη ενέργεια κρούσης μπορεί να υπολογιστεί από την περιοχή που περικλείεται κάτω από την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης. Σύμφωνα με τους Riemann Sums, μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Ενέργεια Κρούσης} = \sum_{n=1}^n \sigma(n) [\varepsilon(n) - \varepsilon(n - 1)]$$

Όπου,

σ : η τάση

ε : η παραμόρφωση

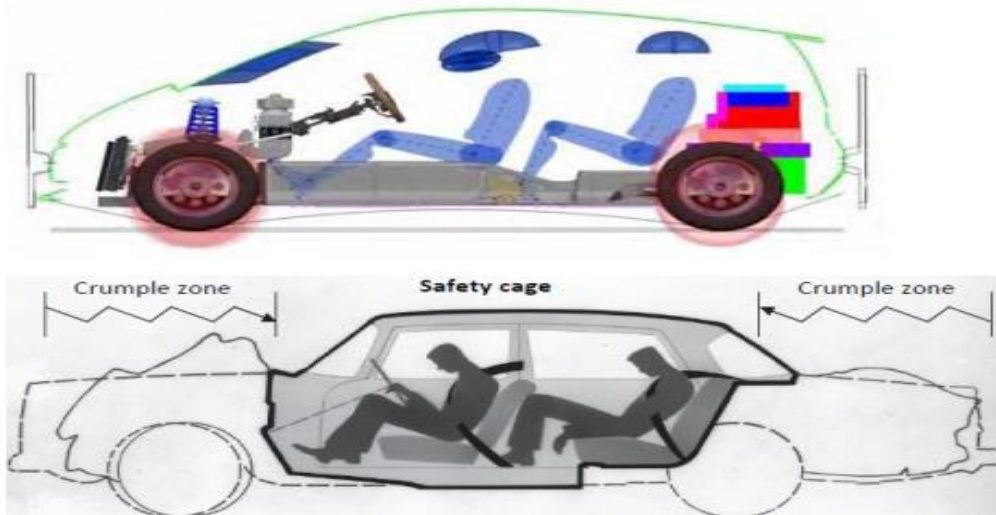
n : ο αριθμός δεδομένων και **N** : η τάση θραύσης

Ο υπολογισμός της ενέργειας είναι πολύ σημαντικός καθώς σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά του οχήματος κατά την πρόσκρουση. Κατά τη διάρκεια ενός τρακαρίσματος οι τάσεις και οι καταπονήσεις στις οποίες υπόκειται ένα όχημα είναι πολύ μεγάλες, ενώ ταυτόχρονα ποικίλλουν ανάλογα με το τμήμα του οχήματος και διάφορους άλλους παράγοντες όπως η γωνία πρόσκρουσης. Θα πρέπει έτσι οι ερευνητές να το εξετάσουν όχι μόνο τμηματικά αλλά συνολικά για να είναι όσο πιο ακριβής ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς του.



Εικόνα 3.26: Euro – NCAP οργάνωση πειράματος για δοκιμή της αντοχής του αυτοκινήτου κατά την κρούση, για μετωπική σύγκρουση

Ένα όχημα αποτελείται από δύο βασικά τμήματα με διαφορετικές απαιτήσεις το κάθε ένα. Αποτελείται από το θάλαμο επιβατών και από τη ζώνη παραμόρφωσης. Ο θάλαμος επιβατών ο οποίος βρίσκεται μέσα στην περιοχή που περικλείεται από το κλουβί ασφαλείας του αυτοκινήτου, έχει σχεδιαστεί για να έχει τη δυνατότητα να προφυλάσσει τους επιβάτες του οχήματος από κάθε είδους ατύχημα ανεξάρτητα από την ένταση. Η κατασκευή αυτή, έχει σαν στόχο να αποτρέπει οποιοδήποτε είδους εισβολή στο θάλαμο των επιβατών η οποία θα μπορούσε να αλλοιώσει την ακεραιότητα του πλαισίου.



Εικόνα 3.27: Δυο ζώνες αυτοκινήτου για τη διαχείριση των επιπτώσεων της σύγκρουσης

Η δεύτερη ζώνη, η οποία όπως προαναφέρθηκε ονομάζεται ζώνη πρόσκρουσης, αποτελεί το μπροστινό και πίσω μέρος του οχήματος, στόχος της οποίας είναι η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, μειώνοντας έτσι την ορμή της πρόσκρουσης με αποτέλεσμα να διατηρηθεί ανέπαφος ο θάλαμος των επιβατών.

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών της κρούσης πολλοί ερευνητές πραγματοποιούν δοκιμές εφελκυσμού υπό δυναμικές συνθήκες καταπόνησης, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες παραμόρφωσης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια ενός τρακαρίσματος. Άλλη προσέγγιση γίνεται μέσω της χρήσης τετράγωνων σωλήνων που προσομοιάζουν συγκρούσεις. Όπως έχουμε αναφέρει στόχος της οικογένειας των χαλύβων υψηλής αντοχής, στην οποία ανήκουν και οι διφασικοί χάλυβες, είναι η μείωση του πάχους του αμαξώματος με θετικά αποτελέσματα στο βάρος του, στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων κτλ. Έτσι από μελέτες που έχουν προηγηθεί, παρατηρήθηκε η συσχέτιση του πάχους και της ικανότητας που έχουν οι τετράγωνοι σωλήνες προσομοίωσης στην απορρόφηση της απορροφούμενης ενέργειας. Η εξάρτηση αυτή δίδεται από τον τύπο:

$$E_{ab} = C\delta L^{1/3}t^{1/5}$$

όπου, L είναι το πάχος της πλευρικής διατομής, δ είναι το βήμα παραμόρφωσης κατά τη σύγκρουση, t είναι το πάχος του φύλλου και C είναι μια σταθερά η οποία είναι ανάλογη με την αντοχή σε δυναμική καταπόνηση του υλικού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι διφασικοί χάλυβες εκτός από τις άλλες εξαιρετικές ιδιότητες που παρουσιάζουν όπως η διαμορφωσιμότητα, εμφανίζουν να έχουν υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας.

3.4.10 Συγκολλησιμότητα των Διφασικών Χαλύβων

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που έχει μελετηθεί και που είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία ενός αυτοκινήτου είναι οι συγκολλησιμότητα. Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω του μεγάλου ποσοστού χρήσης των διφασικών χαλύβων στα αυτοκίνητα η οποία σύμφωνα με το πρόγραμμα ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) μπορεί να φτάσει μέχρι το 74% του αμαξώματος, η ανάγκη για τη μελέτη της επίδρασης της συγκόλλησης στους διφασικούς χάλυβες ήταν επιτακτική. Μετά από μελέτη αρχικών και συγκολλημένων διφασικών χαλύβων, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στη μικροδομή πριν και μετά τη συγκόλληση. Η συνήθης μέθοδος συγκόλλησης των DP είναι η σημειακή συγκόλληση σε

γαλβανισμένους διφασικούς χάλυβες, κατά την οποία παρουσίασαν καλή συμπεριφορά με την αντοχή της πόντας (button size – Imin) να βρίσκεται στο 50% της αντοχής του υλικού.

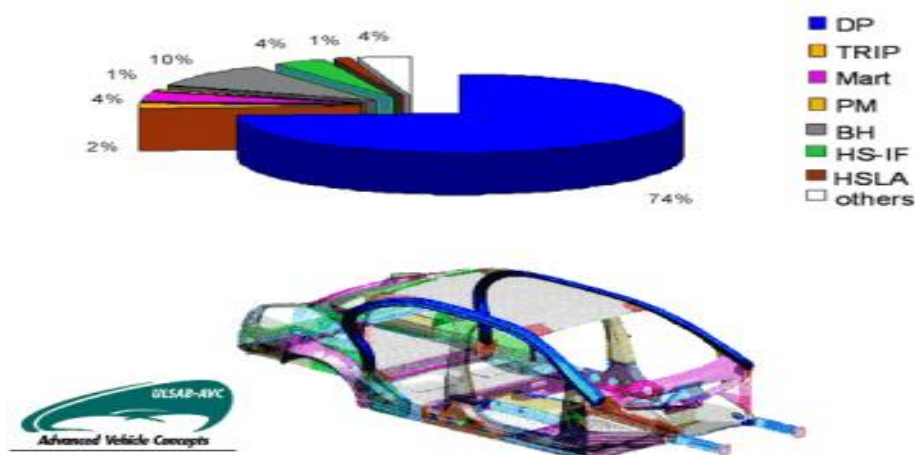
Σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των διφασικών χάλυβων κατά τη συγκόλληση, έχει και η περιεκτικότητα του χάλυβα σε κραματικά στοιχεία. Έτσι λοιπόν αναπτύχθηκε μια παράμετρος η οποία έδωσε τη δυνατότητα πρόβλεψης πιθανών προβλημάτων και ελαττωμάτων πριν γίνει η συγκόλληση. Η παράμετρος αυτή είναι το ισοδύναμο του άνθρακα, Carbon Equivalent (CE). Οι τιμές του CE κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1, έχοντας όμως υπόψιν πως για τιμές πάνω από 0.3 η συγκόλληση ενδέχεται να παρουσιάσει ελαττώματα. Η τιμή του Carbon Equivalent (CE) μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση Ito - Bessyo:

$$CE = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση αυτή τις τιμές των κραματικών στοιχείων του διφασικού χάλυβα που θέλουμε να μελετήσουμε, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για τα πιθανά αποτελέσματα της συγκόλλησης.

3.4.11 Χρήσεις στο αμάξωμα του αυτοκινήτου

Οι διφασικοί χάλυβες, όπως προαναφέρθηκε, ανήκουν στους προηγμένους – υψηλής αντοχής χάλυβες, με διαρκώς αυξανόμενη χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία.

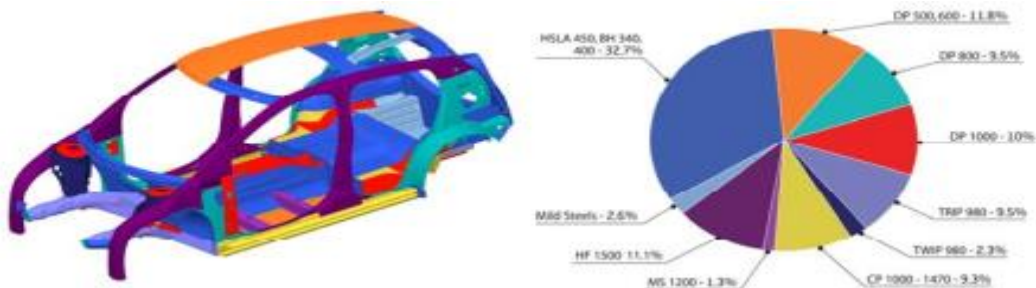


Εικόνα 3.28: Ποσοστιαία χρήση των πολυφασικών προηγμένων χάλυβων υψηλής αντοχής και η χρήση τους πάνω στο αμάξωμα του αυτοκινήτου

Οι διφασικοί χάλυβες έχουν πολλές χρήσεις πάνω στο αμάξωμα του αυτοκινήτου, όπως στις πόρτες, στο καπό, στους προβολείς, στις κολώνες στήριξης του σκελετού, στις ζάντες κ.α. Παραδείγματα αυτοκινήτων στα οποία έχουν χρήση οι διφασικοί χάλυβες είναι το Chevrolet Volt, το Grand Cherokee και Commander στα οποία χρησιμοποιείται ο DP600, καθώς και η Cadillac ATS.



Εικόνα 3.29: Cadillac ATS



Εικόνα 3.30: Ποσοστιαία χρήση των AHSS χαλύβων σύμφωνα με το πρόγραμμα Future Steel Vehicle (FSV)

Το 2009 χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του Ford Fiesta, στο οποίο επιβεβαιώθηκε πως η χρήση του είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους του αμαξώματος, οικονομία καυσίμων και μείωση των εκπομπών CO₂, χωρίς φυσικά να έχει γίνει έκπτωση στην ασφάλεια των επιβατών.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Περιγραφή του υλικού

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο διφασικός χάλυβας DP600. Το σύμβολο DP χαρακτηρίζει τους διφασικούς χάλυβες, ενώ το 600 αναφέρεται στην ελάχιστη αντοχή του συγκεκριμένου υλικού σε θραύση. Η αντοχή αυτή βασίζεται στο συνοδευτικό έγγραφο του κατασκευαστή και ενδέχεται να υπάρχει απόκλιση της τάξεως των $\pm 20\text{MPa}$, η οποία είναι αποδεκτή. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ψυχρή έλαση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η χημική σύσταση του εξεταζόμενου διφασικού χάλυβα:

%	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
DP600	0,10	0,25	1,70	0,02	0,005	0,040	0,50	0,02	0,002	0,003

Τα δοκίμια αρχικά ήταν υπό τη μορφή χαλβδόφυλλων μήκους 191mm, πλάτους 35mm και πάχους 2mm, ενώ στη συνέχεια έγινε διαμόρφωσή τους με κοπή σε μέγεθος 22mm x 20mm, για τη θερμική επεξεργασία, τη μεταλλογραφία και τις σκληρομετρήσεις.

4.2 Προετοιμασία δοκιμίων

4.2.1 Κοπή

Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία για την αποκάλυψη της δομής, τέμνουμε το δοκίμιο στο κατάλληλο μέγεθος. Η μικροδομή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή κατά την διαδικασία της κοπής παρά σε κάποιο άλλο βήμα της προετοιμασίας. Η αλλαγή μπορεί να επέλθει από υπερβολική θερμότητα, μηχανική παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι λεγόμενες «τεχνητές μικροδομές» που προκύπτουν σ' αυτήν την περίπτωση είναι πιθανόν να μην επιτρέψουν την αποκάλυψη της πραγματικής δομής. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει η ζώνη παραμόρφωσης να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή, με την χρήση λειαντικού τροχού.

Η καλύτερη τεχνική κοπής του χάλυβα είναι ο αποξεστικός τροχός. Παρέχει επιφάνειες που είναι λείες, με ελάχιστη παραμόρφωση, και δεν παρουσιάζονται αλλαγές στην δομή από υπερθέρμανση. Τα δοκίμια τέμνονται με τροχούς από αλούμινα (Al_2O_3), με την απαιτούμενη ελαστικότητα του συνδετικού υλικού. Το δοκίμιο διατηρείται κρύο κατά την διάρκεια της κοπής, με την συνεχή ροή λαδιού, διαλυτού στο νερό. Επιλέγουμε την δύναμη κοπής που θα εφαρμόσουμε, καθώς και την σκληρότητα του υλικού κοπής. Επιλέγουμε τροχό ο οποίος αποσυντίθεται γρήγορα και αποκαλύπτει νέους κοπτικούς κόκκους. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην δύναμη κοπής, στην αφθονία του ψυκτικού υγρού και στην σταθερή συγκράτηση του δοκιμίου κατά την διάρκεια της κοπής, όλες οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν την τελική δομή του υλικού που θα παρατηρήσουμε στο μικροσκόπιο.



Εικόνα 4.1: Μηχανή κοπής του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της σχολής ΜΜΜ

4.2.2 Θερμικές Κατεργασίες

Οι χάλυβες DP600 περιέχουν ποσοστά των δύο φάσεων του φερρίτη και του μαρτενσίτη σε αναλογία 80 με 20% αντίστοιχα. Κατά την παρούσα διατριβή έγιναν θερμικές κατεργασίες που είχαν σαν στόχο τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού μέσω της μεταβολής της αρχικής μικροδομής τους. Δηλαδή παραγωγή μικροδομών φερρίτη / μαρτενσίτη με διαφορετικά κλάσματα όγκου, περιεκτικότητας C (μαρτενσίτη) και χωρικών κατανομών των εν λόγω φάσεων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία ήταν ενδοκρίσιμες ανοπτήσεις από τους 750 έως τους 800°C σε διάφορους χρόνους παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία για 2min, 5min και 30min. Κατά τη διάρκεια των θερμικών κατεργασιών, στο φούρνο που χρησιμοποιήθηκε, είχε τοποθετηθεί πυρίμαχο πάνω στο οποίο τοποθετούνταν τα δοκίμια. Το πυρίμαχο χρησιμοποιήθηκε για να υπάρχει σταθερότητα στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά και για τη στήριξη των δοκιμίων. Η επιλογή αυτού του υλικού έγινε δεδομένου ότι αποτελεί αδρανές υλικό και δεν υπάρχει αντίδραση με τα δοκίμια του διφασικού χάλυβα που μελετώνται.

Η αρχική επιλογή των θερμοκρασιών και των χρόνων παραμονής που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε πρώτον βάση του διαγράμματος ισορροπίας φάσεων σιδήρου - άνθρακα, στη δεδομένη περιεκτικότητα των δύο τύπων διφασικών χαλύβων μεταξύ των θερμοκρασιών 723(A₁) – 911(A₃), πριν φτάσουμε δηλαδή στην πλήρη ωστενιτική περιοχή και δεύτερον βάση των χρόνων ενδοκρίσιμης ανοπτησης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

➤ **Βαφή**

Μετα τις ενδοκρίσιμες ανοπτήσεις στους 750, 775 και 800°C για τους αντίστοιχους χρόνους ακολουθεί η διαδικασία της βαφής. Για να επανέλθει λοιπόν το υλικό στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, γίνεται βαφή σε δραστικό ψυκτικό μέσο, το οποίο στη συγκεκριμένη διατριβή είναι το νερό, αλλά μπορεί να γίνει βαφή στο λάδι και απόψυξη στον αέρα. Ο τρόπος βαφής που θα επιλεγεί είναι κρίσιμος, γιατί ανάλογα με αυτόν θα προκύψει και η μικροδομή του χάλυβα.

4.2.3 Ονομασία δοκιμίων

Η ονομασία των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε βάση της θερμική του κατεργασίας και τον χρόνο παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία. Έτσι για ένα δοκίμιο DP600 που είναι θερμικά κατεργασμένο στους 750°C για 5min, η ονομασία του είναι 750°C/5min.

4.2.4 Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγουμε ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Στο εργαστήριο χρησιμοποιείται ρητίνη της εταιρείας MetPrep και σκληρυντή της ίδιας εταιρείας. Όταν θέλουμε για το εγκιβωτισμένο δείγμα να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο βάζουμε αγωγήμη ρητίνη. Συνολικά για όλα τα καλούπια χρησιμοποιήσαμε 100ml ρητίνη, την οποία αναμείξαμε με 60 σταγόνες σκληρυντή (αναλογία περίπου οκτώ σταγόνες σκληρυντή στα 20-25ml ρητίνη). Τοποθετούμε τα δοκίμια μέσα σε ειδικά κυλινδρικά καλούπια, προσθέτουμε το μίγμα της ρητίνης που ετοιμάσαμε και περιμένουμε μερικά λεπτά, μπορεί και ώρα, έως ότου αυτό στερεοποιηθεί. Τέλος, αφαιρούμε το καλούπι από το δοκίμιο το οποίο είναι πλέον έτοιμο για τις περαιτέρω διεργασίες.



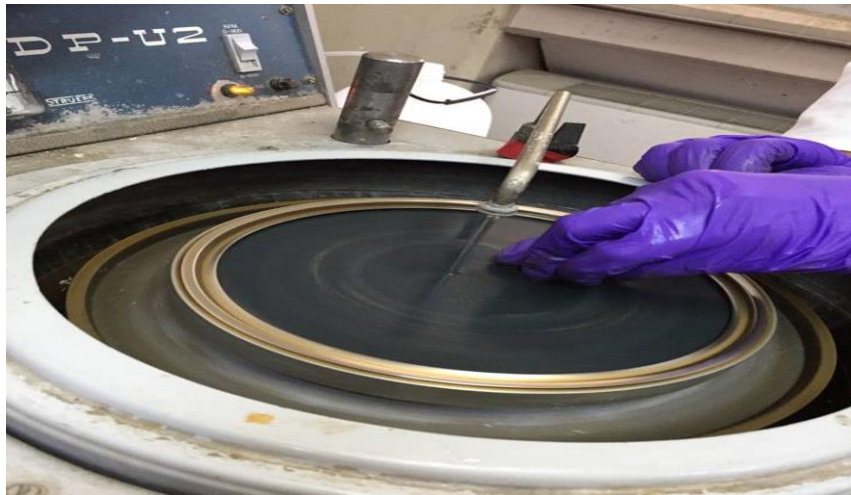
Εικόνα 4.2: Εγκιβωτισμένα δοκίμια

4.2.5 Λείανση

Όπως αναφέραμε παραπάνω ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για το κόψιμο του υλικού, η δομή της επιφάνειας έχει αλλοιωθεί σε κάποιο βαθμό. Το κατεστραμμένο στρώμα απομακρύνεται χρησιμοποιώντας σταδιακά λειαντικούς τροχούς με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους. Για τα σιδηρούχα υλικά χρησιμοποιούμε χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου(SiC). Με πρώτο μέγεθος κόκκου 220 grit, και με ακολουθία 400, 800, 1200 και 2000 κόκκοι ανά τετραγωνική ίντσα. Το μέγεθος 220 είναι για χονδρομερής κόκκους και προετοιμάζει το δοκίμιο χονδρομερώς. Όσο ανεβαίνουμε χαρτί λείανσης η επιφάνεια γίνεται όλο και πιο λεπτομερής. Κατά την διάρκεια της λείανσης είναι απαραίτητη η συνεχόμενη παροχή νερού, για τον καθαρισμό του δίσκου καθώς και την ψύξη του δοκιμίου.

Για να έχουμε ένα επίπεδο δοκίμιο με ελάχιστη παραμόρφωση συγκρατούμε το δοκίμιο με τα ακροδάχτυλα, όσο το δυνατόν πιο κοντά στον λειαντικό τροχό, χρησιμοποιούμε μέτρια δύναμη και μετακινούμε το δοκίμιο πέρα δώθε από το κέντρο προς την άκρη του χαρτιού και αντίστροφα. Εξετάζουμε την επιφάνεια περιοδικά για να καθορίσουμε εάν έχουν εξαλειφθεί οι ατέλειες, όπως γρατζουνιές, από τον προηγούμενο δίσκο. Η λείανση συνεχίζεται δύο με τρεις φορές από τον χρόνο που απαιτείται για την εξαφάνιση των προηγούμενων ατελειών προκειμένου να εξασφαλιστεί η εξάλειψη της ζώνης παραμόρφωσης. Όσο αυξάνουμε το νούμερο στο λειαντικό χαρτί μειώνουμε και τις στροφές του δίσκου. Αν κατά την διάρκεια της λείανσης προκύψει κάποιο σφάλμα πρέπει να αυξηθεί η ασκούμενη δύναμη και να μην χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκος δίσκος. Το δοκίμιο πρέπει να παραμείνει στον δίσκο που δημιουργήθηκε το ελάττωμα ή να επιστρέψει στον προηγούμενο.

Κατά την αλλαγή των χαρτιών λείανσης το δοκίμιο πρέπει να είναι υγρό για να αποφύγουμε τυχόν ολίσθηση. Επίσης πρέπει να ξεπλένεται πριν προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, για να μην μολυνθούν τα λειαντικά χαρτιά με κόκκους από τους πιο χονδρόκοκκους τροχούς. Μετά την τελική λείανση το δοκίμιο καθαρίζεται με βαμβάκι και νερό, στη συνέχεια προσθέτουμε στην επιφάνεια του αιθανόλη και στεγνώνεται σε θερμό αέρα.



Εικόνα 4.3: Λειαντικός δίσκος της σχολής MMM

4.2.6 Στίλβωση

Η στίλβωση γίνεται σε δύο πάνινους τροχούς. Ο πρώτος περιέχει κόκκους διαμαντιού (διαμαντόπαστα) διαμέτρου 6μm και ο δεύτερος κόκκους διαμαντιού διαμέτρου 1μm, η οποία διώχνει τις γραμμές λείανσης. Ως μέσο λίπανσης χρησιμοποιείται το στίλβωτικό υγρό της BUHLER τύπου METADI diamond suspension υδατικού διαλύματος. Για σιδηρούχα υλικά το γυάλισμα συνήθως απαιτεί μικρό χρόνο, με σχετικά μεγάλη ασκούμενη δύναμη και μικρή περιστροφική ταχύτητα, περίπου 150-200 στροφές per minute. Κατά την διάρκεια του γυαλίσματος περιστρέφουμε το δοκίμιο κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού. Κατά την μετάβαση από τον ένα δίσκο στον άλλο το δοκίμιο καθαρίζεται με ένα βρεγμένο βαμβάκι και ξεπλένεται με αιθανόλη. Επίσης το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται αντίστροφα από τον δίσκο, γιατί αλλιώς δημιουργείται το φαινόμενο της ουράς του κομήτη. Το δοκίμιο στεγνώνεται στο τέλος της διαδικασίας με ρεύμα θερμού αέρα.



Εικόνα 4.4: Μηχανή στίλβωσης

4.2.7 Χημική προσβολή

Για την παρατήρηση των δοκιμίων στο οπτικό και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκε προσβολή των δοκιμίων με διάλυμα Nital 2% σύμφωνα με το ASTM E407 πρότυπο (Standard). Η παραμονή του δοκιμίου μέσα στο διάλυμα διήρκησε 1-3sec. 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 Οπτικό Μικροσκόπιο

Το οπτικό μικροσκόπιο είναι οπτικό σύστημα για την παρατήρηση αντικειμένων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Η παρατήρηση μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ανακλώμενου είτε μέσω του διερχόμενου, από τα προς παρατήρηση αντικείμενα, φωτός. Το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται σε μία ευρεία περιοχή εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία η παρατήρηση έγινε στο οπτικό μικροσκόπιο τύπου Olympus BX41M στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Το αντικείμενο τοποθετείται πολύ κοντά σε ένα συγκλίνοντα φακό (τον αντικειμενικό ή αντοφθάλμιο φακό), πολύ μικρής εστιακής απόστασης, ο οποίος σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλό του. Το είδωλο αυτό μεγεθύνεται από έναν άλλο συγκλίνοντα φακό (τον προσοφθάλμιο φακό), ο οποίος σχηματίζει ένα φανταστικό είδωλο σε μια απόσταση από το μάτι που βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως. Το μάτι παρατηρεί αυτό το είδωλο. Το μήκος του σωλήνα του μικροσκοπίου έχει συνήθως σταθερό μήκος (τυπικά 160 mm). Έτσι, η εστίαση γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το παρατηρούμενο αντικείμενο, μέχρι να επιτευχθεί εστίαση για ευκρινή παρατήρηση.

Τα οπτικά μικροσκόπια συνήθως λειτουργούν χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές φωτισμού και απεικόνισης, οι οποίες προσαρμόζονται κάθε φορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παρατηρούμενου δείγματος. Μεταξύ αυτών των τεχνικών φωτισμού και απεικόνισης, η λειτουργία με φωτισμό φωτεινού πεδίου είναι η πλέον συνηθισμένη. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό φωτεινού πεδίου η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος, κατά μήκος του οπτικού άξονα του συστήματος, σε γεωμετρία είτε ανάκλασης είτε διάδοσης, οπότε ο

μηχανισμός απεικόνισης είναι η σκέδαση ή η απορρόφηση αντίστοιχα. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό σκοτεινού πεδίου η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος αφού το κεντρικό μέρος της αποκοπεί από κατάλληλο δίσκο αποκοπής. Με τον τρόπο αυτό, στον αντικειμενικό φακό εισέρχονται μόνο σκεδαζόμενες ακτίνες, και επομένως είναι ο κατάλληλος τρόπος λειτουργίας για την παρατήρηση δειγμάτων που παρουσιάζουν χαμηλή αντίθεση (contrast) σε ανάκλαση ή διάδοση αλλά έχουν λεπτομέρειες οι οποίες σκεδάζουν έντονα το φως. Άλλη τεχνική φωτισμού και απεικόνισης είναι η λειτουργία με χρήση πολωμένου φωτός, κατά την οποία δύο πολωτές, διασταυρωμένοι μεταξύ τους, παρεμβάλλονται, ο μὲν ένας μεταξύ πηγής και αντικειμένου ο δε άλλος μεταξύ αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την παρατήρηση διπλοθλαστικών ή φωτοελαστικών δειγμάτων, και είναι πολύ χρήσιμη για την παρατήρηση ανισότροπων σκοτεινών δειγμάτων, όταν μελετώνται κατανομές φάσεων, μέγεθος και προσανατολισμός κρυσταλλικών κόκκων, κρυσταλλικές διδυμίες κ.ά.

Το μικροσκόπιο μπορεί να συνδυαστεί με φωτογραφική μηχανή, για τη φωτογράφιση μεγεθυμένων εικόνων των αντικειμένων, εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε και για την παρούσα εργασία.

4.3.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Στη παρούσα μελέτη το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της μικροδομής ήταν τύπου JEOL JSM-6380 LV με συλλέκτη X-ray INCA x-sight από την OXFORD. Το μικροσκόπιο JEOL είναι ένα μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης υψηλής απόδοσης, χαμηλού κόστους, με υψηλή ανάλυση μέχρι και 3,0 nm αφού το σύστημα έχει ονομαστική μεγέθυνση από 10 μέχρι 300.000 φορές για την μορφολογική παρατήρηση των δοκιμίων. Ο θάλαμος λειτουργεί υπό χαμηλό κενό της τάξης 10^{-6} torr και επιτρέπει την παρατήρηση δειγμάτων που δεν μπορούν να προβληθούν σε υψηλό κενό λόγω υπερβολικής περιεκτικότητας σε νερό ή λόγω μη αγωγίμης επιφάνειας. Οι τυπικές αυτοματοποιημένες λειτουργίες περιλαμβάνουν αυτόματη εστίαση, αυτόματο όπλο (για κορεσμό και ευθυγράμμιση) και αυτόματη αντίθεση και φωτεινότητα.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για την εξέταση δοκιμίων. Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλοεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X.

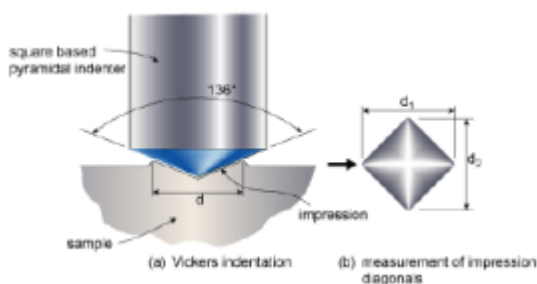
Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια προκύπτουν από τη σύγκρουση των ηλεκτρονίων της δέσμης με εκείνα του ατόμου. Είναι χαμηλής ενέργειας, εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος και είναι χρήσιμα για την απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος.

Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι αυτά που συγκρούονται ελαστικά με τον πυρήνα του ατόμου (ειδικά σε μεγάλα άτομα) και σκεδάζονται προς τα πίσω με γωνία 180° , έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος από το δείγμα. Ανάλογα με τον ατομικό αριθμό του ατόμου του δείγματος αλλάζει και το ποσοστό των οπισθοσκεδαζόμενων (backscattered) ηλεκτρονίων, άρα και η εικόνα που παίρνουμε. Έτσι, έχουμε πληροφορίες για τη σύσταση του δοκιμίου.

4.4 Μέθοδοι μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων

4.4.1 Δοκιμές Σκληρότητας

Οι μηχανικές δοκιμές, στις οποίες υπόκειται ένα υλικό, είναι μείζονος σημασίας για τους χάλυβες που μελετήθηκαν αφού αναπαριστούν καταπονήσεις στις οποίες υπόκεινται το υλικό στην πραγματικότητα, δίνοντάς μας πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την αντοχή του υλικού. Μας δίνουν έτσι τη δυνατότητα, σε συνδυασμό με τη χρήση των παραπάνω τεχνικών παρατήρησης και επεξεργασίας, βελτίωσης των χάλυβων.



Εικόνα 4.5: Προσομοίωση δοκιμής σκληρομέτρησης Vickers

Οι σκληρομετρήσεις των δοκιμίων – αναφοράς και θερμικά κατεργασμένων πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια πάχους 2 mm και μήκους, πλάτους 2x2 cm, αφού έγινε πρώτα λείανση των δοκιμίων με χαρτί μέχρι 2000grid. Πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή σκληρομέτρησης τύπου Vickers. Στα δοκίμια που εξετάστηκαν εφαρμόστηκε φορτίο 196N ή 20kg (HV20). Μετά την επιβολή του φορτίου

δημιουργήθηκε πάνω στα δοκίμια αποτύπωμα ρομβοειδούς διατομής, από τη διείδυση της πυραμίδας γωνίας 136° , από τη μέτρηση του μήκους των διαγώνιων του ρόμβου και με τη χρήση κατάλληλων πινάκων προκύπτει η τιμή της σκληρότητας του κάθε δοκιμίου.

Πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή σκληρομέτρησης τύπου Vickers. Στα δοκίμια που εξετάστηκαν εφαρμόστηκε φορτίο 196N ή 20kg (HV20). Μετά την επιβολή του φορτίου δημιουργήθηκε πάνω στα δοκίμια αποτύπωμα ρομβοειδούς διατομής, από τη διείδυση της πυραμίδας γωνίας 136° , από τη μέτρηση του μήκους των διαγώνιων του ρόμβου και με τη χρήση κατάλληλων πινάκων προκύπτει η τιμή της σκληρότητας του κάθε δοκιμίου.

Πραγματοποιήθηκαν δέκα μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο, με στόχο τη μείωση του σφάλματος μέτρησης, ενώ χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια από κάθε θερμική κατεργασία και κάθε χρόνο παραμονής για τον παραπάνω σκοπό. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο κέντρο του δοκιμίου για να αποφευχθεί η αλλοίωση των αποτελεσμάτων λόγω ενδεχόμενης απανθράκωσης στα άκρα του δοκιμίου. Δόθηκε βέβαια προσοχή στην ασφαλή απόσταση των αποτυπωμάτων της τάξεως των $3d$, όπου d η διάμετρος του αποτυπώματος, για να μην έχουμε σφάλμα στις μετρήσεις.



Εικόνα 4.6: Μηχανή σκληρομέτρησης της σχολής MMM

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

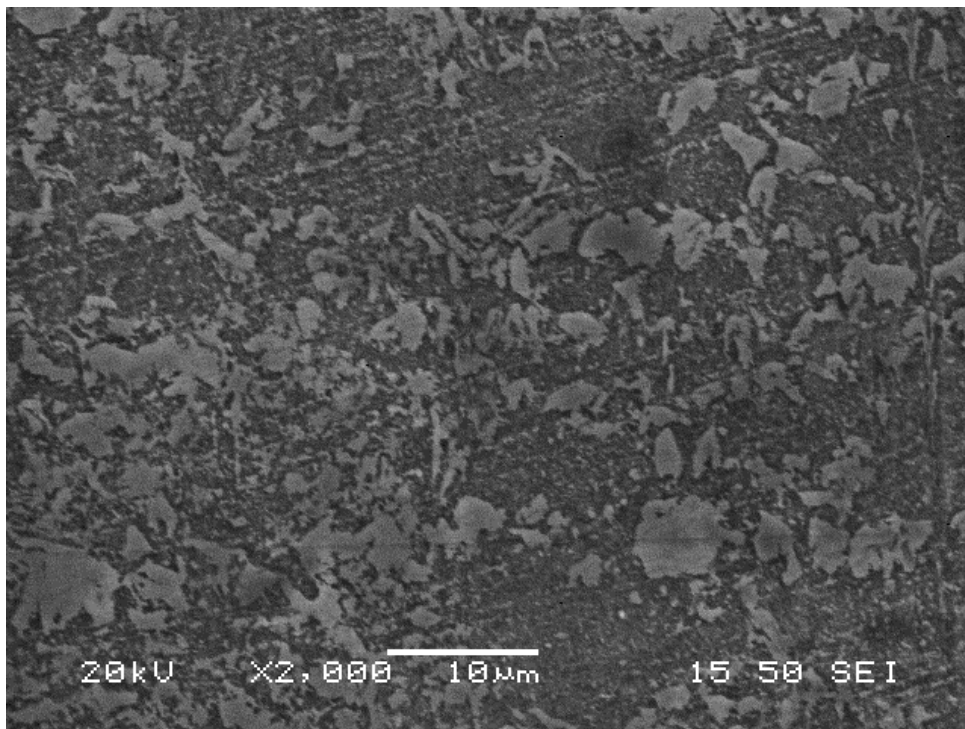
5.1 Εξέταση της μικροδομής

Εξέταση της μικροδομής των δοκιμίων αναφοράς των χαλύβων DP600 πραγματοποιήθηκε με μεθόδους οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Στις παρακάτω μικρογραφίες παρουσιάζεται η εξέταση της μικροδομής των δοκιμίων αναφοράς με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

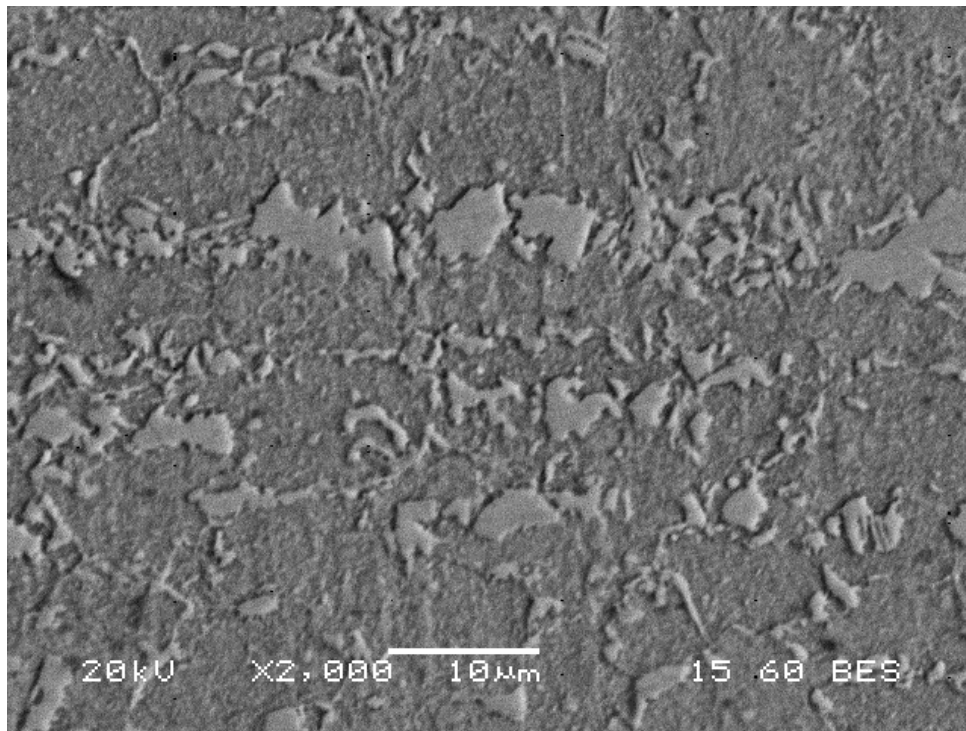
5.2 Παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μπορούμε να παρατηρήσουμε το πολυγωνικό σχήμα του μαρτενσίτη. Η φάση του μαρτενσίτη παρουσιάζεται στις μικρογραφίες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Οι νησίδες του μαρτενσίτη φαίνονται σε υψηλότερο επίπεδο από την φάση του φερρίτη, εξαιτίας της αντίστασης του μαρτενσίτη στο αντιδραστήριο Nital 2% κατά την χημική προσβολή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μικρογραφίες για όλες τις θερμοκρασίες και χρόνους που έγινε η θερμική κατεργασία ανόπτησης και βαφής σε νερό:

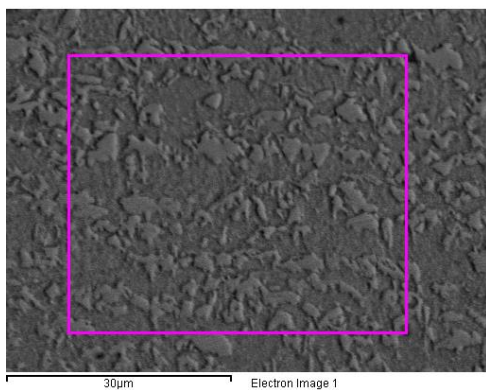
Αρχικό Δοκίμιο



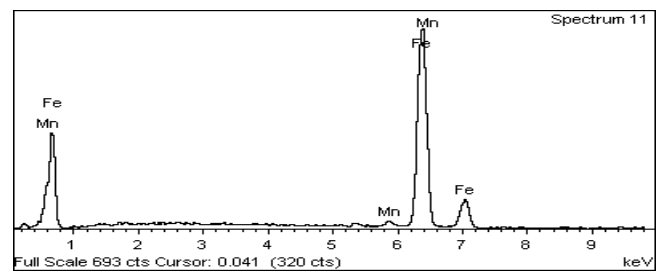
Εικόνα 5.1: Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, SEI x2000, σε κατάσταση αναφοράς



Εικόνα 5.2: Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς

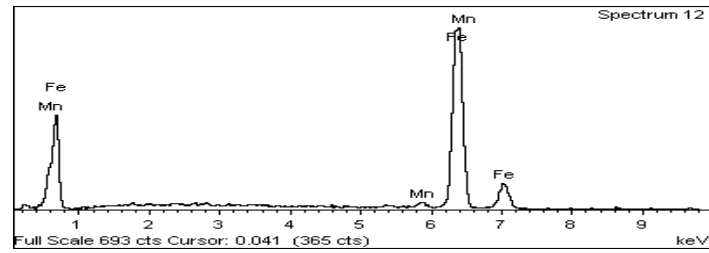
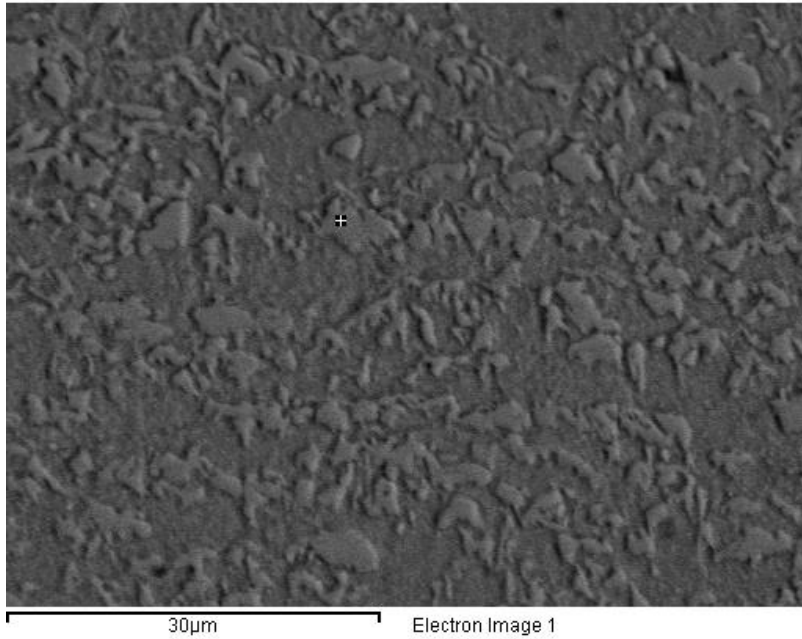


Εικόνα 5.3 : Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς



Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.16	2.19
Fe K	97.84	97.81
Totals	100.00	

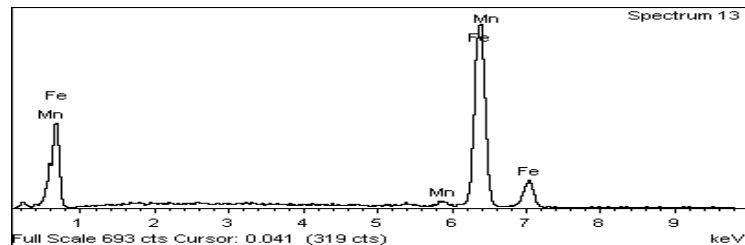
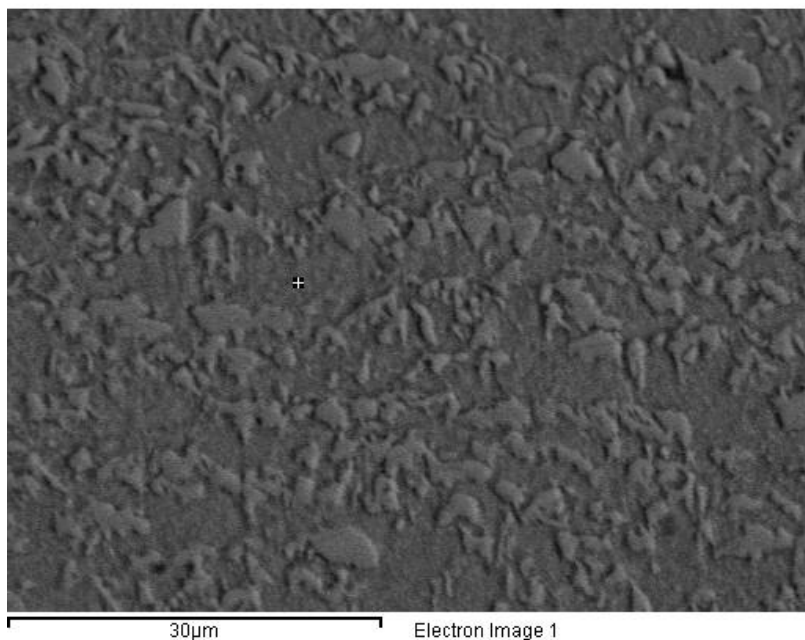
Πίνακας 5.1 : Χημική ανάλυση ολόκληρης της επιφάνειας του δοκιμίου αναφοράς.



Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.41	2.45
Fe K	97.59	97.55
Totals	100.00	

Πίνακας 5.2: Σημειακή χημική ανάλυση στην περιοχή του μαρτενσίτη (στο σημείο του σταυρού) στο δοκίμιο αναφοράς.

Εικόνα 5.4: Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς



Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.08	2.12
Fe K	97.92	97.88
Totals	100.00	

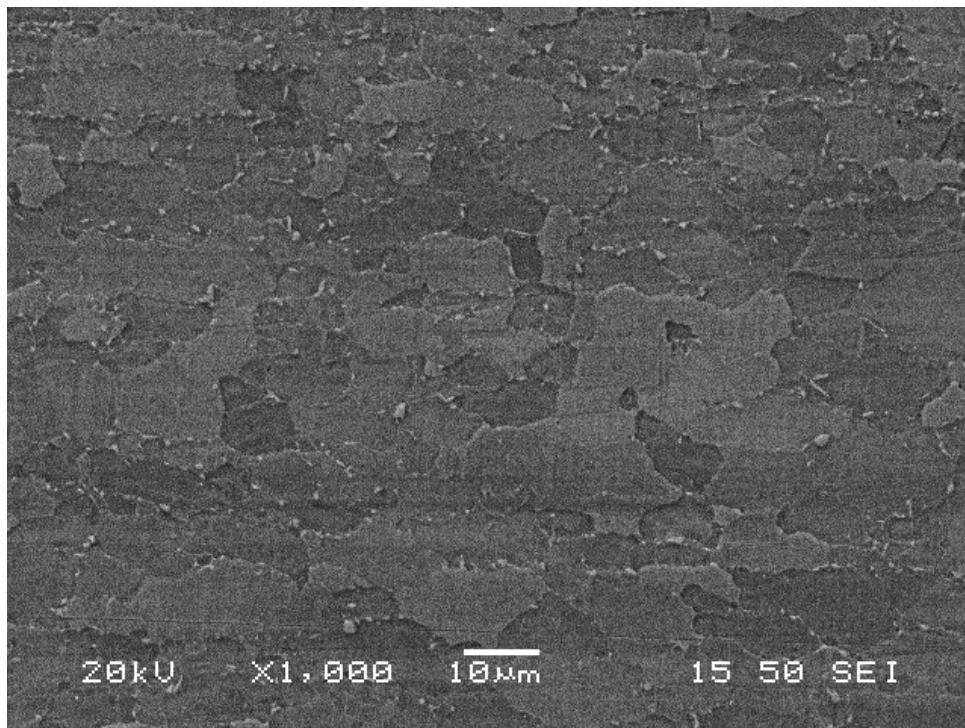
Πίνακας 5.3 : Σημειακή χημική ανάλυση στην περιοχή του φερρίτη (στο σημείο του σταυρού) στο δοκίμιο αναφοράς.

Εικόνα 5.5: Μικρογραφία από το SEM του χάλυβα DP600, BES x2000, σε κατάσταση αναφοράς

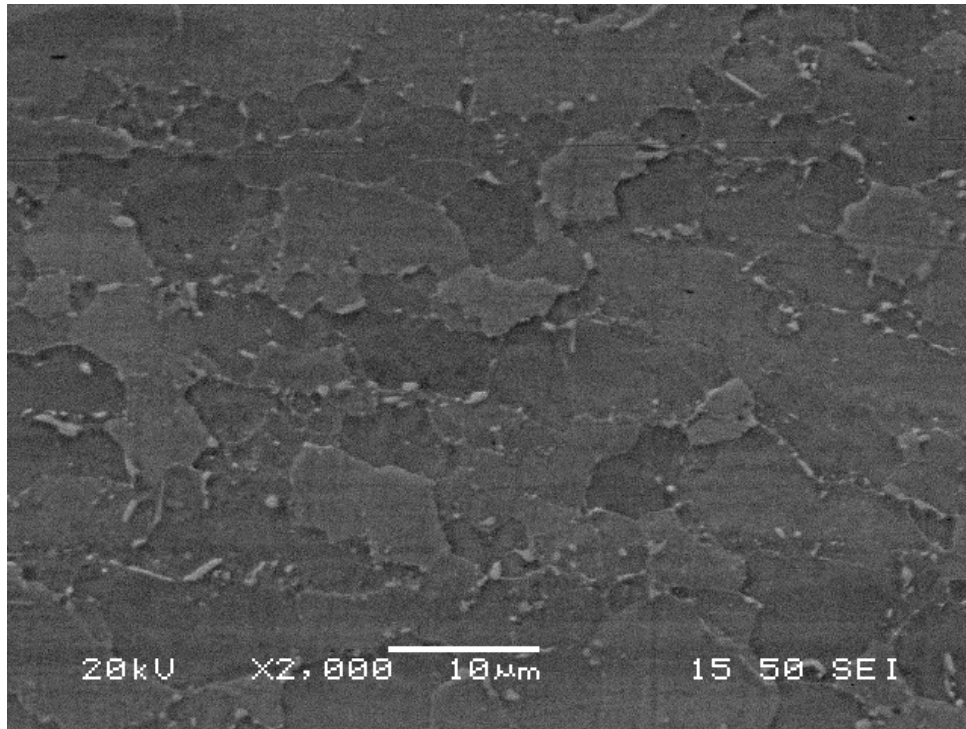
5.2.1 Θερμοκρασία 750°C

Δοκίμιο 750°C/2min

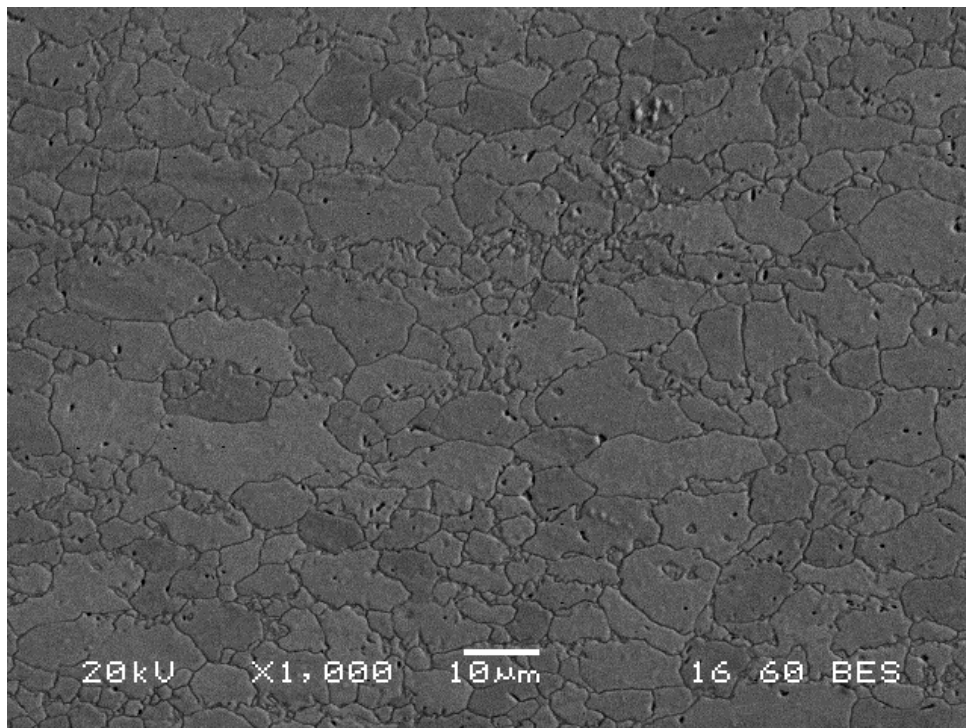
Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Διακρίνεται λεπτόκοκκο υλικό, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 15-20μm και την διεύθυνση της έλασης να μην γίνεται διακριτή. Στην μικροδομή παρατηρούμε με την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό της φερριτικής μήτρας. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 750°C/2min, το υλικό αποτελείται από 97,85% σίδηρο (Fe) και 2,75% μαγγάνιο (Mn). Όπως αναφέραμε και στο βιβλιογραφικό μέρος η προσθήκη μαγγανίου στους διφασικούς χάλυβες βοηθά στη μείωση της ταχύτητας απόψυξης για το σχηματισμό του μαρτενσίτη, είναι ευεργετικό όσον αφορά στην εκλέπτυνση των κόκκων. Επιπροσθέτως αυξάνει την εμβαπτότητα του μαρτενσίτη, ενώ μειώνει την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 .



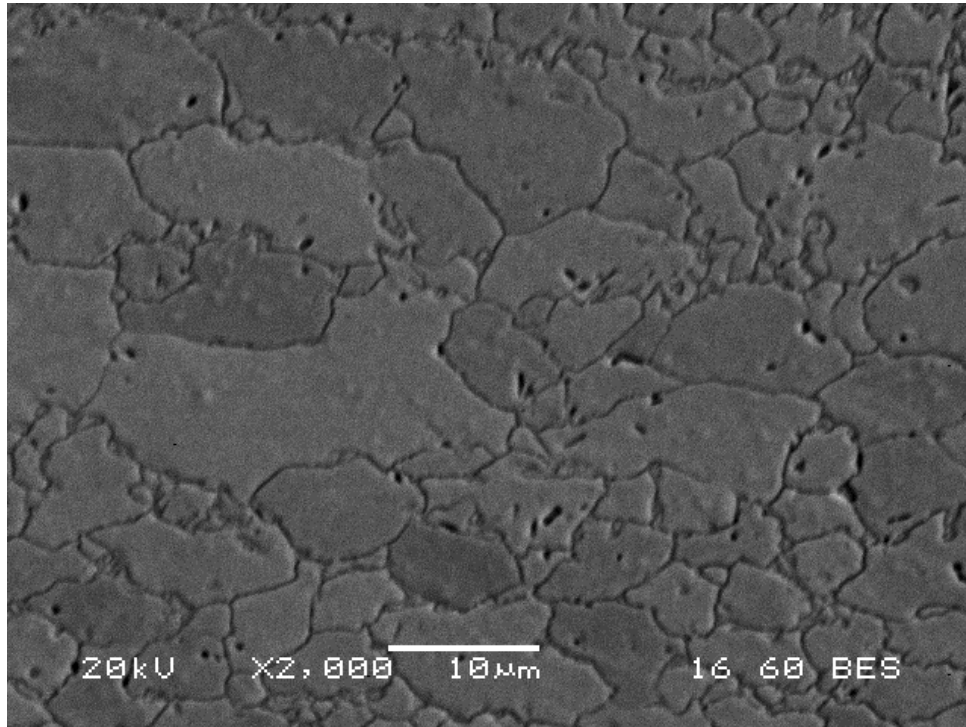
Εικόνα 5.6: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση X1000



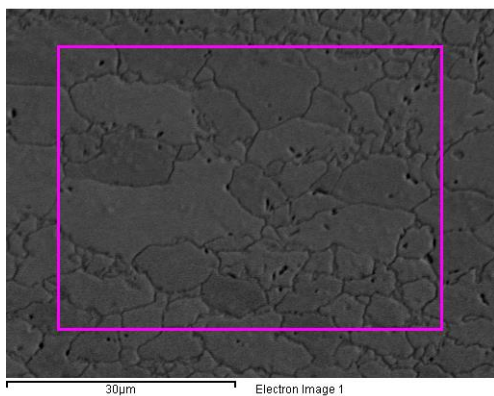
Εικόνα 5.7: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.8: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.9: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 2min με μεγέθυνση X2000



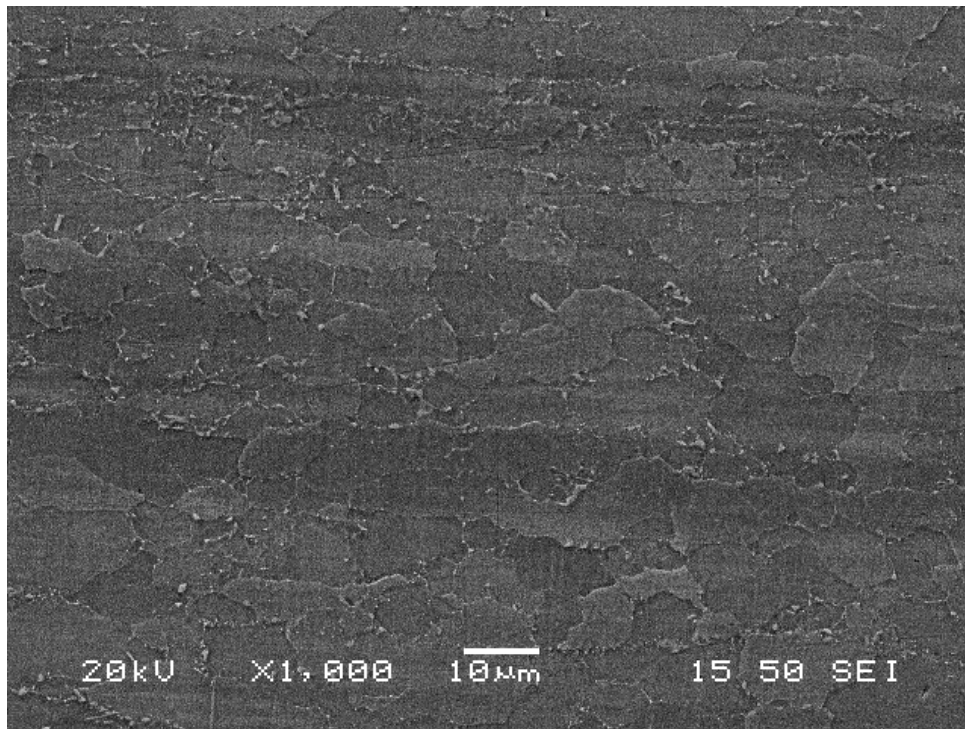
Εικόνα 5.10: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/2min

Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.15	2.18
Fe K	97.85	97.82
Totals	100.00	

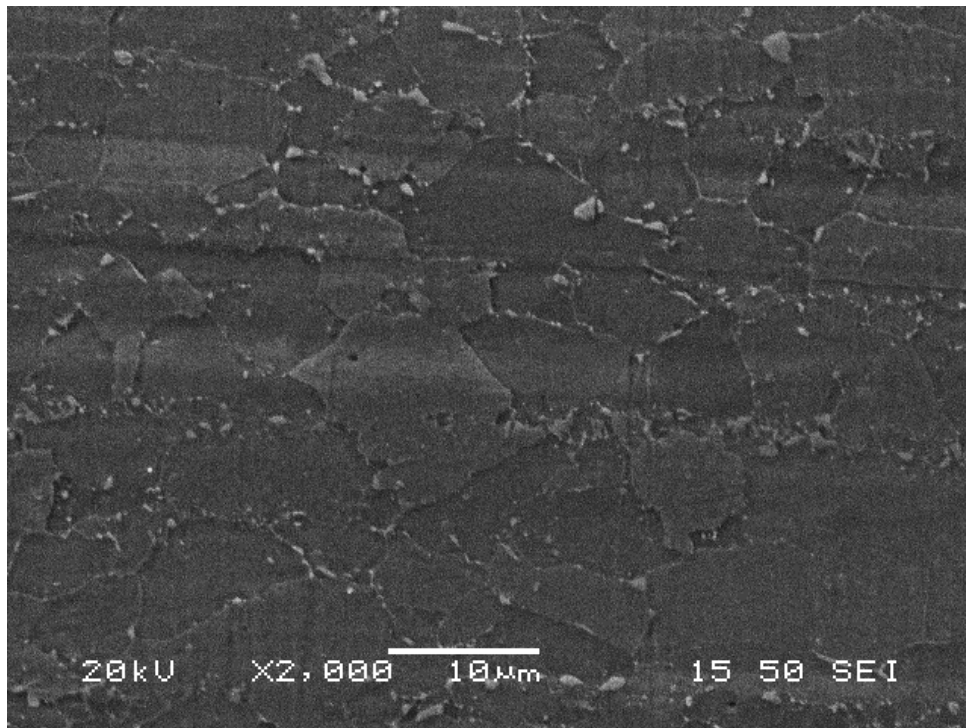
Πίνακας 5.4: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/2min

Δοκίμιο 750°C/5min

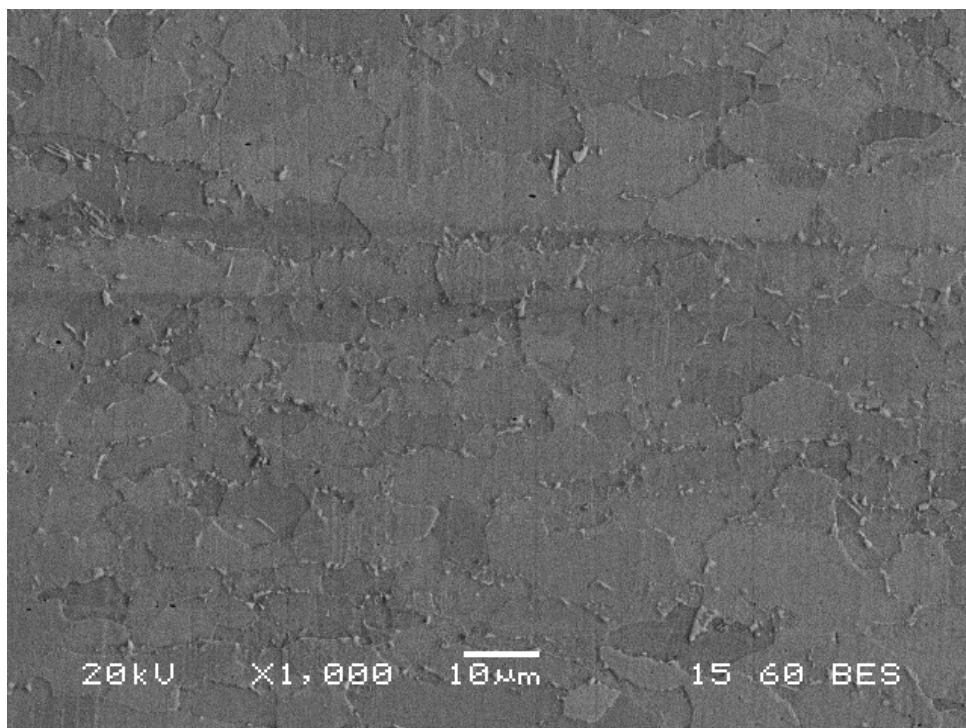
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Διακρίνεται λεπτόκοκκο υλικό, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 15-20μm, όπου δεν καθίσταται σαφώς η διεύθυνση της έλασης. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 750°C/5min, το υλικό αποτελείται από 98,12% σίδηρο (Fe) και 1,88% μαγγάνιο (Mn).



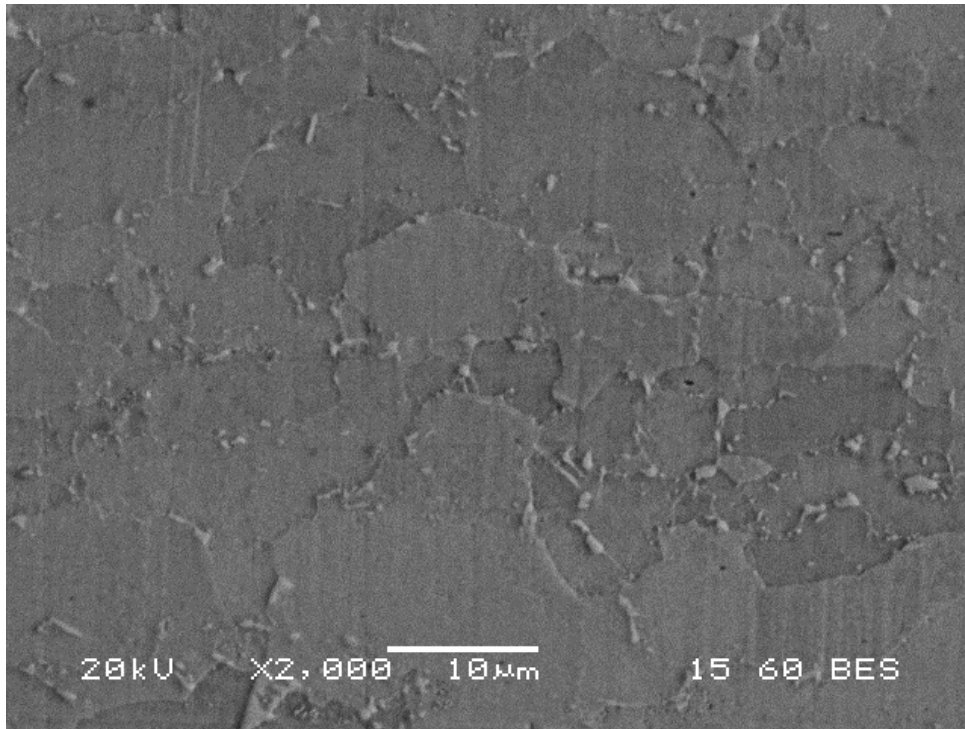
Εικόνα 5.11: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση X1000



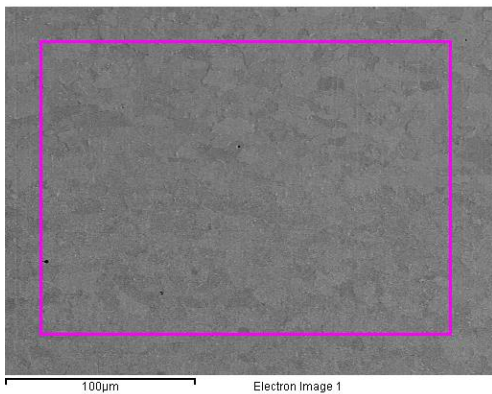
Εικόνα 5.12: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.13: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.14: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 5min με μεγέθυνση X2000



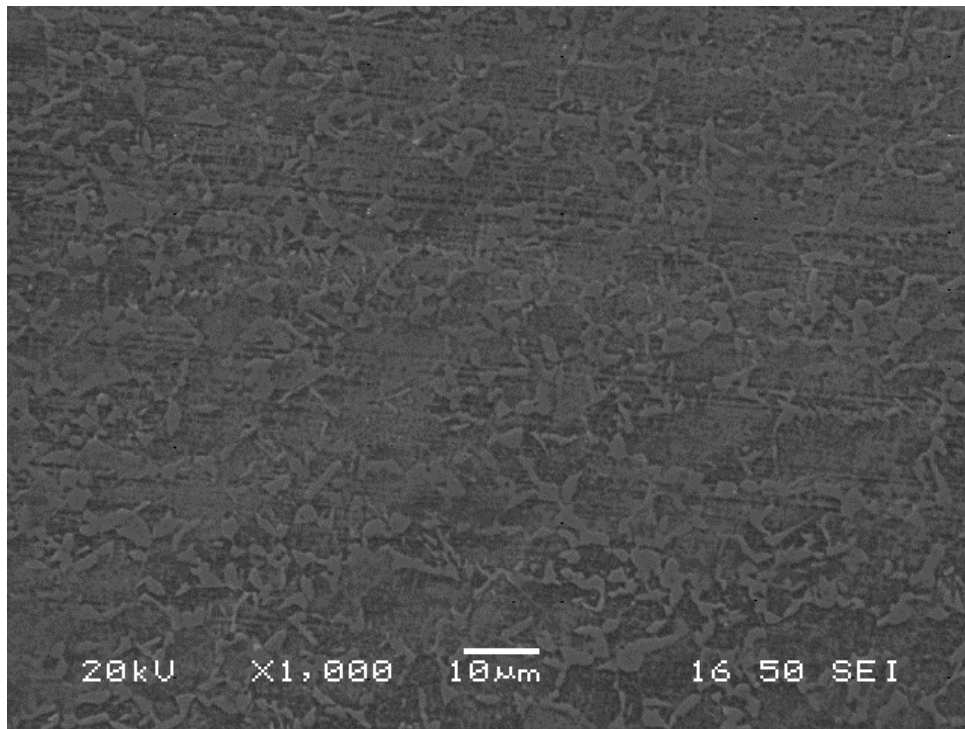
Εικόνα 5.15: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/5min

Element	Weight%	Atomic%
Mn K	1.88	1.91
Fe K	98.12	98.09
Totals	100.00	

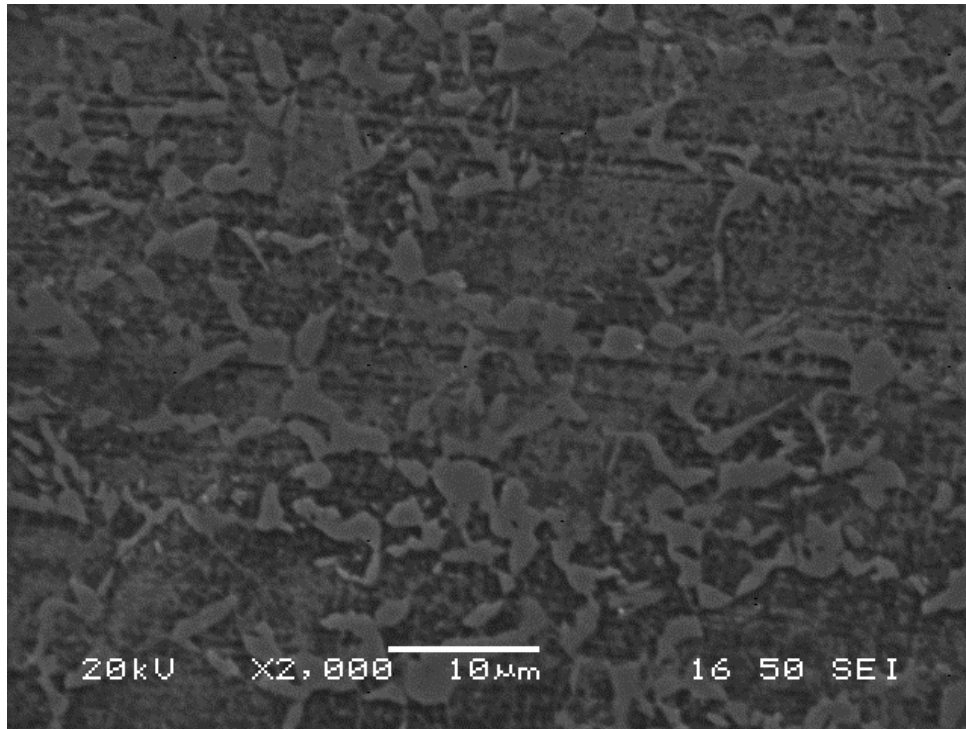
Πίνακας 5.5: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/5min

Δοκίμιο 750°C/30min

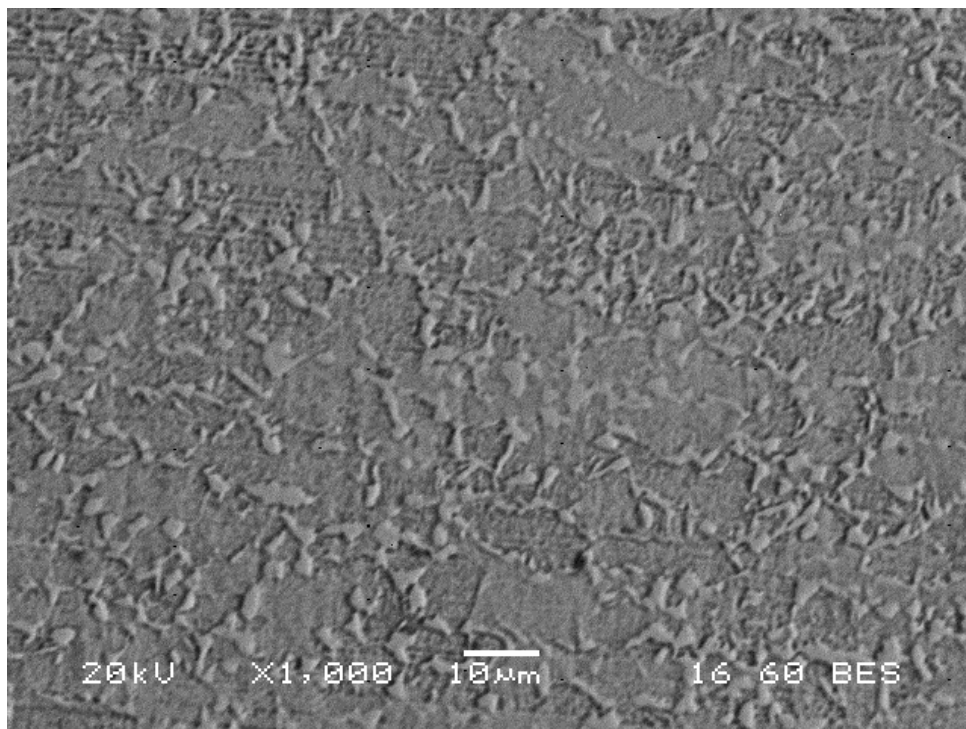
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 750°C/30min, το υλικό αποτελείται από 98,13% σίδηρο (Fe) και 1,87% μαγγάνιο (Mn).



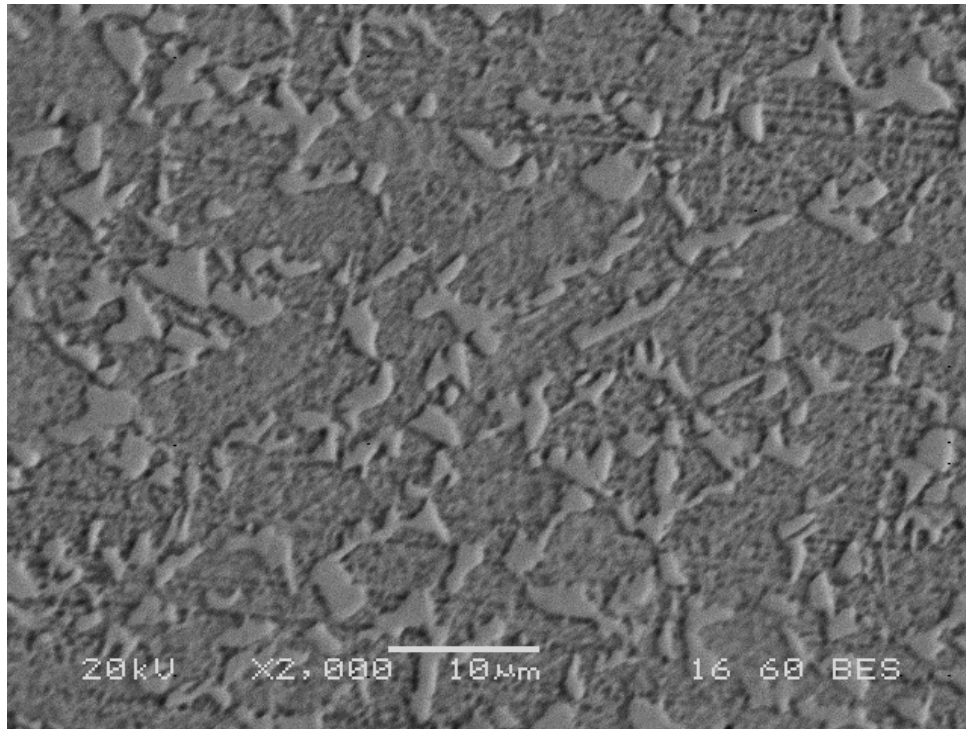
Εικόνα 5.16: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση X1000



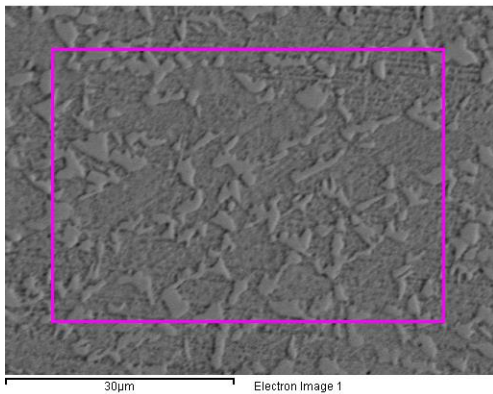
Εικόνα 5.17: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.18: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.19: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 750°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.20: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/30min

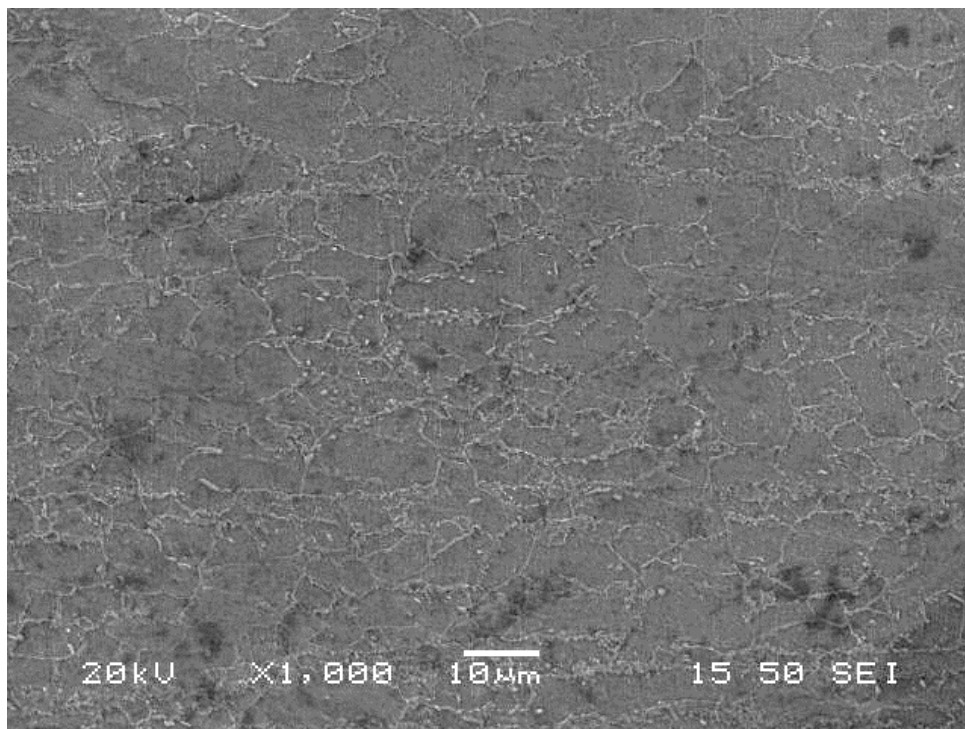
Element	Weight%	Atomic%
Mn K	1.87	1.90
Fe K	98.13	98.10
Totals	100.00	

Πίνακας 5.6: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 750°C/30min

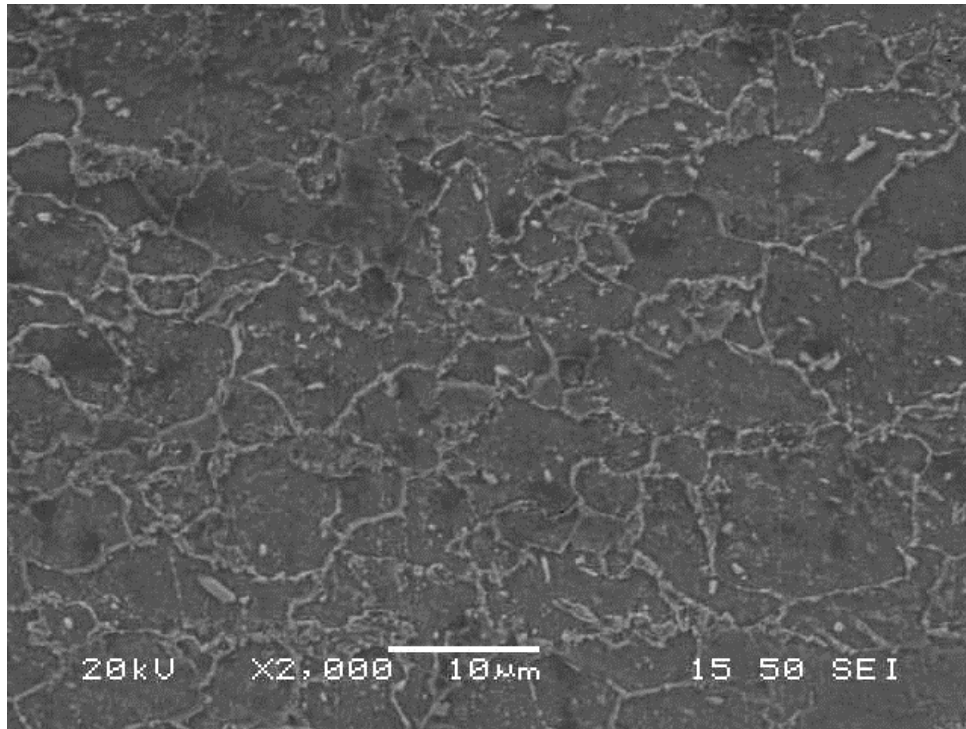
5.2.2 Θερμοκρασία 775°C

Δοκίμιο 775°C/2min

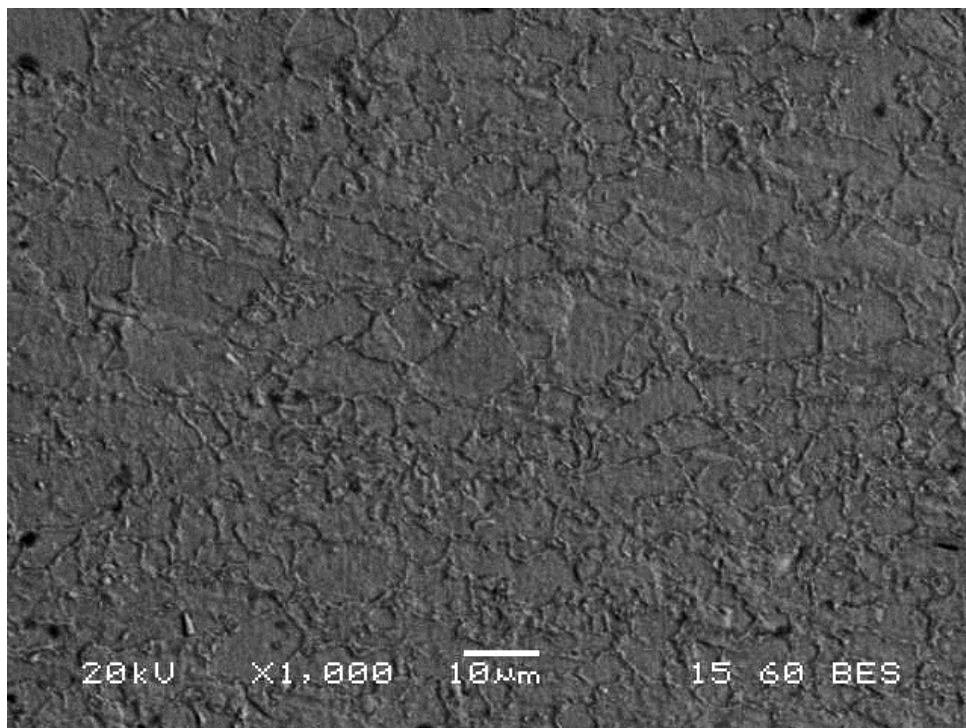
Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Διακρίνεται λεπτόκοκκο υλικό, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 15-20μm και την διεύθυνση της έλασης να μην γίνεται διακριτή. Στην μικροδομή παρατηρούμε με την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό της φερριτικής μήτρας. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 775°C/2min, το υλικό αποτελείται από 97,91% σίδηρο (Fe), 1,56% μαγγάνιο (Mn) και 0,52% πυρίτιο(Si). Όπως αναφέραμε και στο βιβλιογραφικό μέρος η προσθήκη μαγγανίου(Mn) στους διφασικούς χάλυβες βοηθά στη μείωση της ταχύτητας απόψυξης για το σχηματισμό του μαρτενσίτη, είναι ευεργετικό όσον αφορά στην εκλέπτυνση των κόκκων. Επιπροσθέτως αυξάνει την εμβαπτότητα του μαρτενσίτη, ενώ μειώνει την κρίσιμη θερμοκρασία A_3 . Επιπλέον όπως αναφέραμε η προσθήκη πυριτίου(Si) οδηγεί σε υψηλή αντοχή κατά την κόπωση και συνεισφέρει στην βελτίωση της ολκιμότητας ως προς δεδομένη αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης το Si προστίθεται για τη σκλήρυνση μέσω του σχηματισμού στερεού διαλύματος.



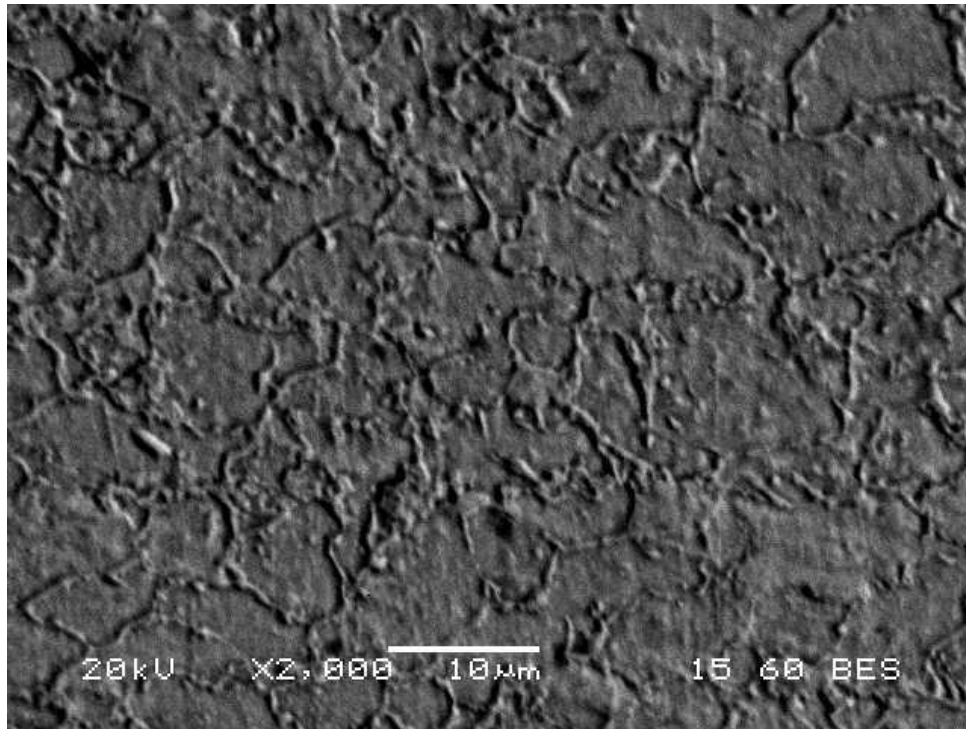
Εικόνα 5.21: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση X1000



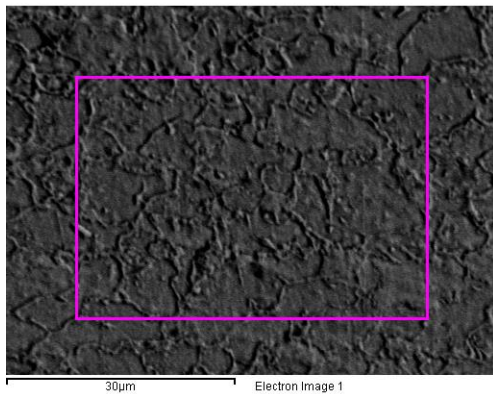
Εικόνα 5.22: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.23: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.24: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 2min με μεγέθυνση X2000



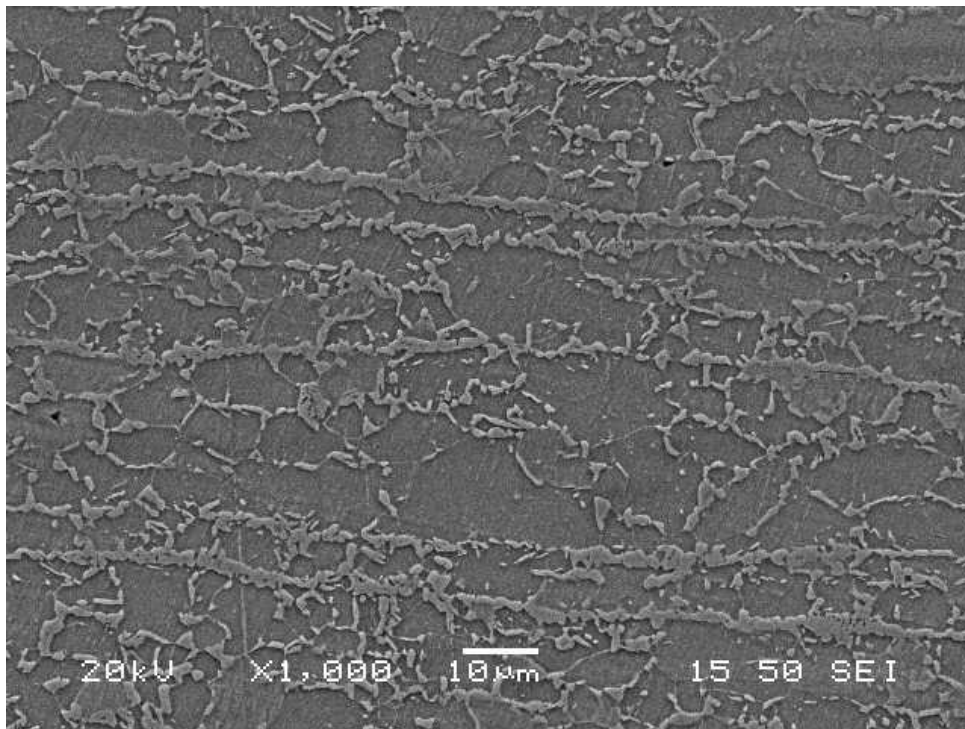
Εικόνα 5.25: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/2min

Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.52	1.03
Mn K	1.56	1.58
Fe K	97.91	97.39
Totals	100.00	

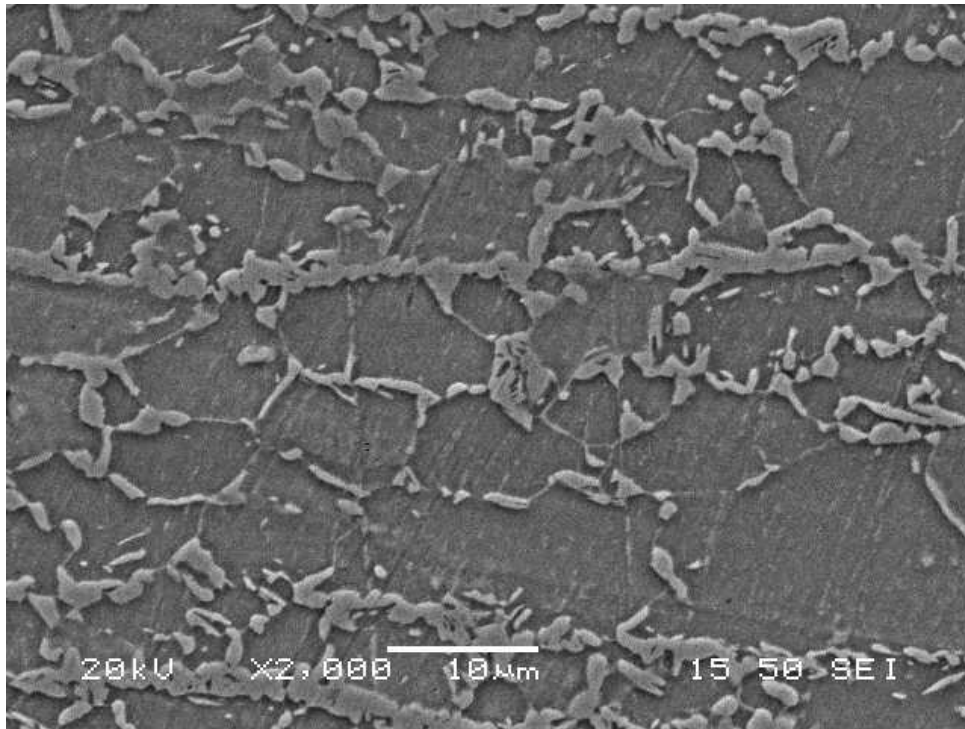
Πίνακας 5.7: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/2min

Δοκίμιο 775°C/5min

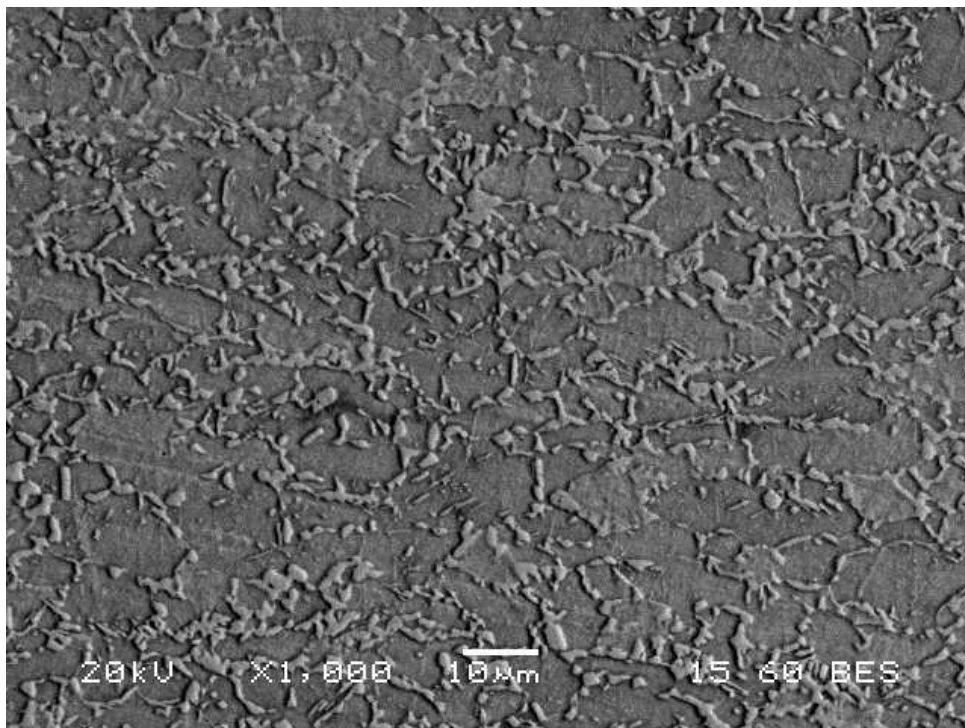
Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Διακρίνεται λεπτόκοκκο υλικό, με μέγεθος κόκκου περίπου της τάξεως των 15-20 μm και την διεύθυνση της έλασης να μην γίνεται διακριτή. Στην μικροδομή παρατηρούμε με την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό της φερριτικής μήτρας. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 775°C/5min, το υλικό αποτελείται από 97,25% σίδηρο (Fe), 1,79% μαγγάνιο (Mn) και 0,97% χρώμιο(Cr). Σε αυτό το δοκίμιο έχουμε ύπαρξη χρωμίου. Όπως αναφέραμε και στο βιβλιογραφικό μέρος το χρώμιο χρησιμοποιείται στους διφασικούς χάλυβες για τη μετακίνηση της καμπύλης TTT προς τα δεξιά, μειώνοντας το ρυθμό απόψυξης, που έχει θετική επίδραση στη μετατροπή του οστενίτη σε μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του υλικού.



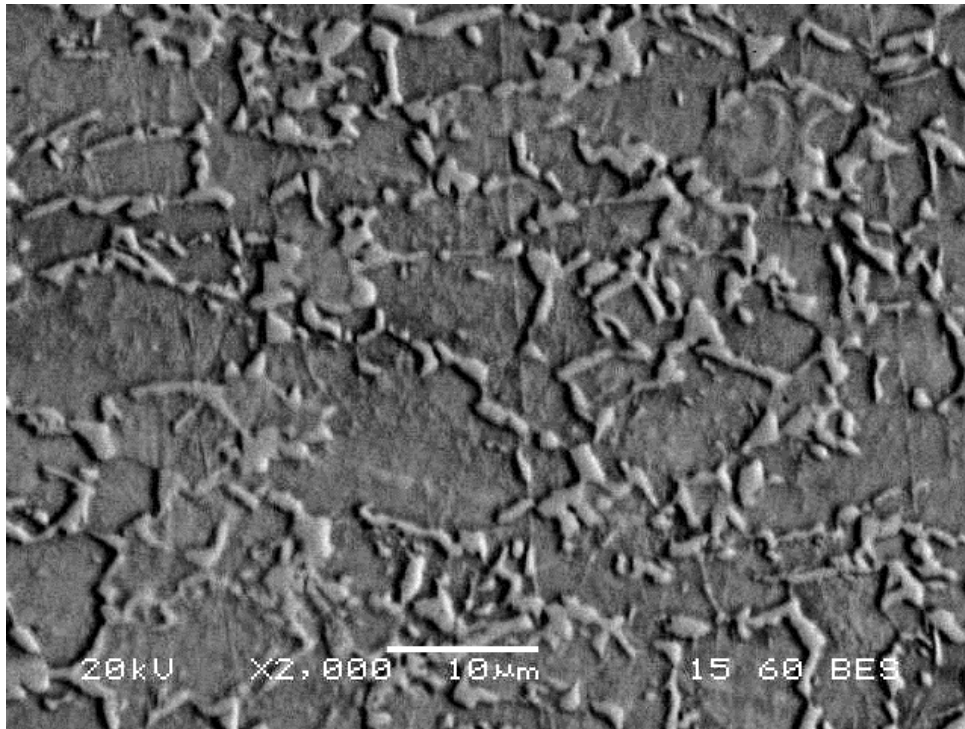
Εικόνα 5.26: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση X1000



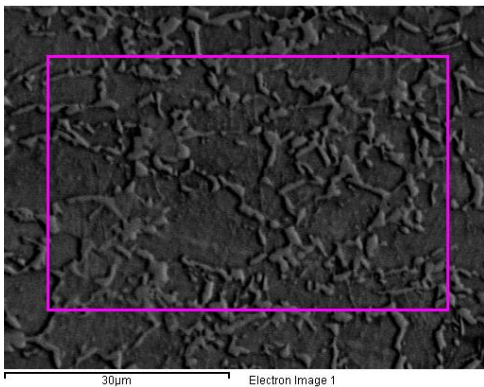
Εικόνα 5.27: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.28: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.29: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 5min με μεγέθυνση X2000



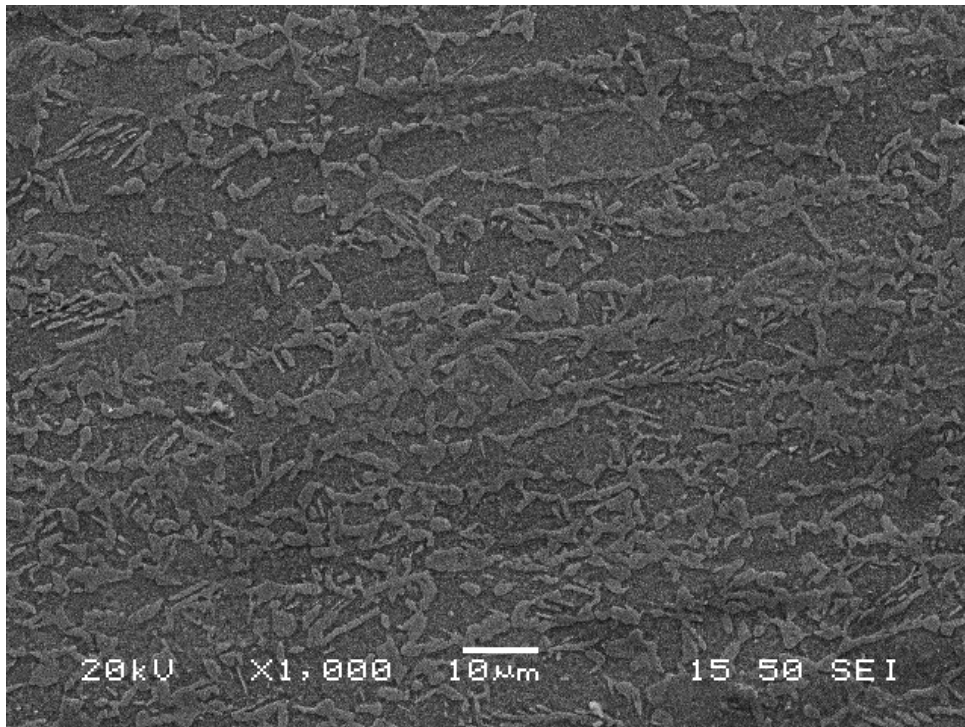
Εικόνα 5.30: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/5min

Element	Weight%	Atomic%
Cr K	0.97	1.04
Mn K	1.79	1.81
Fe K	97.25	97.15
Totals	100.00	

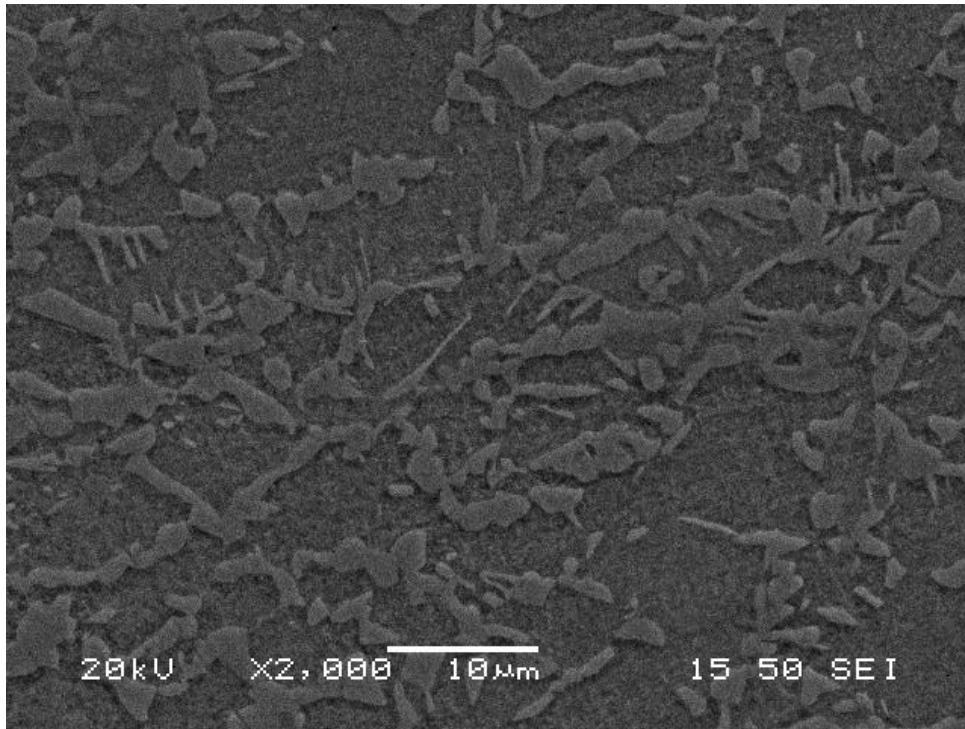
Πίνακας 5.8: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/5min

Δοκίμιο 775°C/30min

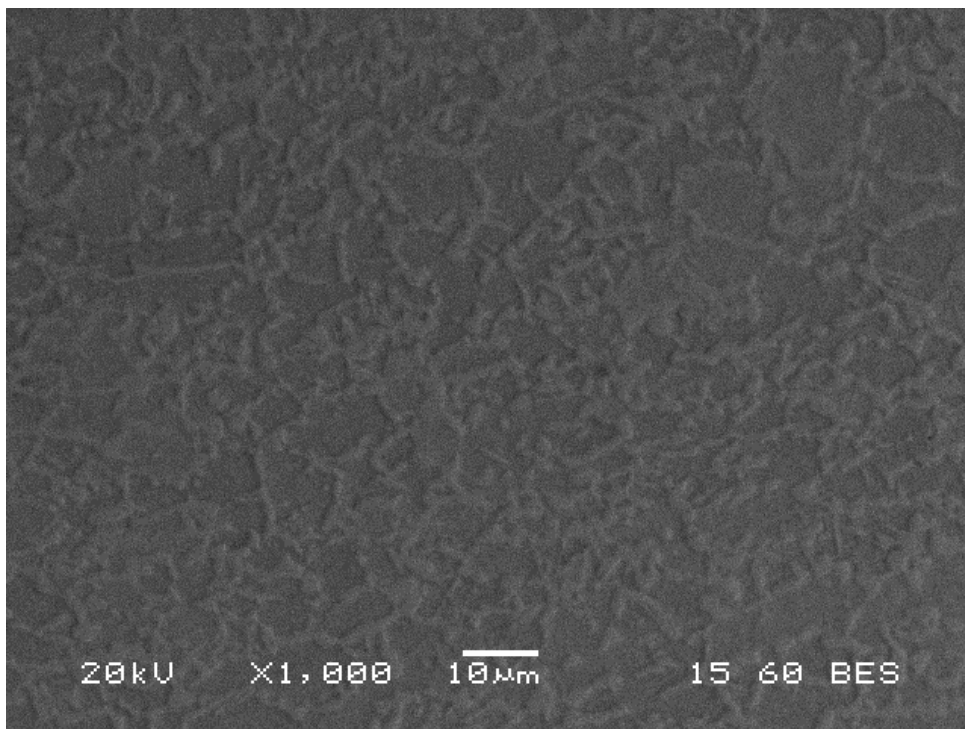
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 775°C/30min, το υλικό αποτελείται από 98,30% σίδηρο (Fe) και 1,70% μαγγάνιο (Mn).



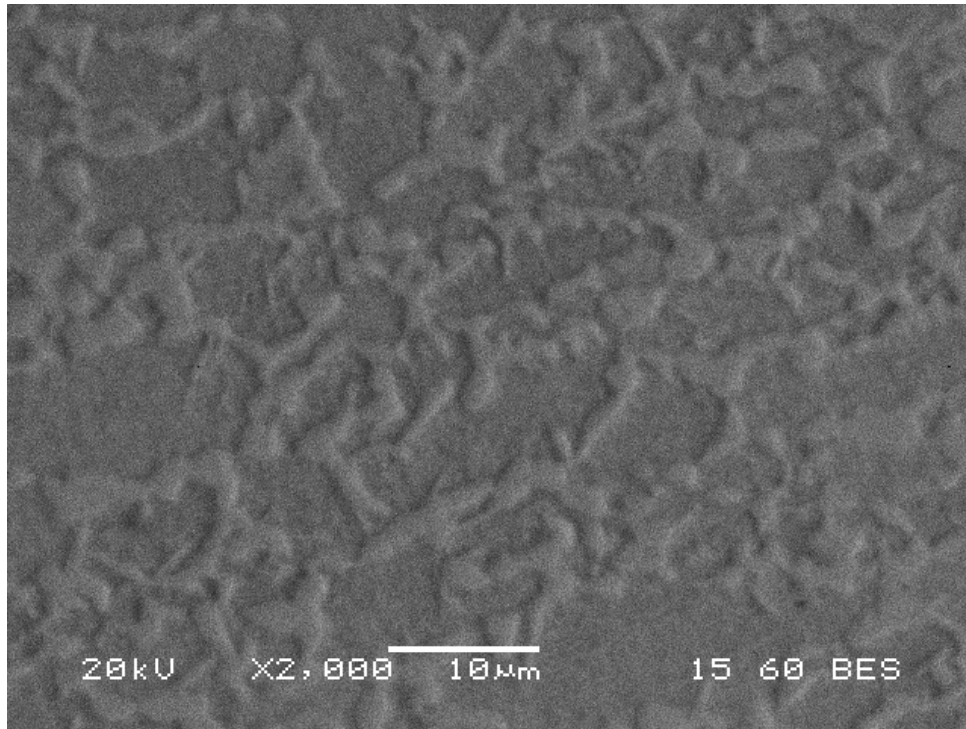
Εικόνα 5.31: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση X1000



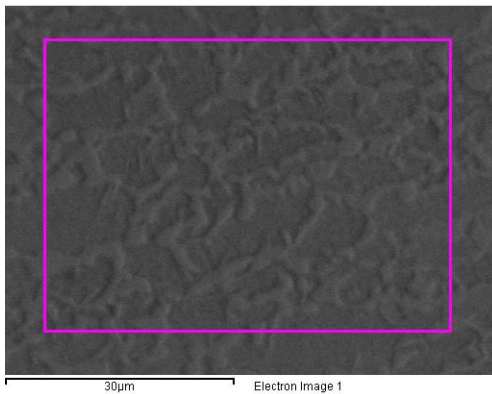
Εικόνα 5.32: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.33: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.34: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.35: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/30min

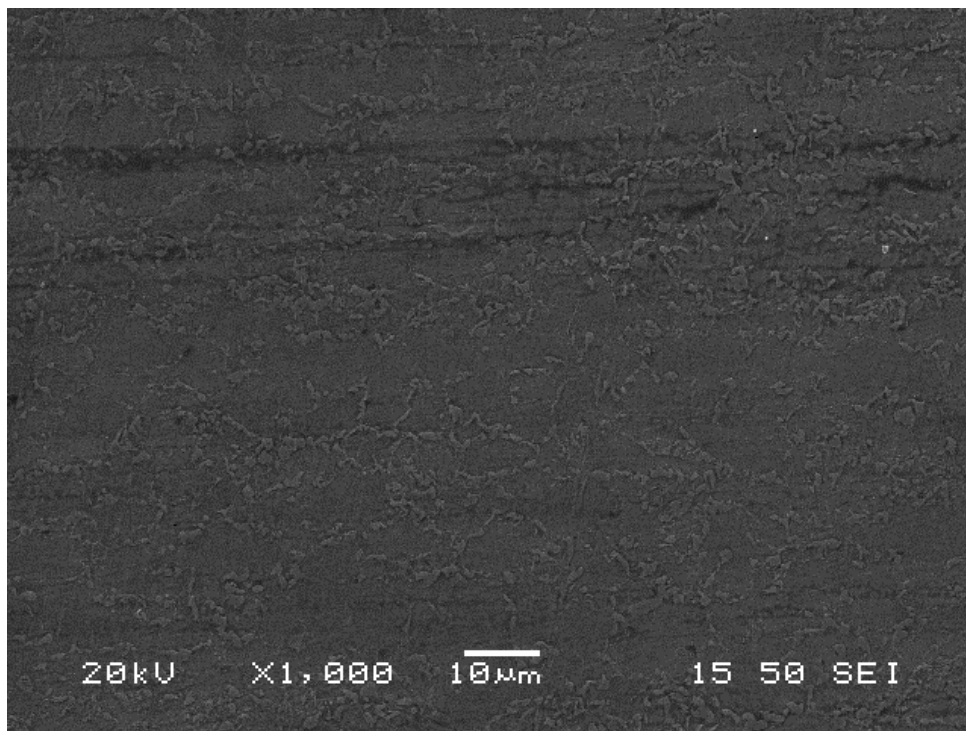
Element	Weight%	Atomic%
Mn K	1.70	1.73
Fe K	98.30	98.27
Totals	100.00	

Πίνακας 5.9: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 775°C/30min

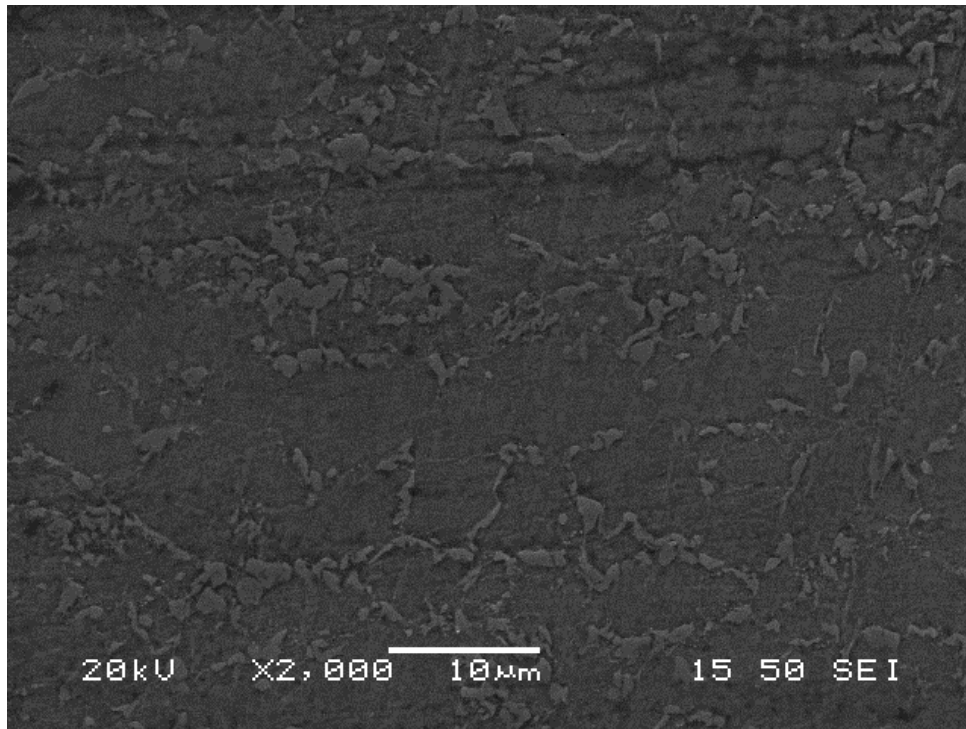
5.2.3 Θερμοκρασία 800°C

Δοκίμιο 800°C/2min

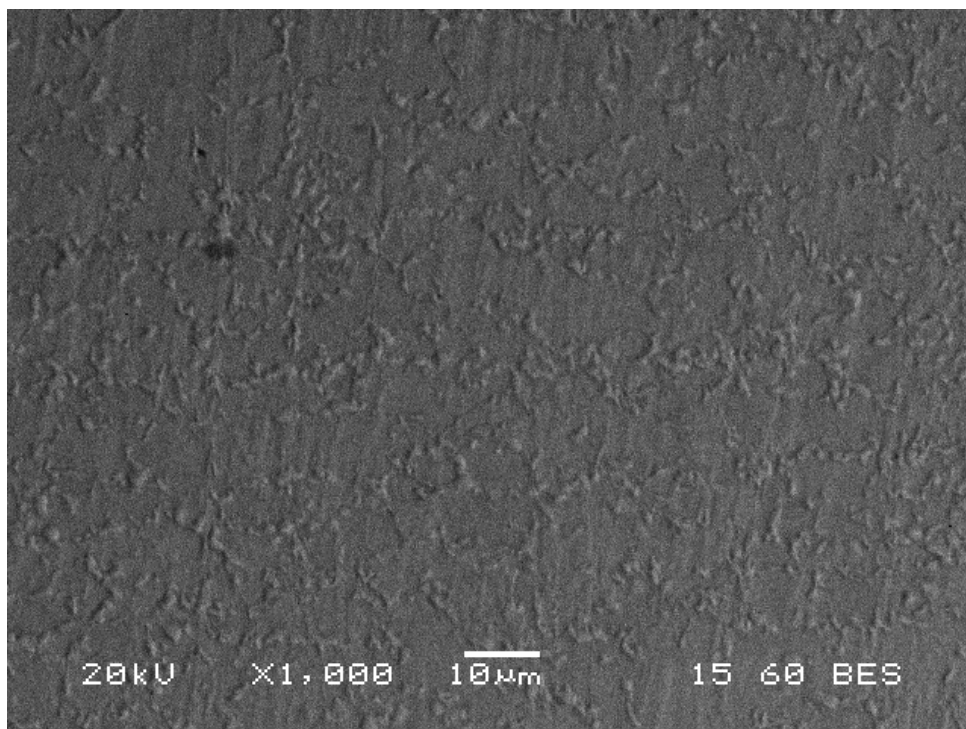
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη, ο οποίος κυριαρχεί στην μικροδομή του υλικού, και του μαρτενσίτη. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 800°C/2min, το υλικό αποτελείται από 98,36% σίδηρο (Fe) και 1,64% μαγγάνιο (Mn).



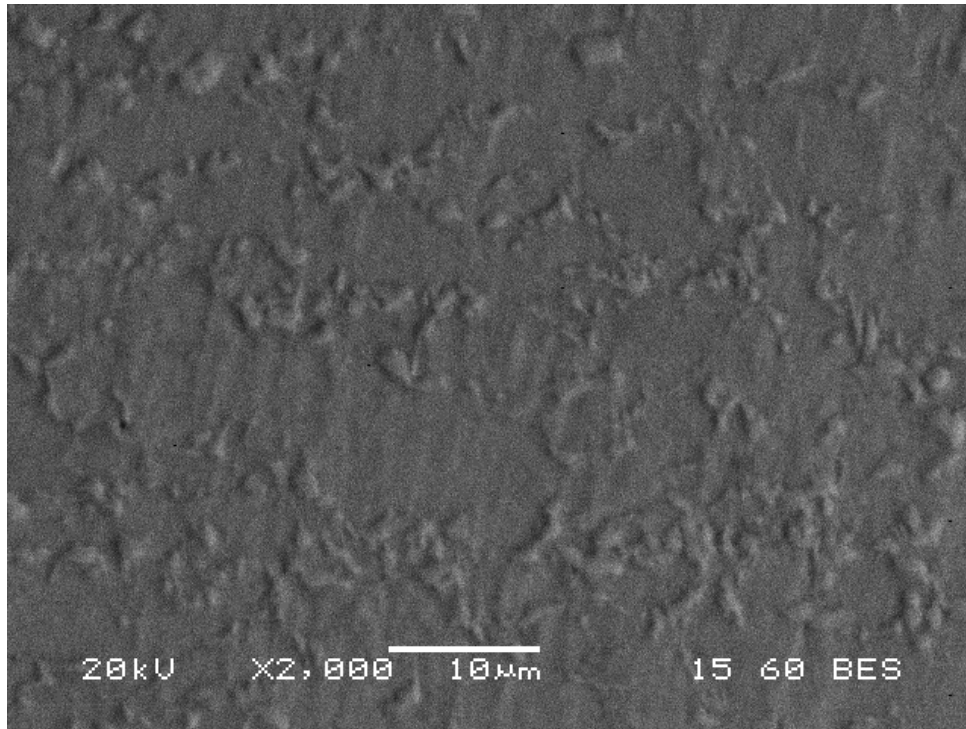
Εικόνα 5.36: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση X1000



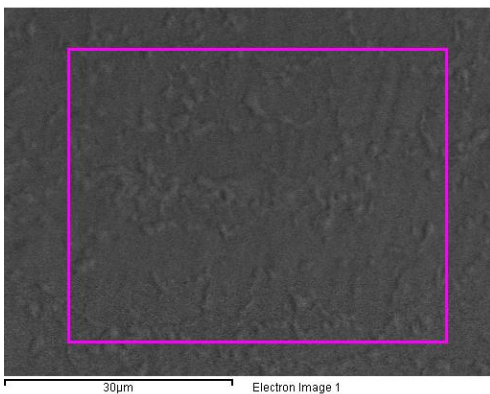
Εικόνα 5.37: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.38: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.39: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 2min με μεγέθυνση X2000



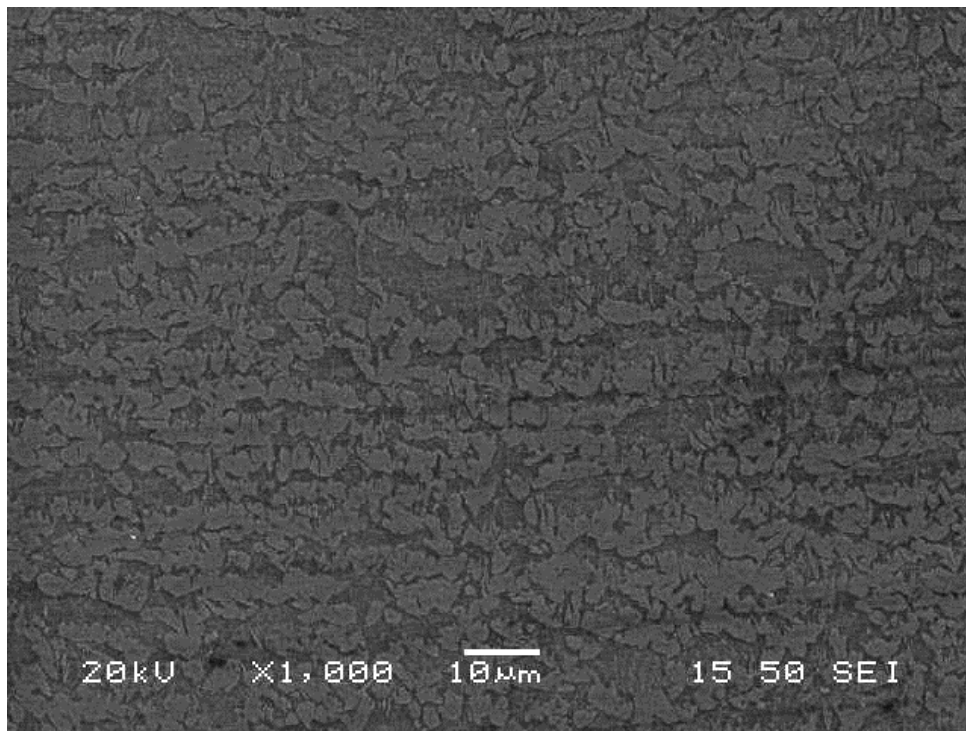
Εικόνα 5.40: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/2min

Element	Weight%	Atomic%
Mn K	1.64	1.67
Fe K	98.36	98.33
Totals	100.00	

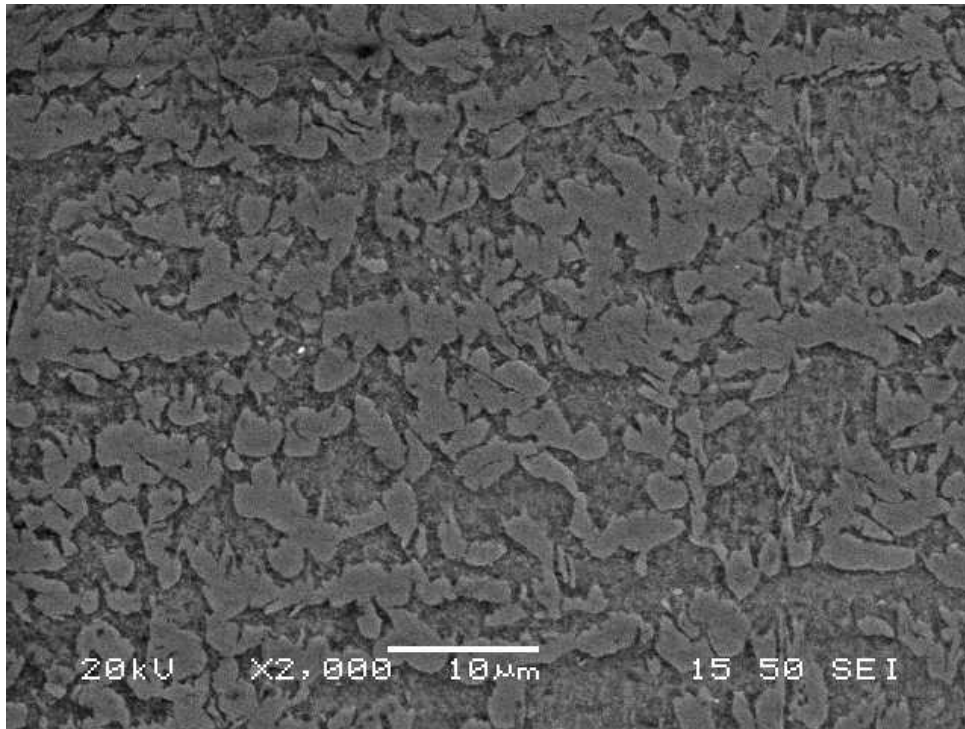
Πίνακας 5.10: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/2min

Δοκίμιο 800°C/5min

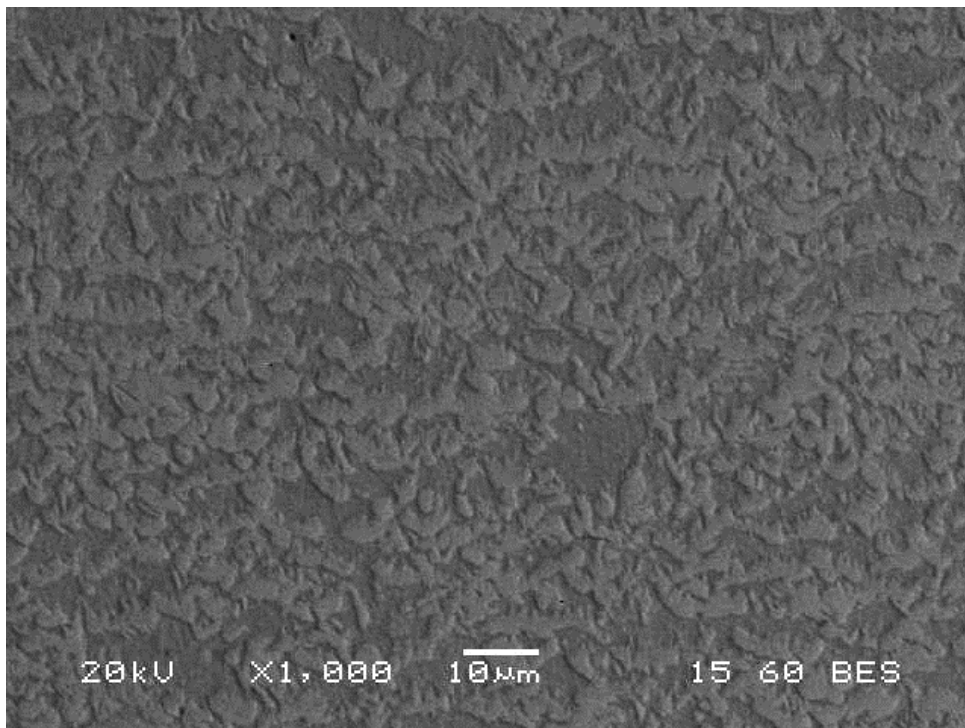
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη και του μαρτενσίτη. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 800°C/5min, το υλικό αποτελείται από 97,07% σίδηρο (Fe), 2,16% μαγγάνιο (Mn) και 0,77% χρώμιο (Cr). Η παρουσία του χρωμίου σε αυτή την περίπτωση αυξάνει την εμβαπτότητα του χάλυβα, δηλαδή την ιδιότητα που καθορίζει το βάθος και την κατανομή του μαρτενσίτη μετά από μια διαδικασία βαφής. Τα κραματικά στοιχεία μαγγάνιο (Mn) και χρώμιο (Cr) βρίσκονται σε διάλυμα μέσα στην φάση του ωστενίτη έτσι ώστε να καθυστερήσουν τον διαχυτικό μετασχηματισμό του ωστενίτη σε φερρίτη και περλίτη.



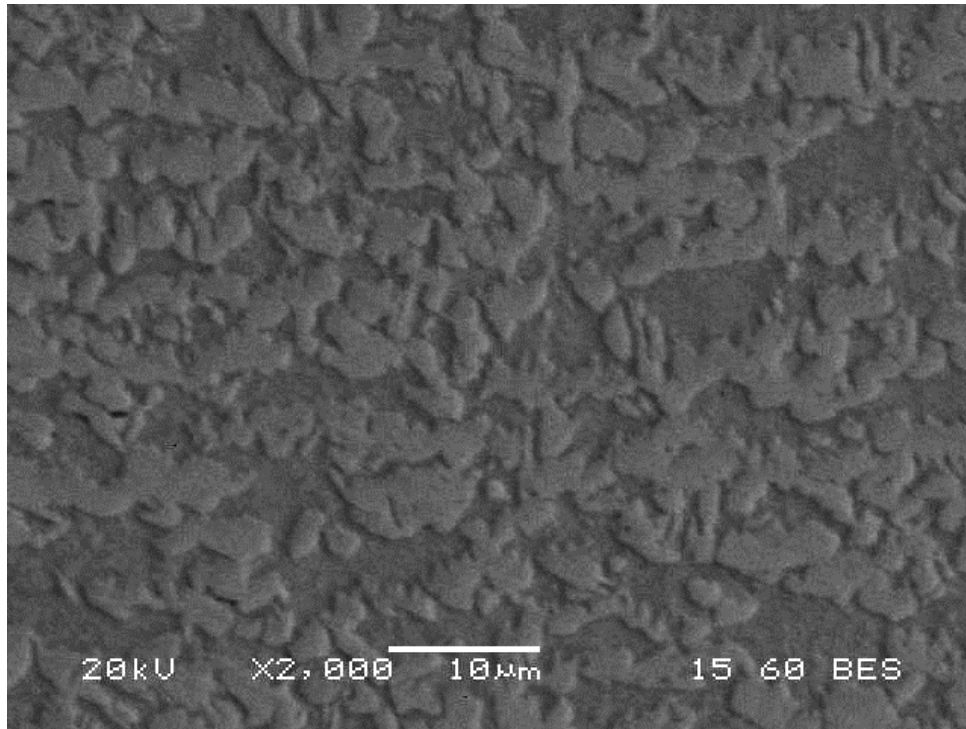
Εικόνα 5.41: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση X1000



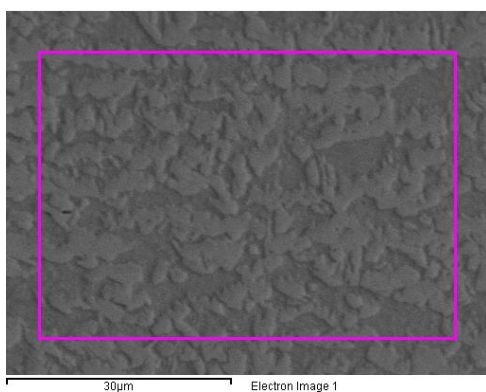
Εικόνα 5.42: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.43: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.44: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5min με μεγέθυνση X2000



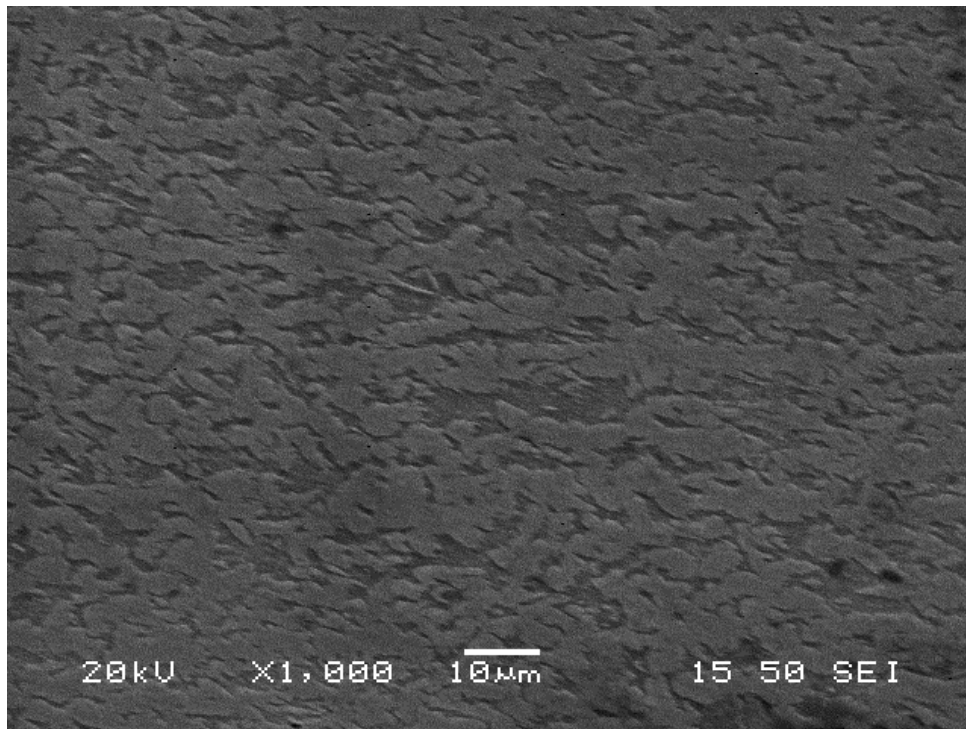
Εικόνα 5.45: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/5min

Element	Weight%	Atomic%
Cr K	0.77	0.82
Mn K	2.16	2.20
Fe K	97.07	96.98
Totals	100.00	

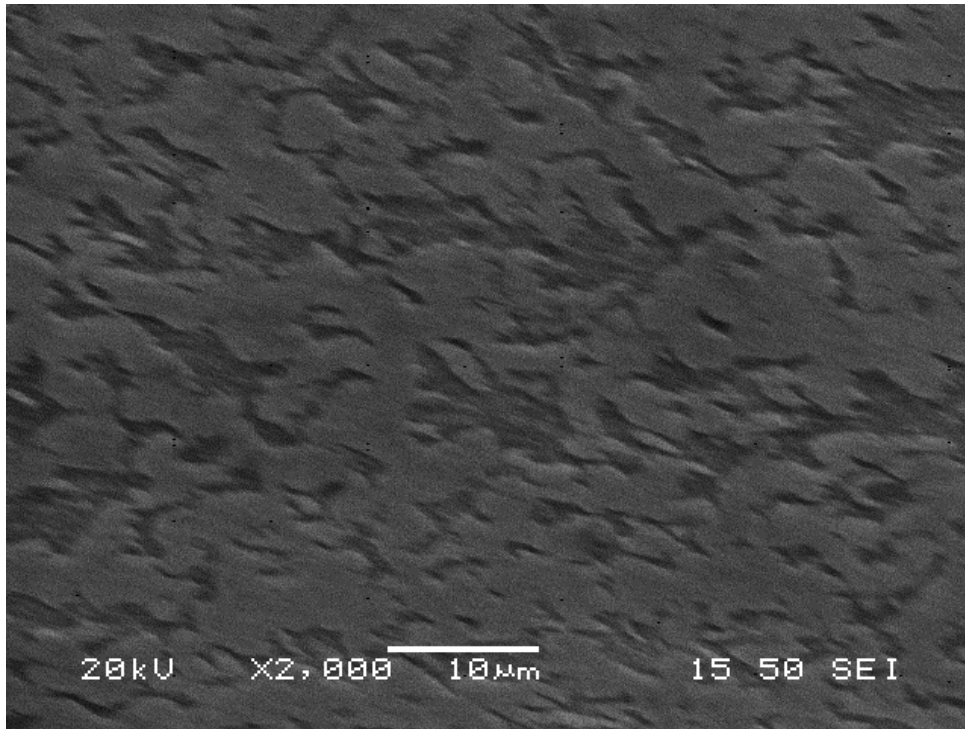
Πίνακας 5.11: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/5min

Δοκίμιο 800°C/30min

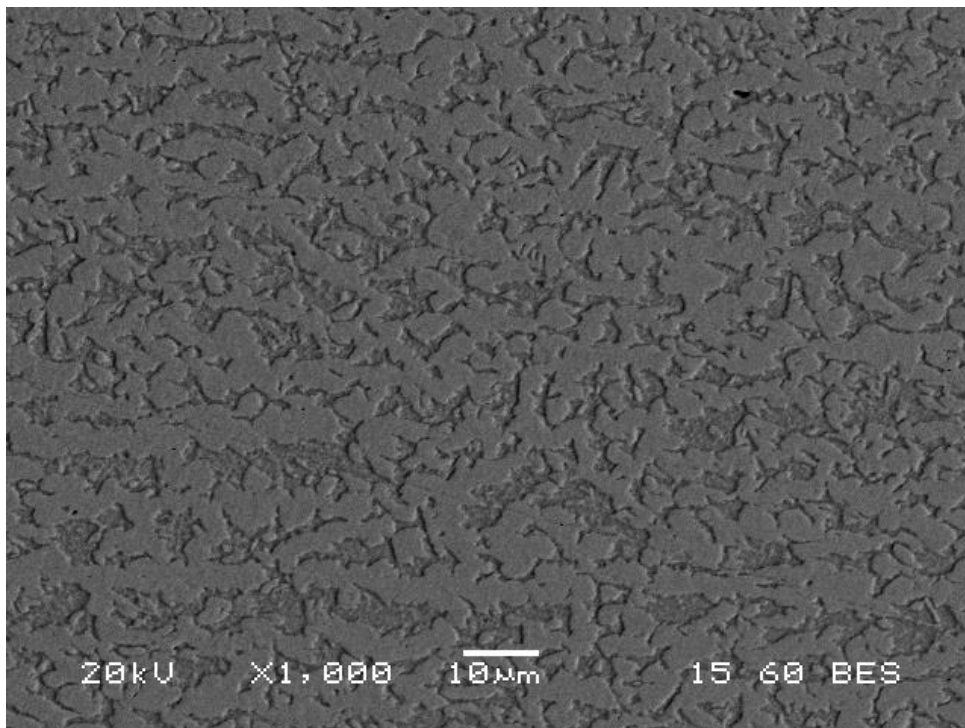
Σε αυτό το δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 30 λεπτά. Στις παρακάτω μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) παρατηρούνται οι φάσεις του φερρίτη και του μαρτενσίτη. Στην μικροδομή παρατηρούμε την φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα. Παρατηρώντας την ανάλυση EDS σε μια τυχαία περιοχή της δομής του δοκιμίου 800°C/5min, το υλικό αποτελείται από 97,88% σίδηρο (Fe) και 2,12% μαγγάνιο (Mn)



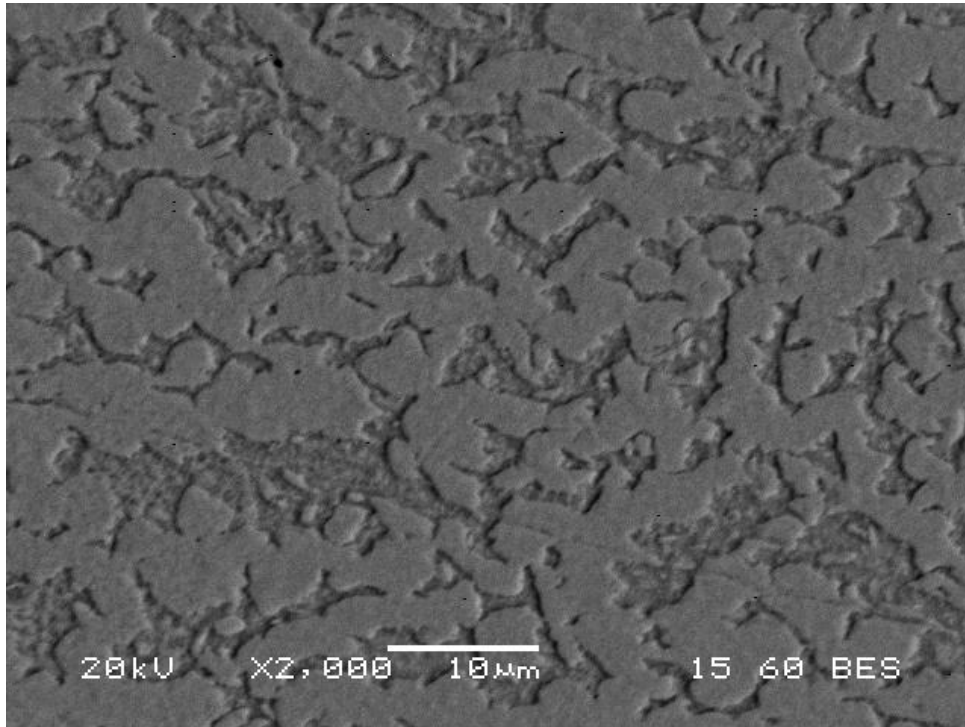
Εικόνα 5.46: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση X1000



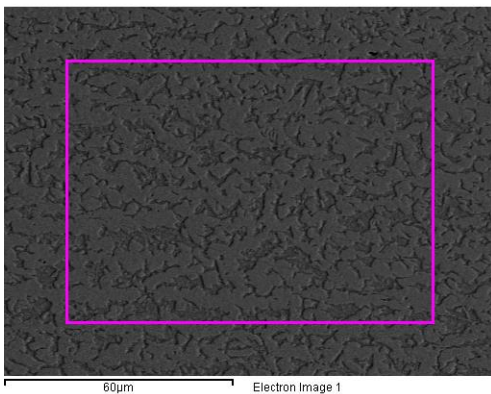
Εικόνα 5.47: Μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.48: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση X1000



Εικόνα 5.49: Μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) του χάλυβα DP600, με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 30min με μεγέθυνση X2000



Εικόνα 5.50: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/30min

Element	Weight%	Atomic%
Mn K	2.12	2.15
Fe K	97.88	97.85
Totals	100.00	

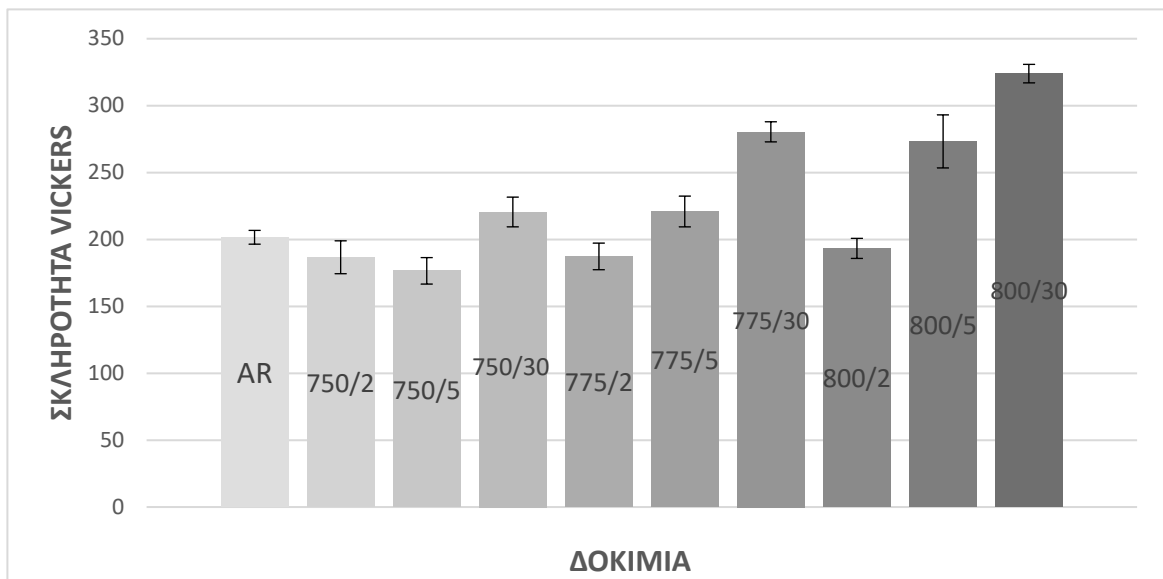
Πίνακας 5.12: Μικροανάλυση (EDS) στο σύνολο της δομής του δοκιμίου 800°C/30min

5.3 Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων

Για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σκληρομέτρηση με τη μέθοδο Vickers. Στόχος ήταν να διαπιστωθούν οι διαφορές στην σκληρότητα που είχαν επιφέρει οι εκάστοτε θερμικές κατεργασίες. Τα αποτελέσματα σκληρομετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω.

Όνομα δοκιμίου	HV(Σκληρότητα)
Αναφοράς	201,6
750°C/2min	186,7
750°C/5min	176,5
750°C/30min	220,5
775°C/2min	187,3
775°C/5min	220,9
775°C/30min	280,4
800°C/2min	193,3
800°C/5min	273,2
800°C/30min	323,9

Πίνακας 5.13 : Μέσος όρος σκληρότητας όλων των δοκιμίων



Εικόνα 5.51: Συγκριτικό διάγραμμα σκληρότητας όλων των δοκίμων

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το δοκίμιο με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30 λεπτά και τα δοκίμια με ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για 5 και 30 λεπτά αντίστοιχα παρουσιάζουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη σκληρότητα από τα υπόλοιπα δοκίμια. Το δοκίμιο με την μεγαλύτερη σκληρότητα είναι αυτό που έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 800°C για 30 λεπτά. Αντίθετα, το δοκίμιο με την μικρότερη σκληρότητα είναι αυτό που έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 750 °C για 5 λεπτά.

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Βασικά χαρακτηριστικά της μελέτης

Στην παρούσα εργασία το υλικό προς εξέταση είναι διφασικός χάλυβας – dual phase (DP600) υψηλής αντοχής. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες (DP) έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες.

Για την μελέτη του υλικού ελήφθησαν 9 δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά υπεβλήθησαν σε θερμική κατεργασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης και βαφής σε νερό, για διάφορες θερμοκρασίες και χρόνους παραμονής, σχηματίζοντας την διφασική δομή φερρίτη και μαρτενσίτη.

Στόχος της μελέτης αυτής ήταν να εξετασθούν οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου χάλυβα, όταν αυτός υποβληθεί σε ενδοκρίσιμη ανόπτηση σε διάφορες θερμοκρασίες, και βαφή σε νερό. Δεύτερος 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 των μηχανικών ιδιοτήτων. Σε όλα τα δοκίμια έγιναν ίσες μετρήσεις (10).

Παρατηρείται (εικόνα) ότι τα δοκίμια με την μεγαλύτερη σκληρότητα κατά μέσο όρο είναι τα 775°C/30min, 800°C/5min και 800°C/30min, δηλαδή σε αυτά τα δοκίμια που έχει πραγματοποιηθεί ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 775°C για 30 λεπτά, στους 800 °C για 5 και 30 λεπτά αντίστοιχα. Ωστόσο το δοκίμιο με την μεγαλύτερη σκληρότητα είναι το 800 °C/30min με 323,9HV, σε αντίθεση με το 750 °C/5min που παρουσιάζει την μικρότερη σκληρότητα με 176,5HV.

Αποτελέσματα Ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) αποτέλεσε μία από τις βασικές μεθόδους για την ανάλυση και σύγκριση των δοκιμίων χάλυβα dual phase (DP600). 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 τις δυο φάσεις, δηλαδή του φερρίτη και του μαρτενσίτη.

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. Παράλληλα με τις μικρογραφίες του SEM χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική του EDS, για την στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Συσχέτιση μικροδομής – μετρήσεων σκληρότητας

Τα αποτελέσματα από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) δείχνουν ότι το υλικό αποτελείται από μια φερριτική μήτρα με ένα μαύρο χρώμα και τον μαρτενσίτη με ένα λευκό-γκρι χρώμα σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό της φερριτικής μήτρας.

Στο διάγραμμα της Εικόνας και στον Πίνακα, παρατηρούνται οι διαφοροποιημένες τιμές της σκληρότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας ενδοκρίσιμης απόπτωσης και του χρόνου παραμονής στη θερμοκρασία, με επακόλουθη βαφή σε νερό, θερμοκρασίας δωματίου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στους 750°C για 5 λεπτά την ελάχιστη τιμή της σκληρότητας συγκριτικά με τις υπόλοιπες θερμικές κατεργασίες. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή της σκληρότητας εμφανίζεται στους 800°C για 30 λεπτά.

Από τις μετρήσεις της σκληρότητας, παρατηρούμε τάση αύξησης στις τιμές της στις θερμοκρασίες και στους χρόνους που χρησιμοποιήσαμε για την επεξεργασία των δοκιμίων.

Η αύξηση των της σκληρότητας οφείλεται αρχικά στην αύξηση του ποσοστού του μαρτενσίτη, ο οποίος αποτελεί τη σκληρή-ψαθυρότερη φάση στους διφασικούς χάλυβες και στον οποίο προσδίδεται η αύξηση της σκληρότητας των υλικών που μελετάμε, καθώς όμως αυξάνονται οι χρόνοι αντίδρασης, σε δεδομένη ενδοκρίσιμη θερμοκρασία αντίδρασης οδηγούμαστε σε χωρικές κατανομές κλάσματος όγκου μαρτενσίτη/φερρίτη και στοιχειομετρικές κατανομές για τον άνθρακα (C) και τα άλλα στοιχεία αντικατάστασης που προσομοιάζουν τις συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διπλωματική εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε την μελέτη διφασικού χάλυβα – dual phase DP600, τόσο σε κατάσταση αναφοράς, όσο και μετά από θερμικές κατεργασίες τροποποίησης της μικροδομής, με σκοπό την αλλαγή τόσο του κλάσματος όγκου του μαρτενσίτη, όσο και της χωρικής του κατανομής.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη είναι τα ακόλουθα:

1. Οι χάλυβες τύπου DP600 προσφέρουν εξαιρετικά προϊόντα για την απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια κρούσης. Αυτό αποδίδεται τόσο στην παρουσία της ψαθυρότερης φάσης του μαρτενσίτη, όσο και στις χαρακτηριστικές διασπορές της εντός της ολκιμότερης φερριτικής μήτρας.
2. Για τον σχεδιασμό μοντέρνων/προηγμένων τύπων χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας, δεν επαρκεί να υπάρχει στη μικροδομή, μια κρίσιμη ποσότητα σκληρής φάσης, αλλά αυτή να έχει και την κατάλληλη χημική σύσταση, το βέλτιστο μέγεθος και κατάλληλες χωρικές διασπορές εντός της μαλακής φερριτικής μήτρας. Ακριβής ποσοτικοποίηση τόσο του κλάσματος του όγκου, όσο και του μεγέθους των νησίδων μαρτενσίτη και της χωρικής κατανομής κρίνεται απαραίτητη. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται πλειάδα τεχνικών ανάλυσης μικροδομής, όπως η περίθλαση ακτίνων X, η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και η ηλεκτρονική μικροσκοπία με τεχνική EBSD.
3. Παρατηρήθηκε ότι για ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C για χρόνο παραμονής 2 λεπτά έχουμε διφασικό χάλυβα με σκληρότητα της τάξης των 193,3 HV, δηλαδή πολύ κοντά στην τιμή (201,6 HV) της σκληρότητας του αρχικού δοκιμίου (AR). **Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 800°C και για χρόνο παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία περίπου 2,5 λεπτά θα πέτυχουμε παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με το αρχικό δοκίμιο.**

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π. Μαυροειδής: Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος , Αθήνα 2005
2. Γ.Δ. Παπαδημητρίου: Μεταλλογνωσία 2 Τα Κράματα , Εκδόσεις ΕΜΠ
3. Γ.Δ. Παπαδημητρίου: Γενική Μεταλλογνωσία 1 , Εκδόσεις ΕΜΠ
4. Γ. Φούρλαρης: Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Αθήνα 2011
5. Κ. Διαμαντόπουλος: Υλικά και η συμπεριφορά τους κατά τη συγκόλληση, Αθήνα 2018
6. The motor industry of Japan, Japan automobile association, 2012
7. AHSS Guidelines version 4.1, June 2009
8. Stuart Keeler, Menachem Kimchi, AHSS Guidelines version 5.0, May 2014
9. Elements of metallurgy and engineering alloys/ F.C. Campbell ASM/ 2008
10. ASM Handbook, Chapter 1, Introduction to steels and cast irons, 2002
11. Σκληρό – Θερμικές επεξεργασίες χαλύβων
12. Zhu Xiaodong Ma Zhaohui, Wang L, Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-making and its Development in Baosteel
13. J. Galán, L. Samek, P. Verleysen, K. Verbeken and Y. Houbaert, Advanced high strength steels for automotive industry, 2012
14. Daniel J. Schaeffler, Introduction to advanced high-strength steels - Part I, 2005, <http://www.thefabricator.com/article>
15. Vebsar, Advanced high strength steel (AHSS) for automotive application, <http://www.vebsar.com>
16. Corus automotive, pocket book of steel, 2007
17. Donald R. Askeland, Pradeep P. Phule, The Science and Engineering of Materials, 2006
18. M.S. Rashid, Dual phase steels, pp. 245 – 266, 1981
19. Prodromos Tsipouridis, Mechanical properties of dual phase steels, 2006
20. S. Hayami and T. Furukawa, A family of high strength, Cold rolled steel. In Microalloying 75, proceedings of the Conference, pages 78 – 87, Vantiec, London, 1975
21. ASM International, 1992: A History of Martensity. Some thoughts on the early hardening of iron. by R. Maddin
22. E. Billur, M.S. and Prof. Dr-Ing T. Altan, Challenges in Forming Advanced High Strength Steels, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM) www.ercnsm.org, pp. 285 – 304
23. K. S. Choi, W. N. Liu, X. Sun, and M. A. Khaleel, Influence of Manufacturing Processes and Microstructures on the Performance and Manufacturability of Advanced High Strength Steels, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 131 / 041205. 2009.

24. Heston, T. Forming AHSS: Playing by new rules. The Fabricator, July 2008.
25. Relationship between metallurgical properties and crash performance of automotive structures
26. <http://www.metal-wear.com/Theory.html>
27. Απόστολος Ν. Βασιλάκος, Πλαστικότητα μετασχηματισμού του παραμένοντα ωστενίτη σε χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, 2000
28. K.W. Andrews, Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures. Journal of the Iron and Steel Institute, 203 (7), pp. 721 – 727, July 1965
29. Koistinen DP; Marburger RE, A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels, Acta Metallurgica 1959 Vol: 7, p:59-60
30. http://www.salzgitterflachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/news/archiv/2010/pdf/10_07_21_hc340xd.pdf
31. D.T. Llewellyn, Steels – Metallurgy and applications, 2nd edition, Butterworth – Heinemann Ltd, pp. 78 – 98, 1992
32. Garber S. 1963, Iron Steel Inst. London Spec. Rep. 79: 1-6
33. Williams E. W. 1963, Iron Steel Inst. London Spec. Rep. 79: 7-12
34. Williams E. W., Davies L.K. 1963, Iron Steel Inst. London Spec. Rep. 79: 13-20
35. Matlock, David K.; Speer, John G.; De Moor, Emmanuel; Gibbs, Paul J., Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: An overview, 2012.
36. A. M. Sherman and R. O. Davies, Influence of martensite carbon content on the cyclic properties of dual-phase steel, INT. J. Fatigue, p. 195-198, 1981
37. I.A El-Sesy, Z.M El-Baradie, Influence carbon and/or iron carbide on the structure and properties of dual-phase steels, Materials Letter, p. 580-585, 2002.
38. Pritchard, S.B., A.J. Trowsdale, 2002. Dual phase steel – High strength fasteners without heat treatment. Corus Construction and Industrial, U.K., p.1– 10
39. M. Tayanc, A. Ayta, A. Bayram, The effect of carbon content on fatigue strength of dual-phase steels, Materials & Design, p. 1827–1835, 2006
40. Havva K. Zeytin, Ceylan Kubilay ,Hüseyin Aydin, Investigation of dual phase transformation of commercial low alloy steels: Effect of holding time at low inter-critical annealing temperatures, Materials Letters, p. 2651–2653, 2008
41. Yoshiyuki Tomita, Effect of morphology of second-phase martensite on tensile properties of Fe-0.1C dual phase steels, Journal of Materials Science, p. 5179-5184, 1990

42. K.A. Bello, S.B. Hassan, M. Abdulwahab, U. Shehu, L.E. Umoru, A. Oyetunji, I.Y. Suleiman, Effect of Ferrite-Martensite Microstructural Evolution on Hardness and Impact Toughness Behaviour of High Martensite Dual Phase Steel, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, p. 407-414, 2007
43. Mohammad Reza Akbarpour, A. Ekrami, Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels, Materials Science and Engineering A, p. 306–310, 2008
44. Ebrahim Najafi Birgani and Majid Pouranvari, Effect of martensite volume fraction on the work hardening behavior of dual phase steels, Metal 2009
45. V.H. Baltazar Hernandez, S.S. Nayak, and Y. Zhou, Tempering of Martensite in Dual-Phase Steels and Its Effects on Softening Behavior, Metallurgical and materials transactions A, 2011
46. P. Movahed, S. Kolahgar, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari b, N. Parvin, The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets, Materials Science and Engineering A, p. 1–6, 2009
47. A.K. Lis, B. Gajda, Modelling of the DP and TRIP micro-structure in the CMnAlSi automotive steel, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, p. 127 – 134, 2006
48. B. Ehrhardt, T. Gerber, H. Hofmann, T.W. Schaumann, Steel Grips 2 No. 4 (2004) 247-255
49. B. Mintz, Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels, International materials review, p. 169 – 197, 2001
50. Marion Calcagnottoa, Yoshitaka Adachib, Dirk Pongea, Dierk Raabe, Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging, Acta Materialia, p. 658–670, 2011
51. Richard Meguerian, Dr. J.R.McDermid, Galvanizing High – Mn DualPhase Steels, 2006
52. A. Fallahi, Microstructure - properties correlation of dual phase steels produced by controlled rolling process, Journal of Mater. Sci. Technol. v. 18, p. 451 – 454
53. A. Fallahi, PhD Thesis, Sheffield University, U.K., 1990
54. T. Tanaka, M. Nishida, K. Nashiguchi, and T. Kato, Formation and Properties of Ferrite Plus Martensite Dual Phase Structures, in Structure and Properties of Dual-Phase Steels, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1979, p 221-241

55. A. F. Crawley, M. T. Shehata, N. Pussegoda, C. M. Mitchell and W. R. Tyson, in R. A. Kot and B. L., Processing, Properties and Modeling of Experimental Batch-Annealed Dual-Phase Steels, In Fundamentals of dual phase steels, p. 181 – 197, Chicago, IL, USA, 1981, AIME
56. J. Y. Koo and G. Thomas. Design of duplex low carbon steels for improved strength: Weight applications. In Formable HSLA and Dual-Phase Steels, p. 40–55, Chicago, IL, USA, October 26 1977. AIME
57. M.A. Maleque, Y.M. Poon, H.H. Masjuki, The effect of intercritical heat treatment on the mechanical properties of AISI 3115 steel, Journal of Materials Processing Technology, p. 482 – 487, 2004
58. J. Galán, L. Samek, P. Verleysen, K. Verbeken and Y. Houbaert, Advanced high strength steels for automotive industry, Revista de Metalurgia, p. 118 – 131, 2012
59. T. Kunitake, H. ohtani, Tetsu Hagane 50 (1964) P666.
60. Qingge Meng, Jun Li, Jian Wang, Zuogui Zhang, Lixiang Zhang, Effect of water quenching process on microstructure and tensile properties of low alloy cold rolled dual-phase steel, Materials and Design, p. 2379 – 2385, 2009
61. P. D. Hodgson and M. R. Hickson, R. K. Gibbs. The production and mechanical properties of ultrafine ferrite, Materials Science Forum, (10):63–72, 1998.
62. P. J. Hurley, P. D. Hodgson, and B. C. Muddle, Analysis and characterization of ultra-fine ferrite produced during a new steel strip rolling process. Scripta Materialia, 40(4):433–438, 1999.
63. M. R. Hickson and P. D. Hodgson, Effect of pre-roll quenching and post-roll quenching on production and properties of ultrafine ferrite in steel. Materials Science and Technology, 15:85–90, 1999.
64. P. J. Hurley and P. D. Hodgson, Formation of ultra-fine ferrite in hot rolled strip: potential mechanisms for grain refinement. Materials Science and Engineering A, A302:206–214, 2001.
65. M. R. Hickson, P. J. Hurley, R. K. Gibbs, G. L. Kelly, and P. D. Hodgson, the production of ultrafine ferrite in low-carbon steel by strain induced transformation. Metallurgical and Materials Transactions A, 33A:1019–1026, April 2002
66. F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, and R. Priestner. Fine-grained alloys by thermo – mechanical processing. Current opinion in Solid State and Materials Science, 5:15–21, 2001
67. Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials - development of the accumulative rollbonding (ARB) process. Acta Materialia, 47(2):579–583, 1999.
68. V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. K. Islamgaliev, and R. Z. Valiev, A two-step SPD processing of ultrafine-grained titanium. NanoStructured Materials, 11(7):947–954, 1999.

69. D. H. Shin, B. C. Kim, Y.-S. Kim, H. Beladi, and K.-T. Park. Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing. *Acta Materialia*, 48:2247–2255, 2000.
70. D.-H. Shin, J.-J. Park, Y.-K. Lee, and K.-T. Park. Ultrafine-grained low carbon steels fabricated by equal channel angular pressing: Microstructures and tensile properties. *ISIJ International*, 42(12):1490–1496, 2002.
71. Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, and T. G. Langdon. Development of fine-grained structures using severe plastic deformation. *Materials Science and Technology*, 16:1239 – 1245, November-December 2000.
72. K.-T. Park, S. Y. Han, B. D. Shin, Y. K. Lee, and K. K. Um, Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing. *Scripta Materialia*, 51:909–913, 2004.
73. N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, and S. Tanigawa, Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*, 40(7):795–800, 1999.
74. S.-H. Lee, Y. Saito, K.-T. Park, and D. H. Shin, Microstructures and mechanical properties of ultra low carbon IF steel processed by accumulative roll-bonding process. *Materials Transactions*, 43(9):2320–2325, 2002
75. Marion Calcagnotto, Yoshitaka Adachi, Dirk Ponge, Dierk Raabe, Deformation and fracture mechanisms in fine – and ultrafine – grained ferrite /martensite dual-phase steels and the effect of aging, *Acta Materialia*, p. 658–670, 2011.
76. Delincé M, Brechet Y, Embury JD, Geers MGD, Jacques PJ, Pardoën T. *Acta Mater* 2007;55:2337.
77. Son YI, Lee YK, Park KT, Lee CS, Shin DH. *Acta Mater*, 2005;53:3125.
78. Tsipouridis P, Werner E, Kremaszky C, Tragl E. *Steel Res Int*, 2006;77:654
79. Calcagnotto M, Ponge D, Raabe D. *ISIJ Int* 2008;48:1096
80. Marder A.R.: *Metall. Trans. A*, 13A (1982)85-92
81. Byun T.S. and Kim I.S., *J. Mater. Sci.*, 28(1993)2923
82. H.C. Chen, G.H. Cheng, *J. Mater. Sci.* 24 (6) (1989) 1991
83. A. Bag, K. Ray, E.S. Dwarakadasa, *Metall. Mater. Trans.* 32A (2001) 2207
84. A. Bag, K. Ray, E.S. Dwarakadasa, *Metall. Mater. Trans.* 30A (1999) 1193
85. D.W. Suh, D.I. Kwon, S.H. Lee, N.J. Kim, *J. Metall. Mater. Trans.* 28A (1997) 504–508
86. R.G. Davies, Formable HSLA and dual-phase, in: *Proceedings of the Metallurgical Society of AIME Steels*, Michigan, 1979, pp. 25 – 38
87. E. Ahmad , T. Manzoor, N. Hussain, N.K. Qazi, Effect of thermomechanical processing on hardenability and tensile fracture of dualphase steel, *Materials and Design*, p. 450–457, 2008

88. R. Silverman, Modern Calculus and Analytic Geometry, Macmillan Company, 2003
89. Akihiro Uenishi, Yukihisa Kuriyama, Manabu Takahashi, High strength steel sheets offering high impact energy absorbing capacity, Nippon steel technical report, 2000
90. Carrie M. Tamarelli, AHSS 101: The Evolving Use of Advanced HighStrength Steels for Automotive Applications, 2011
91. Kawata, K. et al.: Mechanical Properties at High Rates of Strain 1979, ed. J. Harding, Institute of Physics, Conference Series
92. Nakanishi, E. et al.: Structural Failure, Product Liability and Technical Insurance. 1992, p.423
93. Wierzbicki, T. et al.: J. Apl. Mech. (50), 72 (1983)
94. Uenishi, A. et al.: '97 Spring Meeting, JSTP, 1997, p.179
95. Hiwatashi, S. et al.: 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, 1993, p.263
96. Murali D. Tumuluru, Resistance Spot Welding of Coated High-Strength Dual-Phase Steels, Welding Journal, p. 31 – 37, 2006
97. S. L. Yang, R. Kovacevic, Welding of Galvanized Dual – Phase 980 Steel in a Gap – Free Lap Joint Configuration, p. 168 – 178, 2009
98. www.worldautosteel.org
99. David Llewellyn, Roger Hudd, Steels: Metallurgy and Applications, Third Edition, 1998
100. Advanced Vehicle Concepts, Overview Report, 2002
101. Advanced High-Strength Steels - A Collision Repair Perspective, 2006
102. <http://www.topspeed.com/cars/ford/2009-ford-fiestaar52487.html#ixzz2eQTynhgR>