



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών

Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Κρυογενική Κατεργασία Εργαλειοχάλυβα Uddeholm Onar 2M»**

**ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΛΑΝΓΚΟΣ**

Επιβλέπων: Δρ. Δ. Ι. Παντελής

Επιτροπή: Δημήτριος Ε. Μανωλάκος

Δημήτριος Ι. Παντελής

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης

ΙΟΥΛΙΟΣ 2019, ΑΘΗΝΑ

## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ. ....	4
ABSTRACT. ....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : Θεωρητικό Μέρος.....	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.1.1 Χάλυβες.....	8
1.1.2 Στοιχεία κραμάτωσης.....	11
1.1.3 Εργαλειοχάλυβες .....	13
1.1.4 Εργαλειοχάλυβας H13 .....	15
1.2 Θερμική Κατεργασία Εργαλειοχαλύβων .....	17
1.2.1 Ανόπτηση .....	17
1.2.2 Ωστενιτοποίηση .....	19
1.2.3 Βαφή.....	21
1.2.4 Επαναφορά .....	25
1.3 Κρυογενική Κατεργασία Εργαλειοχαλύβων .....	30
1.3.1 Μελέτες σε διάφορους εργαλειοχάλυβες.....	34
1.3.2 Μελέτες στον εργαλειοχάλυβα H13.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : Πειραματικό Μέρος .....	62
2.1 Εισαγωγή.....	62
2.2 1 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Προετοιμασία δοκιμίων. ....	63
2.3 2 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Ωστενιτοποίηση. ....	65
Ωστενιτοποίηση Νο1 και Νο2 .....	66
Ωστενιτοποίηση Νο3 και Νο4.....	71
2.4 3 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Βαφή.....	74
2.5 4 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Snap Tempering.....	75
2.6 5 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Κρυογενική. ....	76
2.7 6 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Επαναφορές. ....	78
2.8 7 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Κοπή δοκιμίων.....	82

---

2.9 8 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Εγκιβωτισμός δοκιμίων.....	83
2.10 9 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Λείανση-Στίλβωση δοκιμίων.....	84
2.11 10 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίων. ....	86
2.12 11 <sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Λήψη εικόνων μικροδομής δοκιμίων. ....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : Αποτελέσματα.....	89
3.1 Μικροσκληρότητα. ....	89
3.2 Μικροδομή (Οπτικό Μικροσκόπιο).....	95
3.3 Κατακρήμνιση Καρβιδίων.....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : Συζήτηση .....	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	144

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ.

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την απόκτηση του διπλώματος του Ναυπηγού Μηχανολόγου Μηχανικού της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π). Το θέμα το οποίο μελετάται, είναι η κρουγενική κατεργασία του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Onar 2M και συγκεκριμένα, το πώς αυτή επηρεάζει τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου υλικού.

Προτού προχωρήσω στην περίληψη της ακόλουθης εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω αρχικά την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή κ. Δημήτριο Ι. Παντελή, Διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την επίβλεψή του κατά τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του. Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Δρ. κ. Χαρά Σαράφογλου καθώς και τον Υ.Δ. κ Δημήτριο Παπαγεωργίου για την υπομονή που έδειξαν και τη καθοδήγηση που μου έδωσαν κατά την διάρκεια του πειραματικού όσο και του θεωρητικού σκέλους της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Τσαρουχά Ανθή καθώς και όλο το εργαστηριακό προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχ. Μηχανικών και του Εργαστηρίου Κατεργασίας των Υλικών της Σχολής Μηχ. Μηχανικών του Ε.Μ.Π για τη βοήθειά τους στο πειραματικό στάδιο της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. Νικόλαο Γ. Τσούβαλη και τον Καθ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο για τη παρουσία τους ως μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής κατά τη παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τη Στυλιανή Παναγιώτου και τους φίλους μου για το υπέρμετρο ενδιαφέρον αλλά και για τη διαρκή υποστήριξη και υπομονή που έδειξαν κατά της διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται την επίδραση που έχει η κρυογενική κατεργασία στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα H13. Η εμπορική ονομασία του συγκεκριμένου υλικού είναι Uddeholm Ovar 2M. Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από τρία κεφάλαια, τα περιεχόμενα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια πρώτη επαφή με το υλικό το οποίο θα μελετήσουμε. Συγκεκριμένα, γίνεται μια αρχική αναφορά στη μεγάλη οικογένεια των χαλύβων, καταλήγοντας στην εκτενή περιγραφή του εργαλειοχάλυβα H13. Εν συνεχεία, περιγράφονται τα στάδια της συμβατικής κατεργασίας σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα H13, με έμφαση στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο κάθε στάδιο. Στο τέλος του συγκεκριμένου κεφαλαίου, γίνεται αναφορά στη κατεργασία της κρυογενικούς. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την συγκεκριμένη κατεργασία, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτές επηρεάζουν τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου υλικού. Επιπρόσθετα, παρατίθεται ένα σύνολο μελετών και εργασιών που έχουν γίνει κατά τη πάροδο των τελευταίων ετών, στις οποίες διερευνάται η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του Uddeholm Ovar 2M.

Το δεύτερο κεφάλαιο, αποτελεί το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετηθεί κατά πόσο η κρυογενική κατεργασία επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή του υλικού Uddeholm Ovar 2M, σαν ένα επιπρόσθετο στάδιο της συμβατικής κατεργασίας σκλήρυνσης του υλικού. Στη συγκεκριμένη εργασία, δοκίμια από εργαλειοχάλυβα H13 υπέστησαν θερμική κατεργασία προκειμένου να αυξηθεί σκληρότητά τους. Τα στάδια της κατεργασίας ήταν τα ακόλουθα: ωστενιτοποίηση, βαφή, snar-tempering, κρυογενική και επαναφορά σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για τη μελέτη της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στο υπό διερεύνηση υλικό, ακολουθήθηκε ο παραπάνω θερμικός κύκλος τρεις φορές. Πιο αναλυτικά, η μόνη παράμετρος που διέφερε στους τρεις θερμικούς κύκλους ήταν η διάρκεια παραμονής των δοκιμίων στην υπο μηδενική θερμοκρασία. Επομένως, αναφορικά με το στάδιο της κρυογενικής, όλα τα

δοκίμια ψύχθηκαν στους  $-195^{\circ}\text{C}$  με τους χρόνους παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία να είναι 1h, 4h και 12h. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι σαν χρόνος παραμονής λογίζεται η διάρκεια παραμονής των δοκιμίων στο κρυογενικό θάλαμο από τη στιγμή που η θερμοκρασία φτάσει τους  $-195^{\circ}\text{C}$ .

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση των ευρημάτων μετά τη διεξαγωγή των προαναφερθέντων πειραμάτων. Αναλυτικότερα, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο καθώς και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προκειμένου να μελετηθούν τα όρια των κόκκων, ο εναπομείναντας ωστενίτης καθώς και τα πρωτογενή και δευτερογενή καρβίδια. Επιπλέον, μέσα από τη σκληρομέτρηση των δοκιμίων για κάθε θερμοκρασία επαναφοράς κατασκευάστηκαν τρία Διαγράμματα Επαναφοράς ούτως ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη σκλήρυνση του υλικού. Η παραπάνω διεργασία έδειξαν ότι η κρυογενική κατεργασία συμβάλει στην αύξηση της σκληρότητας, στη μείωση του εναπομείναντα ωστενίτη και στον ομοιογενή διασκορπισμό των λεπτότερων καρβιδίων.

## ABSTRACT.

As it was mentioned previously, this thesis is written in order to examine the effect of cryogenic treatment in microstructure and mechanical properties of tool steel H13. The trade name of this material is Uddeholm Ovar 2M. The present work consists of three chapters, the contents of which are presented below.

In the first chapter, there is a first approach with the material we are going to study. In particular, an initial reference is made to the large family of steels, resulting in an extensive description of the H13 tool steel. The steps of the conventional heat treatment of the H13 tool steel are then described, emphasizing the phenomena taking place at each stage. At the end of this chapter, reference is made to the cryogenic treatment. In particular, the main parameters that determine this specific processing are presented, as well as the way in which they affect the microstructure and the mechanical properties of Uddeholm Ovar 2M. Additionally, at the end of the chapter there is a set of studies that have been done over the last few years, investigating the effect of cryogenic treatment on the microstructure and mechanical properties of Uddeholm Ovar 2M.

The second chapter is the experimental part of this paper. In more detail, the experimental procedure followed in order to investigate whether the cryogenic treatment affects the mechanical properties and the microstructure of the Uddeholm Ovar 2M material as an additional step of the conventional hardening treatment of the material is presented. In this work, H13 tool steel pieces were subjected to heat treatment in order to increase their hardness. The processing steps were as follows: austenitization, quenching, snap-tempering, cryogenic and tempering to different temperatures. To study the effect of cryogenic treatment on H13, the above thermal cycle was followed three times. More analytically, the only parameter that varied in the three thermal cycles was the duration of the samples remaining at sub-zero temperatures. Therefore, with regard to the cryogenic stage, all specimens were cooled to  $-195^{\circ}\text{C}$  with residence times at this temperature being 1h, 4h and 12h. At this point it is worth mentioning that the residence time of the specimens in the cryogenic chamber is considered as the residence time since the temperature reaches  $-195^{\circ}\text{C}$ .

In the third chapter, following the above-mentioned experiments, the findings are presented. More specifically, the specimens were placed in an optical microscope as well as a scanning

electron microscope in order to study the grain boundaries, the residual austenite as well as the primary and secondary carbides. In addition, by measuring the microhardness of the specimens for each tempering temperature, three Tempering Diagrams were constructed so as to draw conclusions about the primary and secondary hardening of the material. The above processes have shown that cryogenic treatment contributes to increased hardness, reduced residual austenite and homogeneous dispersion of finer carbides.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Θεωρητικό Μέρος

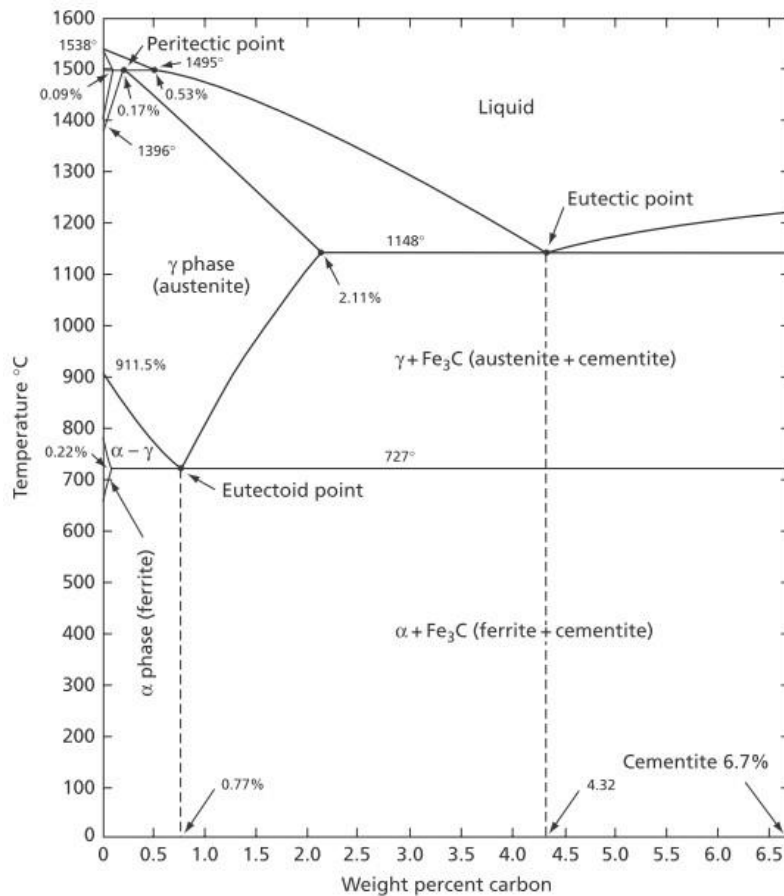
### 1.1 Εισαγωγή

#### 1.1.1 Χάλυβες

Οι χάλυβες όπως είναι γνωστό, συνιστούν κράματα Fe-C, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1,5% κ.β. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν, ενίοτε σε μικρές ποσότητες, και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες. [40].

Παρά τη συνεχή ανάπτυξη νέων υλικών, ο χάλυβας εξακολουθεί να είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα, πιο χρησιμοποιημένα και πιο σημαντικά υλικά του σήμερα. Ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση και το ιστορικό της θερμομηχανικής τους κατεργασίας, παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες οι οποίες ποικίλουν σημαντικά, καλύπτοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος αντοχής, σκληρότητας και ολκιμότητας. Ο χάλυβας μπορεί επίσης να παράγεται σχετικά φτηνά, σε μεγάλες ποσότητες και με πολύ ακριβείς προδιαγραφές. Επομένως, δεν προκαλεί καμία έκπληξη το γεγονός ότι ο σίδηρος και ο χάλυβας αποτελούν το 80% κ.β των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη σημερινή βιομηχανία. [14]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο χάλυβας μπορεί να επεξεργαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δώσει μια μεγάλη ποικιλία μικροδομών και ιδιοτήτων. Τα επιθυμητά αποτελέσματα επιτυγχάνονται με θέρμανση σε περιοχές θερμοκρασιών όπου μία φάση ή συνδυασμός φάσεων είναι σταθερή (δημιουργώντας έτσι αλλαγές στη μικροδομή ή κατανομή σταθερών φάσεων) και/ή με θέρμανση ή ψύξη μεταξύ των θερμοκρασιακών περιοχών στις οποίες οι διαφορετικές φάσεις είναι σταθερές (προκαλώντας έτσι επιθυμητούς μετασχηματισμούς φάσεων). Το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα είναι το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίζεται όλη η διαδικασία θερμικής κατεργασίας του χάλυβα. Αυτό το διάγραμμα ορίζει τις περιοχές θερμοκρασίας-σύνθεσης όπου οι διάφορες φάσεις του χάλυβα είναι σταθερές, καθώς επίσης και τα όρια ισορροπίας μεταξύ αυτών των φάσεων [7]. Στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθεται το διάγραμμα Fe-Fe<sub>3</sub>C που αναφέρθηκε παραπάνω.



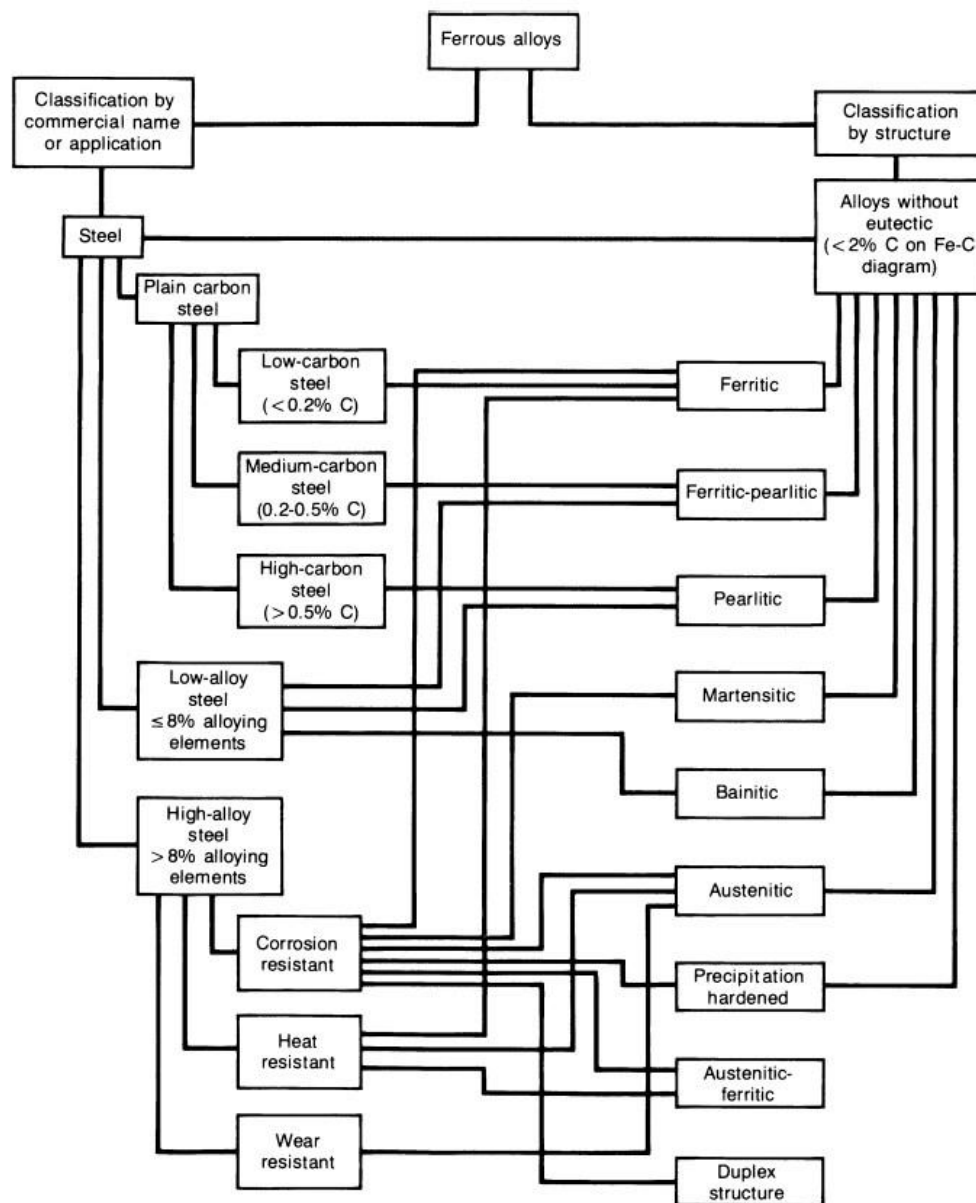
Διάγραμμα 1: Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe<sub>3</sub>C

Οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν από μία ποικιλία διαφορετικών συστημάτων ανάλογα με [3]:

- Τη σύσταση: ανθρακούχοι, ελαφρά κραματωμένοι ή ανοξειδωτοί.
- Τους τρόπους παραγωγής: ανοιχτής φλογοκαμίνου, βασικής οξυγόνου ή ηλεκτρικής καμίνου.
- Τη μέθοδο φινιρίσματος: θερμή έλαση, ψυχρή έλαση.
- Τη μορφή του προϊόντος: μπάρες, πλάκες, φύλλα, λωρίδες, σωλήνες ή άλλες δομικές μορφές.
- Τη διαδικασία αποξείδωσης: πλήρως καθησυχασμένος, περιθωριακός ή ημικαθησυχασμένος.
- Τη μικροδομή: φερριτικοί, περλιτικοί και μαρτενσιτικοί χάλυβες.

- Το απαιτούμενο επίπεδο αντοχής, όπως έχει καθοριστεί από τα πρότυπα της Αμερικανικής Εταιρίας Δοκιμών και Υλικών.
- Τη θερμική κατεργασία: ανόπτηση, βαφή και επαναφορά ή θερμομηχανικές κατεργασίες.
- Τις ποιοτικές προδιαγραφές: ποιότητα σφυρηλάτησης και ποιότητα εμπορίου.

Από τα παραπάνω συστήματα ταξινόμησης, αυτά που έχουν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι αυτά της σύστασης των χαλύβων και της μικροδομής τους. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται σχηματικά αυτά τα συστήματα ταξινόμησης.



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ταξινόμησης χάλυβα

### 1.1.2 Στοιχεία κραμάτωσης

Τα κραματικά στοιχεία προστίθενται στους χάλυβες προκειμένου να προκαλέσουν αλλαγές στις ιδιότητές τους. Μια σημασιολογική διάκριση μπορεί να γίνει μεταξύ των κραματικών στοιχείων και των ακαθαρσιών, τα οποία δεν προστίθενται οικειοθελώς στον χάλυβα αλλά προέρχονται από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία παραγωγής του. Κάθε στοιχείο μπορεί να είναι είτε κραματικό είτε ακαθαρσία. Για παράδειγμα, ποσότητα νικελίου ή χρωμίου μπορεί να εισέλθει στον χάλυβα από παλιοσίδερα κραματωμένου χάλυβα. Σε αυτή τη περίπτωση τα δύο αυτά στοιχεία θεωρούνται ακαθαρσίες. Παρόλα αυτά, αν κάποιο από τα παραπάνω στοιχεία προστεθεί στον χάλυβα προκειμένου να αποκτήσει μια επιθυμητή σύσταση, τότε χαρακτηρίζονται ως κραματικά. [5]

Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται στους χάλυβες είναι: άνθρακας, μαγγάνιο, πυρίτιο, νικέλιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νιόβιο, χαλκός, αλουμίνιο, τιτάνιο, βολφράμιο και κοβάλτιο. [21]

Ένας ακόμα τρόπος διάκρισης των κραματικών στοιχείων είναι ως προς το τρόπο που κατανέμονται στη δομή χάλυβα. Αναλυτικότερα, τα κραματικά στοιχεία διακρίνονται:

- Σε στοιχεία τα οποία δεν δημιουργούν καρβίδια στη δομή του χάλυβα (π.χ. Ni, Si, Co, Al, Cu και N)
- Σε στοιχεία τα οποία δημιουργούν καρβίδια στη δομή του χάλυβα (π.χ. Cr, Mn, Mo, W, V, Ti, Zr και Nb)

Επειδή τα στοιχεία της πρώτης ομάδας δεν δημιουργούν χημικές ενώσεις με το σίδηρο και τον άνθρακα, ο μόνος τρόπος για να υπάρξουν στη δομή του χάλυβα είναι σαν στερεά διαλύματα στο σίδηρο. Τα στοιχεία κραμάτωσης που σχηματίζουν σταθερά καρβίδια στον χάλυβα, μπορούν να βρεθούν με τη μορφή χημικών ενώσεων με τον άνθρακα και το σίδηρο ή να υπάρχουν στο στερεό διάλυμα. Η κατανομή αυτών των στοιχείων εξαρτάται από τη περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα και από την ταυτόχρονη παρουσία άλλων στοιχείων που σχηματίζουν καρβίδια. [28].

Τόσο τα κραματικά στοιχεία όσο και οι ακαθαρσίες μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία παραγωγής του χάλυβα, την κατασκευή και τη λειτουργία των τελικών προϊόντων. Η επίδραση ενός στοιχείου κραμάτωσης στο χάλυβα μπορεί να επηρεαστεί από τη παρουσία κάποιου άλλου στοιχείου. Αυτά τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης είναι περίπλοκα. Επιπλέον,

η παρουσία ενός κραματικού στοιχείου μπορεί να λειτουργεί ευεργετικά για κάποιες ιδιότητες του χάλυβα, ενώ ταυτόχρονα να είναι επιβλαβής για κάποιες άλλες [5]. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία κραμάτωσης που μπορούν να προστεθούν στο χάλυβα, καθώς και η επίδραση που έχουν στις ιδιότητες του.

*Πίνακας 1: Στοιχεία κραμάτωσης χάλυβα*

Element	Function	Element	Function
Carbon (C)	An essential alloying element in most steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. Dissolves in iron to form ferrite and austenite. Combines with iron to form a carbide (cementite-Fe <sub>3</sub> C). The carbide is a component of pearlite.	Vanadium (V)	An important element in microalloyed steels. Added to increase strength and hardness of steel by grain-size control (grain refinement) as well as to increase hardenability. Strong nitride former; also forms a carbide. Minimizes loss in strength during tempering
Manganese (Mn)	An essential alloying element in most steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. A weak carbide former (greater than iron). Counteracts brittleness caused by sulfur (iron sulfide) through the formation of a manganese sulfide (MnS). High levels of manganese produce an austenitic steel with improved wear and abrasion resistance.	Columbium (Cb) Niobium (Nb)	An important element in microalloyed steels. Added to increase strength and hardness of steel by grain-size control (grain refinement) as well as to increase hardenability. Strong carbide former; also forms a nitride
Phosphorus (P)	Usually considered an impurity in most steels. Can be added to low-carbon steels to increase strength and hardness. Improves machinability of free-machining steels. Promotes temper embrittlement. Forms an undesirable iron phosphide (Fe <sub>3</sub> P) at high phosphorus levels (especially in cast irons)	Aluminum (Al)	An important alloying element in nitrided steels and deep-drawing sheet steels. Added to increase strength and hardness of steel by grain-size control (grain refinement). A common deoxidizer. Forms undesirable alumina inclusions (aluminum oxides). A strong nitride former. Does not form a carbide in steel
Sulfur (S)	Usually considered an impurity in steel. Added to special steels for improved machinability	Titanium (Ti)	An important element in microalloyed steels. Added to increase strength and hardness of steel by grain-size control (grain refinement). Very strong carbide and nitride former. Important element to "getter" or tie up nitrogen in steels (protects boron from nitrogen in boron-treated steels). Also a strong deoxidizer. Can combine with sulfur to form titanium sulfides
Silicon (Si)	An essential alloying element in most steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. Is added to molten steel to remove oxygen (deoxidize). As a result of deoxidation, can form silicate stringers (silicon dioxide inclusions). Does not form a carbide in steels. Improves oxidation resistance. Added to special steels to improve electrical and magnetic properties as well as hardenability. Increases susceptibility to decarburization. Promotes graphitization in cast irons	Boron (B)	Added to steel to increase hardenability. Enhances the hardenability characteristics of other alloying elements. Added to steel for nuclear reactor applications because of its high cross section for neutrons
Nickel (Ni)	An essential alloying element in some steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. Toughens steels, especially at low temperatures. Does not form a carbide in steel. Renders high-chromium stainless steels austenitic	Nitrogen (N)	Added to some microalloyed steels to increase the amount of nitrides required for strengthening or grain-size control (e.g., in a vanadium steel)
Chromium (Cr)	An essential alloying element in some low-alloy steels and all stainless steels. Added to slightly increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. Increases resistance to corrosion and high-temperature oxidation. A carbide former (greater than manganese); its carbides improve wear and abrasion resistance and provide high-temperature strength.	Lead (Pb)	Insoluble in steel. Added to special leaded steels for improved machinability. Environmentally sensitive
Molybdenum (Mo)	An essential alloying element in some low-alloy steels and tool steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. A strong carbide former (stronger than chromium). Improves high-temperature properties, including creep strength. Counteracts temper embrittlement. Enhances corrosion resistance in stainless steels	Bismuth (Bi)	Similar to lead. Added to special steels for improved machinability
Copper (Cu)	Usually considered an impurity or tramp element in most steels, because it promotes hot shortness. Added to some steels for improved corrosion resistance. Added in special steels for increased strength and hardness through heat treating (aging). Very insoluble in iron at room temperature and does not form a carbide	Tin (Sn)	An impurity or tramp element in steel. Promotes temper embrittlement
Cobalt (Co)	An essential alloying element in some steels. Added to increase strength and hardness. Improves hot hardness. Weak carbide former. An important element in some tool steels and heat-resistant steels. Decreases hardenability	Antimony (Sb)	An impurity or tramp element in steel. Promotes temper embrittlement
Tungsten (W)	An essential alloying element in some steels. Added to increase solid-solution strength and hardness as well as to increase hardenability. Strong carbide former; the carbides form hard, abrasion-resistant particles in tool steels.	Arsenic (As)	An impurity or tramp element in steel. Promotes temper embrittlement
		Oxygen (O)	Undesirable in steel. Combines with other elements (manganese, silicon, aluminum, titanium, etc.) to form oxide inclusions that can degrade toughness and fatigue resistance. Usually minimized in steel by deoxidation with aluminum and/or silicon and vacuum degassing
		Hydrogen (H)	Undesirable in steel. If entrapped, can cause crack formation (hydrogen flakes, microcracks, etc.). Usually minimized in liquid steel by vacuum degassing or slow cooling after the austenite-to-ferrite transformation
		Calcium (Ca)	Added to steel for sulfide shape control (combines with sulfur to form rounded, undeformable inclusions). Strong deoxidizer. Forms calcium oxide and calcium aluminate inclusions
		Zirconium (Zr)	Added to steel for sulfide shape control (forms rounded, undeformable zirconium sulfides). Strong deoxidizer. Forms zirconium oxide and is a strong nitride former
		Cerium (Ce)	Added to steel for sulfide shape control (forms rounded, undeformable cerium sulfide inclusions). Strong deoxidizer
		Magnesium (Mg)	Added to liquid cast iron to nucleate graphite nodules in ductile (nodular) iron



### 1.1.3 Εργαλειοχάλυβες

Οι εργαλειοχάλυβες είναι χάλυβες υψηλής αντοχής, οι οποίοι κατασκευάζονται με πολύ μικρές ανοχές στη σύνθεση και τις ιδιότητες τους. Χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή εργαλείων κοπής, σχηματισμού και διαμόρφωσης ενός υλικού προορισμένο για μια συγκεκριμένη χρήση. Οι πρώτοι εργαλειοχάλυβες ήταν απλοί ανθρακούχοι χάλυβες οι οποίοι από το 1868, και σε μεγαλύτερο βαθμό στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, άρχισαν να αντικαθίσταται από πιο σύνθετους, υψηλά κραματωμένους εργαλειοχάλυβες. Αυτοί οι πολύπλοκοι κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες οι οποίοι εμπεριέχουν, μεταξύ άλλων στοιχείων, σχετικά μεγάλες ποσότητες βολφραμίου, μολυβδαινίου, βαναδίου και χρωμίου ανταπεξέρχονται αποτελεσματικά στις ιδιαίτερα υψηλές λειτουργικές απαιτήσεις. Ταυτόχρονα, προσφέρουν καλό έλεγχο των διαστάσεων τους και ελευθερία από την εμφάνιση ρωγμών κατά τη θερμική τους επεξεργασία. Πολλοί κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες χρησιμοποιούνται ευρέως ως εξαρτήματα μηχανημάτων ή σε δομικές εφαρμογές με πολύ υψηλές απαιτήσεις. Ορισμένα τέτοια παραδείγματα είναι: ελατήρια υψηλών θερμοκρασιών, συζευκτήρες υψηλής αντοχής, βαλβίδες ειδικής χρήσης, κυάθια, επενδύσεις ανθεκτικές στη φθορά καθώς και έδρανα διαφόρων τύπων για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες.

Κατά τη λειτουργία τους οι περισσότεροι εργαλειοχάλυβες υπόκεινται σε εξαιρετικά υψηλά φορτία, τα οποία εφαρμόζονται γρήγορα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να αντέχουν αυτές τις πολυκυκλικές φορτίσεις χωρίς να σπάσουν και χωρίς να υποστούν υπερβολική φθορά ή παραμόρφωση. Κανένας εργαλειοχάλυβας δεν συνδυάζει ταυτόχρονα, μέγιστη αντοχή στη φθορά, μέγιστη ανθεκτικότητα και μέγιστη αντίσταση σε χαλάρωση. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου υλικού για μια δεδομένη εφαρμογή απαιτεί συχνά μια «ανταλλαγή» για να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικών ιδιοτήτων.

[1]

Αναφορικά με τη διαδικασία παραγωγής τους, οι περισσότεροι εργαλειοχάλυβες είναι σφυρήλατα προϊόντα. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να εφαρμοστεί και η διαδικασία της χύτευσης ακριβείας καθώς δίνει αρκετά πλεονεκτήματα. Για τους συνηθισμένους σφυρήλατους εργαλειοχάλυβες, οι πρώτες ύλες (συμπεριλαμβανομένων και «παλιοσίδερων») επιλέγονται προσεκτικά ως προς το ποσοστό κραμάτωσης αλλά και ως προς τις ιδιότητες προκειμένου να εξασφαλίσουν καθαρότητα και ομοιογένεια στο τελικό

προϊόν. Μια άλλη διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη παραγωγή εργαλειοχαλύβων είναι αυτή της κονιομεταλλουργίας. Αυτή η διεργασία δίνει καρβίδια τα οποία έχουν ένα ομοιόμορφο μέγεθος και διασπορά στην έκταση του εργαλειοχάλυβα, καθώς και ιδιαίτερες συνθέσεις οι οποίες είναι δύσκολο ή αδύνατον να παραχθούν με τήξη, χύτευση και τέλος μηχανική κατεργασία του χυτού προϊόντος. Ανεξάρτητα πάντως από τη διαδικασία παραγωγής τους, όλοι οι εργαλειοχάλυβες, με λίγες εξαιρέσεις, θα πρέπει να κατεργαστούν θερμικά προκειμένου να αναπτύξουν ένα συγκεκριμένο συνδυασμό αντοχής σε φθορά, αντοχής σε παραμόρφωση ή θραύση κατά την επιβολή υψηλών φορτίων και αντοχής σε χαλάρωση σε υψηλές θερμοκρασίες. [1]

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στο τρόπο ταξινόμησης των εργαλειοχαλύβων. Ο πολύ μεγάλος αριθμός τους, μπορεί να ταξινομηθεί αποτελεσματικά από το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σιδήρου και Χάλυβα (American Iron and Steel Institute-AISI). Αυτό το σύστημα είναι το σημείο αναφοράς για την επιλογή του κατάλληλου χάλυβα, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, από την πληθώρα των επιλογών που υπάρχουν. Αναλυτικότερα, το AISI ταξινομεί τους εργαλειοχάλυβες σε ομάδες βάσει επιφανών χαρακτηριστικών όπως: κραμάτωση (π.χ. βολφραμιούχοι ή μολυβδαινιούχοι ταχυχάλυβες), εφαρμογές (π.χ. εργαλειοχάλυβες ψυχρής ή θερμής εργασίας) και θερμικές κατεργασίες (π.χ. εργαλειοχάλυβες που έχουν υποστεί σκλήρυνση στο νερό ή στο λάδι). Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται εννιά κύριες ομάδες εργαλειοχαλύβων καθώς και το σύμβολο αναγνώρισής τους. [12]

Πίνακας 2: Ομάδες εργαλειοχαλύβων

<i>Group</i>	<i>Symbol</i>	<i>Type</i>
Water-hardening Tool steels	W	
Shock-resisting Tool steels	S	
Mould steels	P	P1-P19 low carbon types P20-P39 other types
Cold-work Tool steels	O	Oil-hardening
	A	Medium-alloy air-hardening
	D	High-carbon high chromium
Hot-work Tool steels	H	H1-H19 Chromium types H20-H39 Tungsten types H40-H59 Molybdenum types
High-speed steels	T	Tungsten types
	M	Molybdenum types
Special-purpose steels	L	Low-alloy
	F	Carbon-tungsten

#### 1.1.4 Εργαλειοχάλυβας H13

Ο εργαλειοχάλυβας που μελετάται στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο H13. Όπως είναι εμφανές και από το παραπάνω πίνακα, ο H13 ανήκει στη κατηγορία των εργαλειοχαλύβων θερμής εργασίας (Hot-work Tool steels) και ειδικότερα στην ομάδα των χρωμιούχων χαλύβων. Η ομάδα των χρωμιούχων χαλύβων είναι μια από τις τρεις ομάδες στις οποίες ταξινομούνται οι εργαλειοχάλυβες τύπου-H. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στη προσέγγιση που έχει ακολουθηθεί κατά τη κραματοποίηση των χαλύβων προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι υπόλοιπες δύο ομάδες είναι οι χάλυβες βολφραμίου θερμής εργασίας και οι χάλυβες μολυβδαινίου θερμής εργασίας. Όμως, παρά το διαχωρισμό τους στις τρεις παραπάνω ομάδες όλοι οι εργαλειοχάλυβες θερμής εργασίας θα πρέπει να διαθέτουν τα εξής γενικά χαρακτηριστικά: [12]

- Αντοχή σε παραμόρφωση στις θερμοκρασίες λειτουργίας
- Αντοχή σε θερμικούς και μηχανικούς αιφνιδιασμούς
- Αντοχή στη φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αντοχή σε παραμόρφωση κατά τις θερμικές κατεργασίες
- Κατεργασιμότητα
- Αντοχή στο φαινόμενο heat checking

Συγκεκριμένα, οι χρωμιούχοι χάλυβες θερμής εργασίας (H10-H19) παρουσιάζουν καλή αντοχή κατά την ανόπτηση τους λόγω της ύπαρξης του χρωμίου και άλλων καρβιδιογόνων στοιχείων όπως το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο και το βανάδιο.

Αύξηση του ποσοστού του βολφραμίου και του μολυβδαινίου συνεπάγεται αύξηση της εν θερμώ αντοχής του υλικού και την μικρή μείωση της δυσθραυστότητας του. Το βανάδιο προστίθεται για να αυξηθεί η αντοχή σε φθορά λόγω διάβρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Μια αύξηση στο ποσοστό του πυριτίου αυξάνει την αντοχή σε οξείδωση σε θερμοκρασίες μέχρι 800°C. Στη συγκεκριμένη κατηγορία, οι συνηθέστεροι τύποι χαλύβων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής: H11, H12, H13 και H19 (σε μικρότερη κλίμακα). Όλοι οι χρωμιούχοι χάλυβες θερμής εργασίας είναι χάλυβες βαθέως σκλήρυνσης. Οι χάλυβες H11, H12 και H13 μπορούν να σκληρυνθούν μέσω αέρα και να αποκτήσουν σκληρότητα που ανταποκρίνεται στη πλήρη κατάσταση λειτουργίας τους. Τεμάχια διαμέτρου μέχρι και



152mm τα οποία είναι κατασκευασμένα από τους παραπάνω τύπους χάλυβα μπορούν σκληρυνθούν μέσω αέρα. Τεμάχια κατασκευασμένα από άλλους χάλυβες τύπου H μπορούν να υποστούν σκλήρυνση μέσω αέρα και να έχουν διάμετρο μέχρι και 305mm. Η ιδιότητα της σκλήρυνσης μέσω αέρα καθώς και η ισορροπημένη περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία αυτών των χάλυβων έχουν σαν αποτέλεσμα τη χαμηλή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης. Οι χρωμιούχοι χάλυβες θερμής εργασίας είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για κάθε είδους εργασία θερμής μήτρας και πιο συγκεκριμένα, για μήτρες εξώθησης αλουμινίου και μαγνησίου, μήτρες χύτευσης, μήτρες σφυρηλάτησης και μαντρέλια. Οι περισσότεροι από αυτούς τους χάλυβες έχουν περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία και άνθρακα αρκετά χαμηλά, με αποτέλεσμα τα εργαλεία που κατασκευάζονται από αυτούς να μπορούν να ψύχονται με νερό κατά τη λειτουργία τους χωρίς να εμφανίζουν ρωγμές. [3]

Σε αυτό το σημείο θα γίνει αναφορά στον εργαλειοχάλυβα H13. Αναλυτικότερα, ο AISI H13 είναι ένας χάλυβας εξαιρετικά υψηλής αντοχής, με περιεκτικότητα 5% σε χρώμιο και ο οποίος είναι παρόμοιος με τον H11 σε σύσταση, θερμική κατεργασία και άλλες ιδιότητες. Η κύρια διαφορά στη σύσταση έγκειται στο γεγονός ότι ο H13 εμπεριέχει μεγαλύτερη ποσότητα βαναδίου. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη διασπορά των σκληρών καρβιδίων του βαναδίου το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της αντοχής σε φθορά. Επίσης, ο H13 έχει μια ελαφρώς ευρύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από το H11. Ανάλογα με τον παραγωγό, η περιεκτικότητα σε άνθρακα του H13 μπορεί να βρίσκεται κοντά στην υψηλή ή χαμηλή τιμή του αποδεκτού εύρους, με αντίστοιχη μεταβολή της αντοχής και της ολκιμότητας για μια δεδομένη θερμική κατεργασία. Όπως και ο H11, έτσι και ο H13 είναι ένας χάλυβας δευτερογενούς σκλήρυνσης. Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και διατηρεί υψηλή σκληρότητα και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η σκλήρυνσή του μπορεί να γίνει μέσω της ψύξης με αέρα. Ο χάλυβας H13 μπορεί να κατεργαστεί θερμικά αποκτώντας αντοχή άνω των 2070 MPa (300 ksi). Όπως και ο H11, έχει καλή ολκιμότητα και αντοχή σε κρούση. Κατά τη τυπική θερμική κατεργασία, η δυσθραυστότητα του H13 φαίνεται να είναι ακόμη χαμηλότερη από αυτή του H11. Ακόμα, ο H13 έχει καλή αντοχή σε θερμική κόπωση. Τα εργαλεία θερμής εργασίας που κατασκευάζονται από τον H13 μπορούν να ψύχονται με ασφάλεια με νερό μεταξύ των ενεργειών θερμής εργασίας. Η αντοχή του σε θερμική κόπωση, διάβρωση και φθορά το κατέστησαν ως ένα προτιμώμενο υλικό μήτρας για

χύτευση αλουμινίου και μαγνησίου, καθώς και για πολλές άλλες θερμικές εργασίες. Ωστόσο, ο H13 υπόκειται σε ψαθυροποίηση υδρογόνου. Η διαδικασία της νιτριδίωσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής του σε φθορά. Αν και ο H13 δεν έχει χρησιμοποιηθεί τόσο όσο ο H11 σαν δομικός χάλυβας υψηλής αντοχής, οι ομοιότητες στις ιδιότητες τους τον καθιστούν ως ένα εξίσου ελκυστικό υλικό για τέτοιες εφαρμογές. Τυπικές εφαρμογές θερμής εργασίας συνιστούν: μήτρες χύτευσης, ένθετα, πυρήνες, έμβολα, μήτρες σφυρηλάτησης, μήτρες εξώθησης, ομοιώματα τεμαχίων και μαντρέλια. Άλλα εργαλεία και δομικές εφαρμογές μπορεί να είναι: διατρήσεις, άξονες, δοκοί, ράβδοι στρέψης, καλύμματα και καστάνια. [3]

## 1.2 Θερμική Κατεργασία Εργαλειοχαλύβων

Σε αυτό το εδάφιο θα γίνει αναφορά στα στάδια που ακολουθούνται κατά τη θερμική κατεργασία των εργαλειοχαλύβων. Αναλυτικότερα, τα στάδια θερμικής επεξεργασίας τα οποία ακολουθούνται προκειμένου να αποκτήσει ο εκάστοτε εργαλειοχάλυβας την επιθυμητή μικροδομή είναι τα ακόλουθα:

- Ανόπτηση
- Ωστενιτοποίηση
- Βαφή
- Επαναφορά

Οι παραπάνω θερμικές κατεργασίες που αποτελούν τα κύρια στάδια της συμβατικής κατεργασίας σκλήρυνσης του χάλυβα περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

### 1.2.1 Ανόπτηση

Η διαδικασία της ανόπτησης περιλαμβάνει την αργή και ομοιόμορφη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού. Ο εργαλειοχάλυβας διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία για 1-4 ώρες επιτρέποντας έτσι τη πλήρη διεύδυση της θερμότητας. Εν συνεχεία, ακολουθεί η βραδεία ψύξη του με ελεγχόμενο ρυθμό, η οποία ολοκληρώνεται με ψύξη στον αέρα. [1]

Ο σκοπός της κατεργασίας ανόπτησης στους εργαλειοχάλυβες είναι η παραγωγή μίας μικροδομής αποτελούμενης από ομοιόμορφα διασκορπισμένα σφαιροειδή καρβίδια σε μια

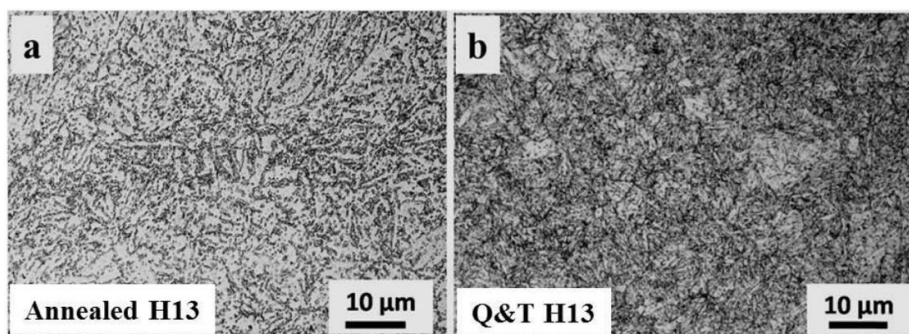
μήτρα φερρίτη. Μία τέτοια μικροδομή έχει χαμηλή σκληρότητα, πράγμα που την καθιστά μηχανικά κατεργάσιμη ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη φθορά στα εργαλεία κοπής. Επιπλέον, κατά την ανόπτηση γίνεται επιβελτίωση των χονδρόκοκκων δομών που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια εργασιών σε υψηλές θερμοκρασίες και εξάλειψη των μικροδομών του σκληρού μαρτενσίτη ή περλίτη που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί κατά τη ψύξη μετά από θερμές κατεργασίες. Τέλος, γίνεται ομογενοποίηση των επιπτώσεων της μη ομοιόμορφης παραμόρφωσης η οποία μπορεί να έχει αναπτυχθεί κατά την εν θερμώ κατεργασία βαρέων ή σύνθετων αντικειμένων. [7]

Οι εργαλειοχάλυβες συνήθως λαμβάνονται από τον προμηθευτή στην κατάσταση ανόπτησης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτή η κατάσταση επιτρέπει την εύκολη κατεργασία και θερμική επεξεργασία του χάλυβα. Ωστόσο, εάν υποβάλλονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ, θα πρέπει συχνά να υποβάλλονται σε πλήρη ανόπτηση πριν από τις επόμενες κατεργασίες. Εάν ένα εργαλείο πρέπει να ξανασκληρύνει, πρέπει πρώτα να υποστεί ανόπτηση. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική για τους χάλυβες με υψηλότερη περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία. Διαφορετικά, παρατηρείται ανομοιόμορφη ανάπτυξη κόκκων οδηγώντας έτσι σε μία δομή με κόκκους διαφόρων μεγεθών. [1]

Ο εργαλειοχάλυβας H13, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρέχεται από το προμηθευτή αφού έχει υποστεί ανόπτηση σφαιροποίησης (soft annealing). [15]

Συγκεκριμένα, αφού θερμανθεί στους 850°C, ψύχεται εντός του φούρνου μέχρι τους 650°C με ρυθμό 10°C/ώρα. Τέλος, ψύχεται ελεύθερα στον αέρα. [16]

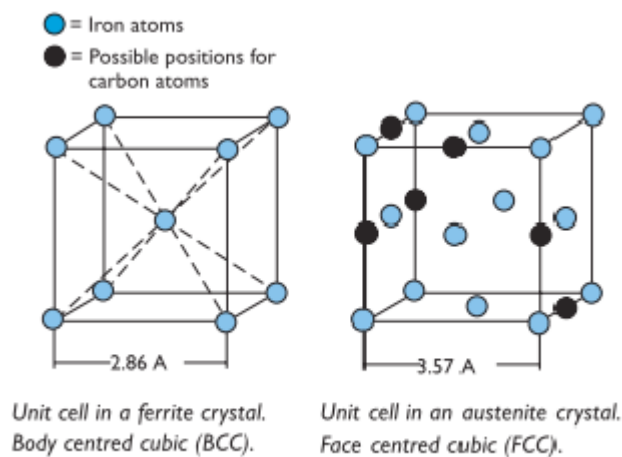
Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η δομή του εργαλειοχάλυβα H13 αφού έχει υποστεί ανόπτηση και αφού έχει γίνει βαφή και επαναφορά.



Εικόνα 1: Οπτική μικρογραφία εργαλειοχάλυβα H13 μετά από a) ανόπτηση και b) βαφή και επαναφορά

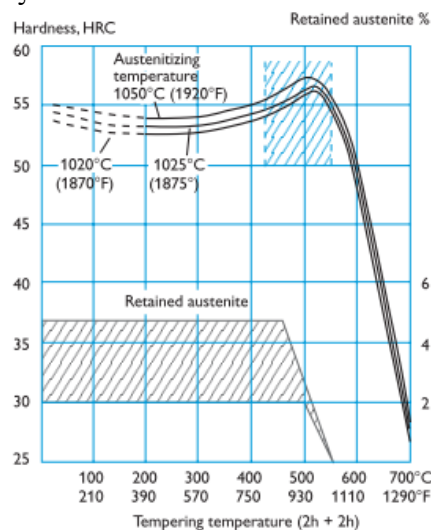
### 1.2.2 Ωστενιτοποίηση

Η ωστενιτοποίηση είναι η πιο κρίσιμη θερμική κατεργασία που πραγματοποιείται στους εργαλειοχάλυβες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ωστενίτης έχει το υψηλότερο όριο διαλυτότητας για άνθρακα και κραματικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, όταν ο χάλυβας θερμαίνεται στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, η μήτρα μετατρέπεται από φερρίτη σε ωστενίτη. Αυτό σημαίνει ότι τα άτομα του σιδήρου αλλάζουν τη θέση τους στο ατομικό πλέγμα και δημιουργούν ένα νέο πλέγμα με διαφορετική κρυσταλλικότητα. Η ενέργεια αυτή φαίνεται σχηματικά στην εικόνα που ακολουθεί. [15]



Εικόνα 2: Κρυσταλλικό πλέγμα φερρίτη και ωστενίτη

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, με την αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης αυξάνεται και η τελική σκληρότητα του εργαλειοχάλυβα μετά και το τέλος της διαδικασίας επαναφοράς.



Διάγραμμα 3: Σκληρότητα εργαλειοχάλυβα H13 συναρτήσει θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και επαναφοράς.

Υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης ή υπερβολικά μεγάλοι χρόνοι παραμονής μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες παραμορφώσεις, ασυνήθιστη ανάπτυξη των κόκκων, απώλεια ολκιμότητας και χαμηλή αντοχή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στους ταχυχάλυβες οι οποίοι ωστενιτοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία τήξης τους. Ομοίως, η ωστενιτοποίηση σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τις αποδεκτές μπορεί να προκαλέσει μείωση της αντοχής και χαμηλή αντοχή σε φθορά. Κατά τη βαφή του εργαλειοχάλυβα εάν το κέντρο του είναι πιο ψυχρό από το εξωτερικό, μπορεί να προκύψει αλλοίωση ή θραύση των γωνιών. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα με τους χάλυβες που σκληραίνουν με νερό. Πριν από τη θερμική κατεργασία, όλες οι επιφάνειες των εργαλειοχαλύβων πρέπει να είναι απαλλαγμένες από τυχόν απανθакώσεις. [1]

Η ωστενιτοποίηση είναι η θερμική κατεργασία στην οποία πραγματοποιείται ο τελικός διαχωρισμός των κραματικών στοιχείων μεταξύ της ωστενιτικής μήτρας (που αργότερα θα μετατραπεί σε μαρτενσίτη) και των υπολειπόμενων καρβιδίων. Αυτός ο διαχωρισμός καθορίζει τη χημεία, τη διασπορά των υπολειπόμενων καρβιδίων καθώς και τη κατ' όγκον περιεκτικότητα σε αυτά. Τα εναπομείναντα καρβίδια των κραματικών στοιχείων συμβάλλουν όχι μόνο στην αντοχή στη φθορά, αλλά και στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη. Όσο λεπτότερα είναι τα καρβίδια και όσο μεγαλύτερη είναι η κατ' όγκον περιεκτικότητα σε αυτά, τόσο πιο αποτελεσματικά ελέγχεται η αύξηση του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη. Έτσι, εάν η ωστενιτοποίηση πραγματοποιηθεί σε υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να προκληθεί ανεπιθύμητη ανάπτυξη κόκκων διότι, είτε το μέγεθος των καρβιδίων κραματικών στοιχείων αυξάνεται είτε αυτά διαλύονται στον ωστενίτη. [1]

Τα κραματικά στοιχεία τα οποία δεν είναι δεσμευμένα στα εναπομείναντα καρβίδια βρίσκονται σε διάλυμα στον ωστενίτη. Επομένως, τα καρβίδια αποτελούν ένα σημαντικό μηχανισμό κατά τον οποίο καθορίζεται η σύσταση του ωστενίτη. Ακολούθως, η σύσταση του ωστενίτη καθορίζει τη σκληρότητα, την θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, το ποσοστό του εναπομείναντα ωστενίτη καθώς και τη προοπτική της δευτερογενούς σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα. [1] Για τον εργαλειοχάλυβα H13 η ωστενιτοποίηση πραγματοποιείται μεταξύ 1020°C και 1050°C.

Παρόλα αυτά, οι συνηθισμένες τιμές είναι 1020-1030°C. Ο χρόνος παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία ορίζεται από το κατασκευαστή στα 30 λεπτά. [16]

### 1.2.3 Βαφή

Η όρος «βαφή» αναφέρεται στη διαδικασία της ταχείας ψύξης μεταλλικών εξαρτημάτων από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης ή τη θερμοκρασία επεξεργασίας του διαλύματος. Αυτή η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 815°C και 870°C για χάλυβες. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες και οι υψηλά κραματομένοι χάλυβες μπορεί να «βάφονται» προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η παρουσία των καρβιδίων στα όρια των κόκκων ή για να βελτιωθεί η κατανομή της φάσης του φερρίτη. Όμως, οι περισσότεροι χάλυβες, συμπεριλαμβανομένων των ανθρακούχων, των ελαφρά κραματομένων και των εργαλειοχαλύβων, «βάφονται» προκειμένου να αποκτήσουν μια ελεγχόμενη ποσότητα μαρτενσίτη στη μικροδομή τους. Επιτυχημένη σκλήρυνση σημαίνει συνήθως, την επίτευξη της απαιτούμενη μικροδομής, σκληρότητας, αντοχής ή δυσθραυστότητας ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις παραμένουσες τάσεις, τις παραμορφώσεις και τη πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών.

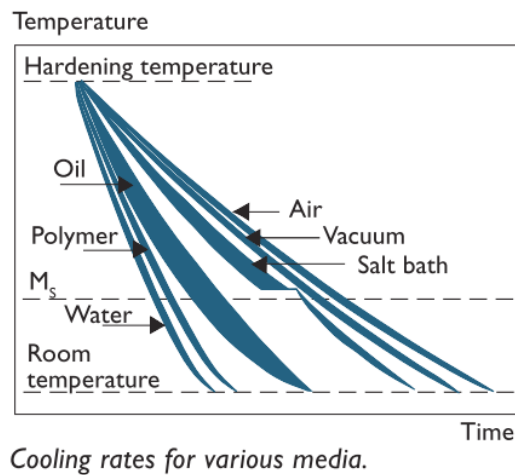
Η επιλογή το μέσου «βαφής» εξαρτάται από την εμβαπτότητα του υλικού, το πάχος, το σχήμα και το ρυθμό ψύξης που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη μικροδομή. Τα υγρά μέσα βαφής τα οποία χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι: [1]

- Λάδι που μπορεί να περιέχει διάφορα πρόσθετα
- Νερό
- Πολυμερή υδατικά διαλύματα
- Νερό που μπορεί να περιέχει αλάτι ή καυστικά πρόσθετα

Άλλα μέσα «βαφής» μπορεί να είναι:

- Αέρας
- Αδρανή αέρια (ήλιο, αργό και άζωτο)

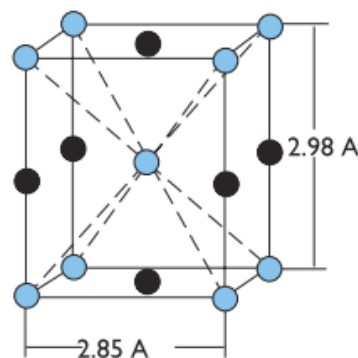
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται συγκριτικά ο ρυθμός ψύξης για ορισμένα από τα παραπάνω μέσα «βαφής».



Διάγραμμα 4: Ρυθμός ψύξης ορισμένων μέσων «βαφής»

Εάν ο χάλυβας «βαφεί» αρκετά γρήγορα κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης, δεν πραγματοποιείται η μετατροπή του ωστενίτη σε φερρίτη, όπως γίνεται στη περίπτωση της απόπτησης, καθώς τα άτομα άνθρακα δεν έχουν το χρόνο να αναδιαταχθούν. Αντ' αυτού, παραμένουν ακίνητα σε θέσεις όπου πραγματικά δεν έχουν αρκετό χώρο. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία υψηλών τιμών μικροτάσεων, που συμβάλλουν στην αύξηση της σκληρότητας. Αυτή η σκληρή δομή ονομάζεται μαρτενσίτης. Έτσι, ο μαρτενσίτης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εξαναγκασμένο διάλυμα άνθρακα σε φερρίτη.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη.



Unit cell in a martensite crystal.  
Tetragonal.

Εικόνα 3: Τετραγωνικό χωροκεντρωμένο πλέγμα μαρτενσίτη.



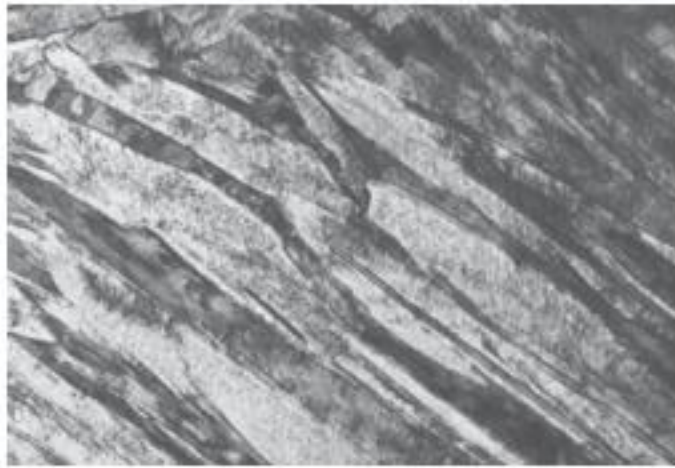
Η μαρτενσιτική φάση εμφανίζεται ως:

- Μαρτενσίτης σε πλάκες, κυρίως στους χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα ( $>1.3\%$ ). Ένα τυπικό παράδειγμα μαρτενσίτη σε μορφή πλακών φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 4: Μαρτενσίτης σε μορφή πλακών.*

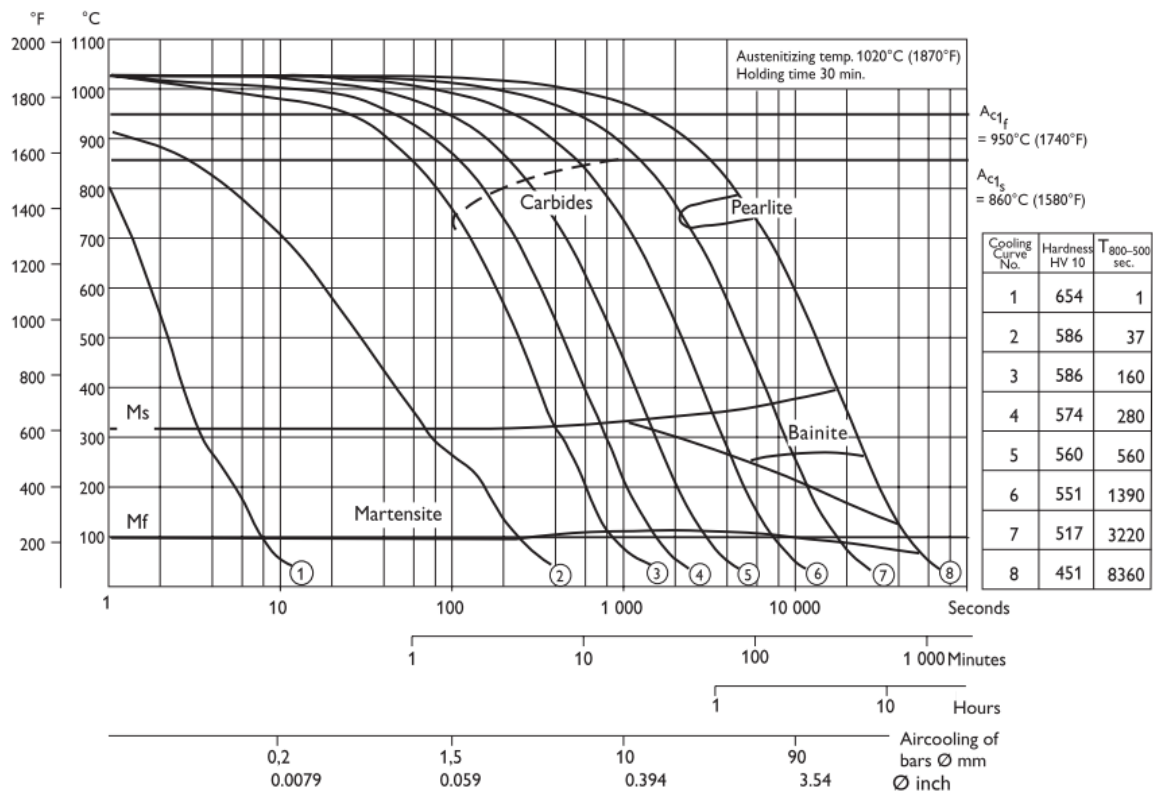
- Μαρτενσίτης σε βελόνες, κυρίως στους χάλυβες με χαμηλή ή μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα ( $\leq 0.5\%$ ).



*Εικόνα 5: Μαρτενσίτης σε μορφή βελόνων*

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι διάφορες δομές που μπορεί να αποκτήσει ο εργαλειοχάλυβας H13, μετά από ωστενιτοποίηση στους  $1020^{\circ}\text{C}$  για 30 λεπτά, για διάφορους ρυθμούς απόψυξης. Τα διαγράμματα αυτά καλούνται *διαγράμματα συνεχούς βαφής* ή *διαγράμματα CCT (Continuous Cooling Transformation)*.





Διάγραμμα 5: Διάγραμμα CCT εργαλειοχάλυβα H13

Κατά τη σκλήρυνση του χάλυβα η μήτρα δεν μετατρέπεται πλήρως σε μαρτενσίτη. Υπάρχει πάντα κάποια ποσότητα ωστενίτη που παραμένει στη δομή του χάλυβα και ονομάζεται υπολειπόμενος ωστενίτης. Η ποσότητα αυτή αυξάνεται όσο υψηλότερη είναι, η περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία, η θερμοκρασία σκλήρυνσης, η χρόνος παραμονής στη θερμοκρασία σκλήρυνσης και όσο ταχύτερη είναι η διαδικασία της «βαφής». Μετά την «βαφή», ο χάλυβας έχει μικροδομή που αποτελείται από μαρτενσίτη, υπολειπόμενο ωστενίτη και καρβίδια. Αυτή η δομή εμπεριέχει εγγενείς τάσεις η οποίες μπορούν εύκολα να προκαλέσουν ρωγμές. [15]

Οι εργαλειοχάλυβες οι οποίοι θα σκληρύνουν μέσω της ψύξης με αέρα, συνήθως υπόκεινται σε θερμή «βαφή» μέχρι τη θερμοκρασία των 540 έως 650 °C μετά την ωστενιτοποίηση. Ο χρόνος «βαφής» είναι αρκετός προκειμένου να ξεκινήσει η αποσύνθεση του ωστενίτη. Μετά την εν θερμώ «βαφή», οι χάλυβες ψύχονται μέσω αέρα ή «βάφονται» σε λάδι μέχρι να φτάσουν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση του υλικού χωρίς να επηρεαστεί δυσμενώς η σκληρότητα του. [1]

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι, όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη δομή του χάλυβα κατά τη «βαφή» στηρίζονται στο φαινόμενο του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Όπως συνεπάγεται και από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός εκδηλώνεται κατά την απόψυξη, με την πρακτικά ακαριαία και έντονη εμφάνιση της νέας φάσης, από μια θερμοκρασία και κάτω, που ονομάζεται θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ( $M_s$ ). Η μαρτενσιτική φάση σχηματίζεται αμέσως μόλις αποκτηθεί αυτή η θερμοκρασία και δε συνεχίζεται με ισοθερμοκρασιακού τύπου συνθήκες. Προκειμένου να συνεχιστεί ο μετασχηματισμός, θα πρέπει να ελαττωθεί εκ νέου η θερμοκρασία. Ο μετασχηματισμός συνεχίζεται με σχηματισμό του μαρτενσίτη σε νέες περιοχές και όχι με ανάπτυξη των προηγούμενα σχηματισθέντων μαρτενσιτικών περιοχών. Με  $M_F$  παριστάνεται η θερμοκρασία του τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. [40].

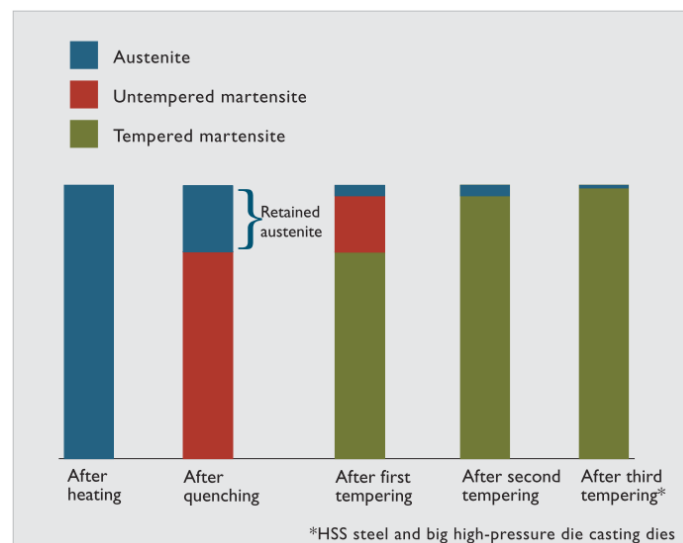
Τέλος, οι μαρτενσιτικοί μετασχηματισμοί διακρίνονται από τους υπόλοιπους μετασχηματισμούς, τόσο στο επίπεδο της κινητικής όσο και στο επίπεδο της δομής. Σε επίπεδο κινητικής, είναι ανεξάρτητοι της διάχυσης και οι κρύσταλλοι της νέας φάσης αναπτύσσονται κατά ένα σχεδόν ημιακαριαίο τρόπο στο εσωτερικό ορισμένων σημείων του συνολικού όγκου και σύμφωνα με ορισμένες προνομιούχες διευθύνσεις της αρχικής φάσης. Σε επίπεδο δομής, διακρίνονται από την ύπαρξη μιας σχέσης προσανατολισμού μεταξύ της αρχικής και τελικής φάσης. [40].

#### 1.2.4 Επαναφορά

Η «επαναφορά» είναι το τελευταίο στάδιο της θερμικής κατεργασίας του χάλυβα. Κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία, ο προηγούμενα σκληρυμένος ή ανοπτημένος χάλυβας θερμαίνεται συνήθως σε μια θερμοκρασία κάτω από τη κρίσιμη θερμοκρασία και στη συνέχεια ψύχεται με κατάλληλο ρυθμό, προκειμένου να αυξηθεί η ολκιμότητα του, η δυσθραυστότητα του αλλά και το μέγεθος των κόκκων της μήτρας. Η επαναφορά του χάλυβα γίνεται με αναθέρμανση μετά την σκλήρυνσή του για να αποκτήσει συγκεκριμένες

τιμές μηχανικών ιδιοτήτων, για την ανακούφισή του από τις τάσεις που προέκυψαν κατά το στάδιο της «βαφής» και για τη διασφάλιση της διαστασιακής του σταθερότητας. [1]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μετά το στάδιο της «βαφής» ο χάλυβας διαθέτει μικροδομή που αποτελείται από μαρτενσίτη, υπολειπόμενο ωστενίτη και καρβίδια. Μετά από μία «επαναφορά» σε υψηλή θερμοκρασία, η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από μαρτενσίτη μετά από επαναφορά, νέο-σχηματισθέν μαρτενσίτη, ένα ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη και καρβίδια. [15] Για τους εργαλειοχάλυβες απαιτούνται συνήθως δύο επαναφορές, εκτός από τις περιπτώσεις εξαρτημάτων με μεγάλες διατομές και πολύπλοκες γεωμετρίες ή αυξημένων απαιτήσεων σε διαστασιακή σταθερότητα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται συνήθως και τρίτη επαναφορά. Η δεύτερη επαναφορά φροντίζει το νέο-σχηματισθέν μαρτενσίτη που δημιουργήθηκε μετά την ψύξη από την πρώτη επαναφορά. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται σχηματικά η αλλαγή της μικροδομής του εργαλειοχάλυβα κατά τη διάρκεια των επαναφορών. [15]



Διάγραμμα 6: Εξέλιξη μικροδομής εργαλειοχάλυβα κατά τη διάρκεια των επαναφορών.

Οι μεταβλητές που σχετίζονται με το στάδιο της «επαναφοράς» και οι οποίες επηρεάζουν τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα μετά το τέλος της κατεργασίας είναι:

- Η θερμοκρασία επαναφοράς
- Η διάρκεια της επαναφοράς
- Ο ρυθμός ψύξης από τη θερμοκρασία επαναφοράς

- Η σύσταση του χάλυβα, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού άνθρακα, του ποσοστού των κραματικών και των υπολειμματικών στοιχείων

Η θερμοκρασία και ο χρόνος είναι αλληλεξαρτώμενες μεταβλητές κατά τη διαδικασία επαναφοράς. Εντός κάποιων ορίων, συνήθως η μείωση της θερμοκρασίας και η αύξηση του χρόνου μπορεί να επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα με την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση του χρόνου. Ωστόσο, οι μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση από τις μικρές αλλαγές χρόνου στις τυπικές κατεργασίες επαναφοράς.

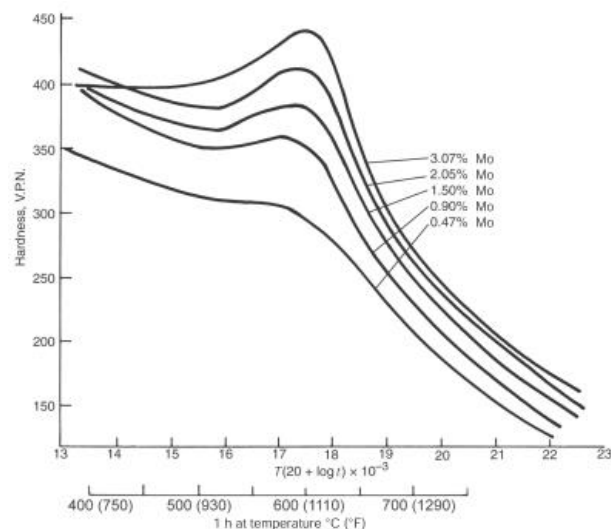
[1]

Κατά την επιλογή της θερμοκρασίας επαναφοράς θα πρέπει να λαμβάνονται πρωτίστως υπόψιν οι μηχανικές ιδιότητες. Τόσο οι μηχανικές όσο και οι φυσικές ιδιότητες που αποκτώνται μετά το πέρας της κατεργασίας εξαρτώνται κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία επαναφοράς. Η επαναφορά σε υψηλές θερμοκρασίες έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ποσοστού υπολειπόμενου ωστενίτη συγκριτικά με την επαναφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, το υλικό θα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη και βελτιωμένη διαστασιακή σταθερότητα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι, η επαναφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζει μόνο το μαρτενσίτη στη δομή του χάλυβα, ενώ η επαναφορά σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζει επιπλέον και τον υπολειπόμενο ωστενίτη. Κατά την επαναφορά σε υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται και άλλες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού όπως υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, η επαναφορά ισχυρά κραματωμένων χαλύβων σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί την κατακρήμνιση δευτερογενών καρβιδίων. Αυτό θα είναι επιζήμιο στην αντοχή του σε διάβρωση αλλά θα λειτουργήσει ευεργετικά στην αντοχή του στη φθορά. [15]

Σε ένα «βαμμένο» χάλυβα ο οποίος διαθέτει μια μικροδομή αποτελούμενη κατά ένα μεγάλο ποσοστό από μαρτενσίτη, το κρυσταλλικό πλέγμα βρίσκεται υπό τάση από τα άτομα του άνθρακα, πράγμα που προκαλεί την χαρακτηριστική αυξημένη σκληρότητα των «βαμμένων» χαλύβων. Για τον λόγο αυτό, η παραπάνω φάση είναι ιδιαίτερα ασταθής. Κατά την θέρμανση λοιπόν, τα άτομα άνθρακα διαχέονται και αντιδρούν κατά μια σειρά διακριτών βημάτων προς δημιουργία σεμεντίτη ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ή κάποιου άλλου καρβιδίου κραματικού στοιχείου σε μήτρα φερρίτη προκαλώντας σταδιακή μείωση των εσωτερικών τάσεων. Αυτές οι αλλαγές στη μικροδομή μειώνουν συνήθως τη σκληρότητα, την αντοχή σε εφελκυσμό και το όριο διαρροής αλλά αυξάνουν την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα.

[1] Αυξανόμενης της θερμοκρασίας επαναφοράς, παρατηρείται ταχύτερη διόγκωση του σεμεντίτη οδηγώντας έτσι στη περαιτέρω μείωση της σκληρότητας του χάλυβα. Παρόλα αυτά, εάν ο χάλυβας διαθέτει επαρκή ποσότητα καρβιδιογόνων στοιχείων, δεν επιτυγχάνεται μόνο η επιβράδυνση της μαλάκυνσής του αλλά αντιθέτως παρατηρείται αύξηση της σκληρότητάς του. Αυτό οφείλεται στη δημιουργία λεπτών καρβιδίων κραματικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες επαναφοράς. Αυτή η αύξηση της σκληρότητας αναφέρεται συχνά και ως *δευτερογενής σκλήρυνση*. Το φαινόμενο της δευτερογενούς σκλήρυνσης εμφανίζεται μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες επαναφοράς, διότι ο σχηματισμός των καρβιδίων κραματικών στοιχείων εξαρτάται από τη διάχυση των καρβιδιογόνων στοιχείων. Αυτή η διαδικασία είναι πιο αργή συγκριτικά με τη διάχυση του άνθρακα και του σιδήρου. [7]

Η μέγιστη τιμή της σκληρότητας που σχετίζεται με τη δευτερογενή σκλήρυνση εμφανίζεται περίπου στους 500°C και αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε κραματικά στοιχεία. Επίσης, εξαρτάται από την ισορροπία των εναπομείναντων καρβιδίων, τον υπολειπόμενο ωστενίτη και τη σύνθεση του μαρτενσίτη μετά το στάδιο της «βαφής». Ακόμα, στους εργαλειοχάλυβες H13, η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα του μαρτενσίτη αντισταθμίζει τις επιπτώσεις στη σκληρότητα της αυξημένης περιεκτικότητας σε υπολειπόμενο ωστενίτη, όπως αυτή προκύπτει μετά την ωστενιτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες. [7] Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της σκληρότητας για έναν χάλυβα, συναρτήσει της περιεκτικότητας του σε κραματικά στοιχεία, στη συγκεκριμένη περίπτωση το μολυβδαίνιο, καθώς και της θερμοκρασίας επαναφοράς.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα επαναφοράς χάλυβα συναρτήσει  $\theta$ .Ε και περιεκτικότητας σε Mo

Στο παρακάτω πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά όλες οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη δομή του χάλυβα κατά τη διάρκεια της «επαναφοράς» του συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς.

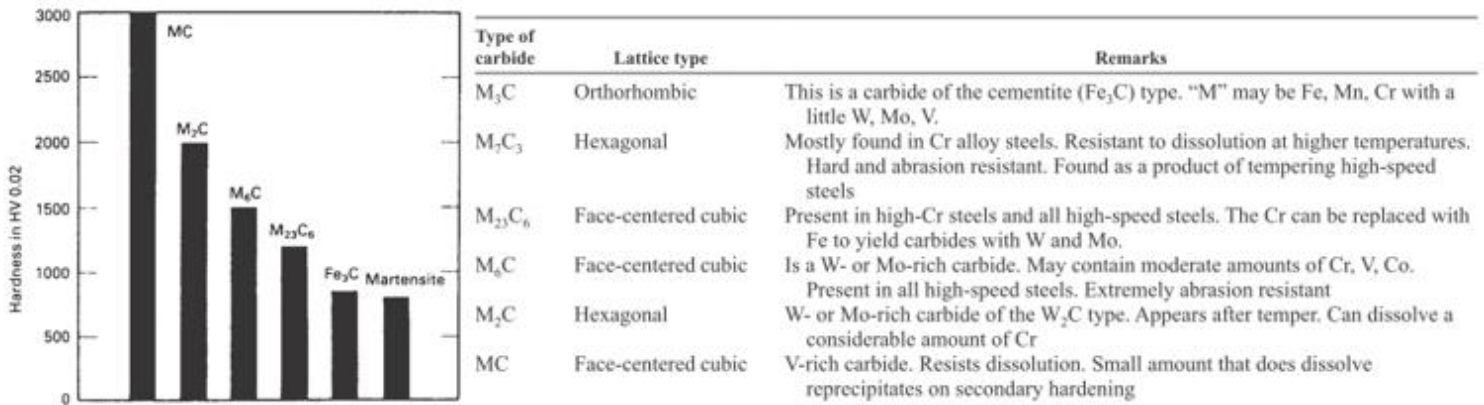
Πίνακας 3: Αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επαναφοράς του χάλυβα

Temperature range		Reaction and symbol (if designated)	Comments
°C	°F		
-40 to 100	-40 to 212	Clustering of two to four carbon atoms on octahedral sites of martensite (A1); segregation of carbon atoms to dislocations and boundaries	Clustering is associated with diffuse spikes around fundamental electron diffraction spots of martensite
20 to 100	70 to 212	Modulated clusters of carbon atoms on (102) martensite planes (A2)	Identified by satellite spots around electron diffraction spots of martensite
60 to 80	140 to 175	Long period ordered phase with ordered carbon atoms (A3)	Identified by superstructure spots in electron diffraction patterns
100 to 200	212 to 390	Precipitation of transition carbide as aligned 2 nm (0.08 μin.) diam particles (T1)	Recent work identifies carbides as η (orthorhombic, Fe <sub>2</sub> C); earlier studies identified the carbides as ε (hexagonal, Fe <sub>2,4</sub> C).
200 to 350	390 to 660	Transformation of retained austenite to ferrite and cementite (T2)	Associated with tempered-martensite embrittlement in low- and medium-carbon steels
250 to 700	480 to 1290	Formation of ferrite and cementite; eventual development of well-spheroidized carbides in a matrix of equiaxed ferrite grains (T3)	This stage now appears to be initiated by χ-carbide formation in high-carbon Fe-C alloys.
500 to 700	930 to 1290	Formation of alloy carbides in chromium-, molybdenum-, vanadium- and tungsten-containing steels. The mix and composition of the carbides may change significantly with time (T4).	The alloy carbides produce secondary hardening and pronounced retardation of softening during tempering or long-time service exposure around 500 °C (930 °F).
350 to 550	660 to 1020	Segregation and cosegregation of impurity and substitutional alloying elements	Responsible for temper embrittlement

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, σε θερμοκρασίες μεταξύ 100-200°C παρατηρείται η κατακρήμνιση των μεταβατικών καρβιδίων. Τα καρβίδια αυτά περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα άνθρακα από τον σεμεντίτη (Fe<sub>3</sub>C), ο οποίος δημιουργείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. [7] Στους εργαλειοχάλυβες, η μεγάλη ποσότητα σε κραματικά στοιχεία συμβάλει στη σταθεροποίηση των παραπάνω μεταβατικών καρβιδίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τη παρουσία τους σε ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες επαναφοράς. [28]

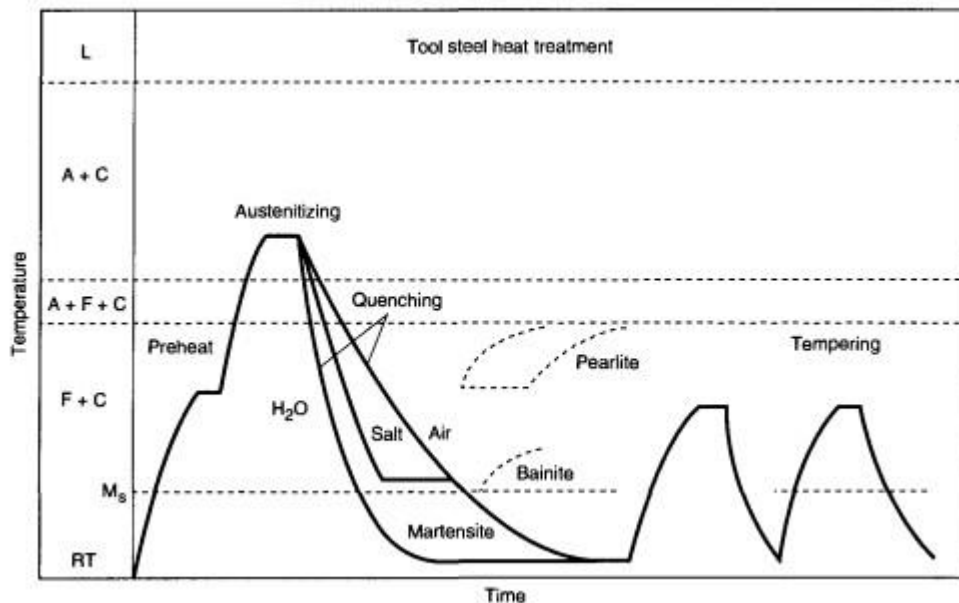
Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι οι ιδιότητες του χάλυβα μετά την κατεργασία της επαναφοράς καθορίζονται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος, το σχήμα, τη σύνθεση και τη κατανομή των καρβιδίων που σχηματίζονται, με σχετικά μικρή συμβολή από τη σκλήρυνση του στερεού διαλύματος του φερρίτη. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα διάφορα ήδη καρβιδίων που μπορούν να δημιουργηθούν στη δομή του χάλυβα καθώς και η σκληρότητα τους. [1]





Διάγραμμα 8: Είδη καρβιδίων, δομή και σκληρότητά τους

Συνοψίζοντας, παρατίθεται στη συνέχεια το διάγραμμα με τα στάδια της θερμικής κατεργασίας του εργαλειοχάλυβα.



Διάγραμμα 9: Στάδια θερμικής κατεργασίας εργαλειοχάλυβα

### 1.3 Κρυογενική Κατεργασία Εργαλειοχάλυβων

Η εν ψυχρό κατεργασία του χάλυβα είναι ευρέως αποδεκτή στο επάγγελμα της μεταλλουργίας ως μια επιπρόσθετη κατεργασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ενισχυθεί ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη και να βελτιωθεί η χαλάρωση

των τάσεων σε χυτά αλλά και κατεργασμένα αντικείμενα. Η εν ψυχρό κατεργασία του χάλυβα συνιστά τη έκθεση του φερριτικού υλικού σε υπομηδενικές θερμοκρασίες προκειμένου να ενισχύσει ορισμένες καταστάσεις του υλικού ή να του προσδώσει ορισμένες ιδιότητες. Αυξημένη αντοχή, μεγαλύτερη σταθερότητα στις διαστάσεις και στη μικροδομή, βελτιωμένη αντίσταση στη φθορά και χαλάρωση των εναπομειναντων τάσεων είναι μερικά από τα αποτελέσματα της εν ψυχρό κατεργασίας του χάλυβα. Γενικά, 1 ώρα εν ψυχρό κατεργασίας για κάθε ίντσα της εγκάρσιας τομής του υλικού είναι επαρκής προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Κοινές πρακτικές καθιστούν τη θερμοκρασία των  $-84^{\circ}\text{C}$  ( $-120^{\circ}\text{F}$ ) ως τη πλέον ιδανική θερμοκρασία για την εν ψυχρό κατεργασία. [1]

Παρόλα αυτά, υπάρχουν αποδείξεις βάσει των οποίων η κρυογενική κατεργασία του χάλυβα, κατά την οποία το υλικό ψύχεται στη θερμοκρασία των  $-196^{\circ}\text{C}$  ( $-310^{\circ}\text{F}$ ), βελτιώνει κάποιες από τις ιδιότητες του, περεταίρω από τη βελτίωση που επιτυγχάνεται στην εν ψυχρό κατεργασία. Η συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της κρυογενικής θερμοκρασίας είναι η χρήση συστημάτων υγρού αζώτου. Τα δύο κυριότερα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω.

- Εναλλάκτης θερμότητας: Το συγκεκριμένο σύστημα διοχετεύει υγρό άζωτο σε έναν εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια το αέριο το οποίο παράγεται οδηγείται στο κύριο αγωγό αερίου αζώτου. Ο αέρας ο οποίος υπάρχει εντός του κρυογενικού θαλάμου αναρροφάται από ανεμιστήρες και πέρνα μέσα από τα σπειρώματα του εναλλάκτη θερμότητας. Σε κάποιες παραλλαγές του συγκεκριμένου συστήματος, η ψύξη ενισχύεται μέσω του ψεκασμού υγρού αζώτου κατευθείαν εντός του κρυογενικού θαλάμου.
- Σύστημα άμεσου ψεκασμού: Σε αυτό το σύστημα, υγρό άζωτο ψεκάζεται άμεσα εντός του κρυογενικού θαλάμου ενώ ταυτόχρονα ένας ανεμιστήρας προκαλεί τη κυκλοφορία των αερίων. Σε αυτό το σύστημα το αέριο το οποίο καταναλίσκεται δε μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου εντός του θαλάμου. Ταυτόχρονα ο σχεδιασμός του συστήματος δεν επιτρέπει την άμεση επαφή του προς κατεργασία τεμαχίου με το υγρό άζωτο, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης θερμικού σοκ.

Και στα δύο παραπάνω συστήματα, ελεγκτές θερμότητας χρησιμοποιούνται προκειμένου να ελεγχτεί η ροή του υγρού αζώτου (μέσω μιας σωληνοειδούς βαλβίδας) καθώς και η



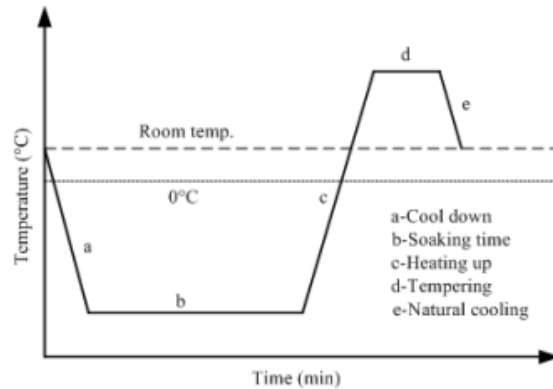
θερμοκρασία. Τα διαγράμματα Θερμοκρασίας-Χρόνου του κύκλου ψύξης αποτελούν καταγραφή της εκάστοτε διαδικασίας. Έτσι, η τυπική κρυογενική κατεργασία περιλαμβάνει την αργή ψύξη του υλικού ( $\sim 2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , ή  $4.5^{\circ}\text{F}/\text{min}$ ) από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου. Όταν το υλικό φτάσει στη θερμοκρασία των 80K ( $-310^{\circ}\text{F}$ ), διατηρείται εκεί για ένα ικανοποιητικό χρονικό διάστημα (συνήθως 12 ώρες). Μετά το πέρας του χρόνου παραμονής, το υλικό βγαίνει από το υγρό άζωτο και αφήνεται να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Μέσω της διεξαγωγής του παραπάνω κύκλου ψύξης σε αέριο άζωτο, γίνεται ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται και το θερμικό σοκ στο υλικό. Συνήθως, μετά τη παραπάνω διαδικασία ακολουθεί ένα κύκλος επαναφοράς του υλικού προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή του στη κρούση. Ανάλογα βέβαια και με το είδος του υλικού, μπορεί να ακολουθήσουν ακόμα ένας ή δύο κύκλοι επαναφορών. [1]

Γενικά, είναι επιθυμητή η εξολοκλήρου μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη πριν από τη διαδικασία της επαναφοράς. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης, σε έναν εργαλειοχάλυβα, μετά τη διαδικασία της βαφής μπορεί να μετατραπεί σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της εργασίας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τοπική παραμόρφωση και ψαθυρότητα του υλικού λόγω της παρουσίας μαρτενσίτη που δεν έχει υποστεί επαναφορά. Ως εκ τούτου, η απαίτηση για μέγιστη σταθερότητα στις διαστάσεις κατά την διάρκεια των εργασιών με το συγκεκριμένο είδος χάλυβα συνεπάγεται την εξάλειψη του υπολειπόμενου ωστενίτη. Από πρακτικής άποψης βέβαια, οι εκάστοτε συνθήκες διαφέρουν και άρα 100% μετατροπή επιτυγχάνεται σπάνια, εάν όχι και καθόλου. [1]

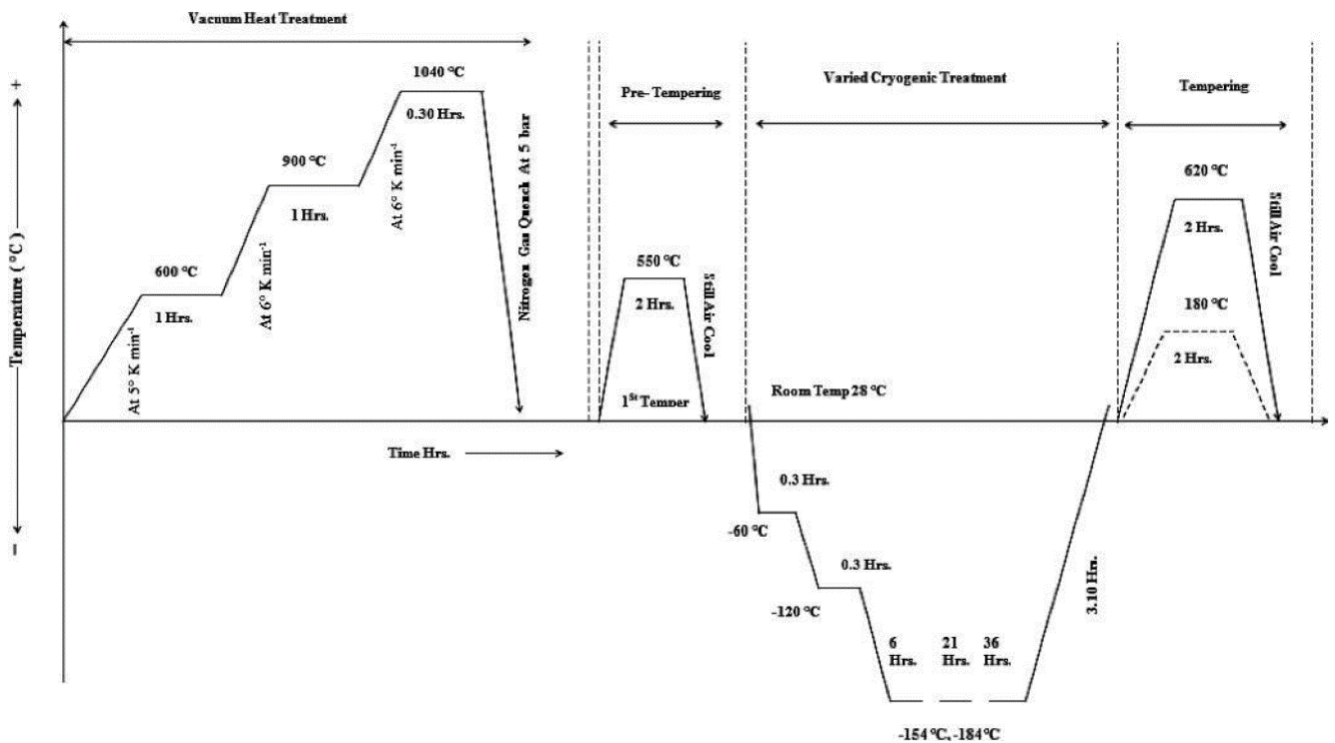
Μετά από την εκτενή ψύξη του υλικού, επιπλέον έκθεση σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν επιφέρει κάποια επιπλέον αποτελέσματα. Όταν όμως χρησιμοποιείται θερμότητα, η θερμοκρασία αλλά και ο χρόνος παραμονής είναι παράμετροι υψίστης σημασίας. Στη κατεργασία εν ψυχρό, υλικά διαφορετικών συνθέσεων αλλά και διατάξεων μπορούν να ψυχθούν την ίδια χρονική στιγμή, παρόλο που μπορεί να έχουν διαφορετικά σημεία μετασχηματισμού σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του ψυχθέντος υλικού είναι ελάσσονος σημασίας εφόσον διατηρείται η ομοιογένειά του. Σε αντίθεση με τη παραπάνω πρόταση, ο ρυθμός ψύξης του θερμαινόμενου υλικού, επηρεάζει καθοριστικά το τελικό αντικείμενο. Ειδικότερα, ο σχηματισμός του μαρτενσίτη κατά τη

θερμική κατεργασία προϋποθέτει άμεση ψύξη προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η αποσύνθεση του ωστενίτη δεν θα οδηγήσει στο σχηματισμό μπαινίτη και σεμενίτη. [1]

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται μεμονωμένα ένας τυπικός κύκλος κρυογενικής κατεργασίας καθώς και ένα παράδειγμα πλήρους θερμικής κατεργασίας του εργαλειοχάλυβα H13 στην οποία συμπεριλαμβάνεται και το στάδιο της κρυογενικής.



Εικόνα 6: Κύκλος κρυογενικής κατεργασίας.



Εικόνα 7: Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης εργαλειοχάλυβα H13.

Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορες μελέτες και εργασίες που έχουν γίνει με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η κρυογενική κατεργασία στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων.

### 1.3.1 Μελέτες σε διάφορους εργαλειοχάλυβες.

Στη μελέτη που έγινε από τον D.M. Sandhi και τους συνεργάτες του, [13] εξετάστηκε η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων M1 και S7. Αναλυτικότερα, επτά δοκίμια διατάσεων 55x10x10 mm τα οποία διέθεταν και μια γωνία εγκοπής 45° ελήφθησαν για κάθε έναν από τους δύο τύπους εργαλειοχαλύβων. Η χημική σύνθεση των δύο υλικών φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 4: Σύνθεση εργαλειοχάλυβα S7.*

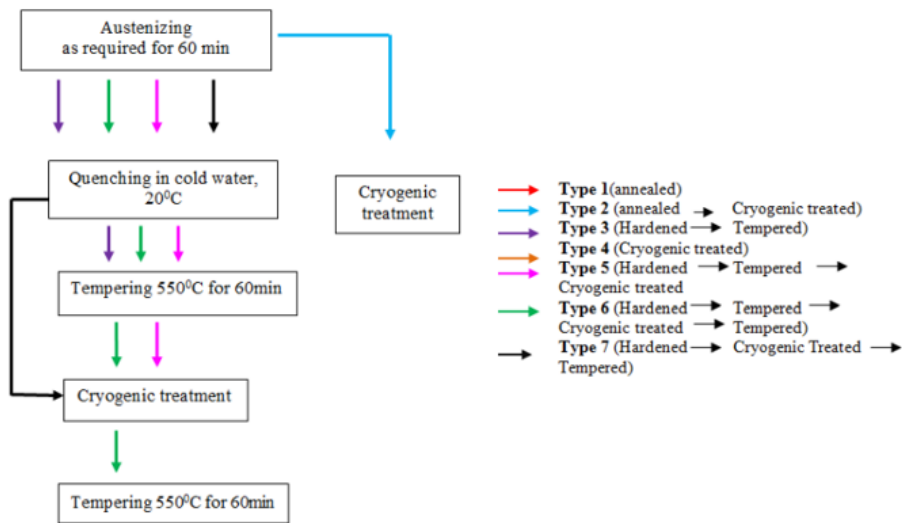
C	Si	Mn	V	Mo
0.500	0.250	0.700	3.250	1.400

*Πίνακας 5: Σύνθεση εργαλειοχάλυβα M1.*

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.78	0.20	0.15	Max	Max	3.50	8.20
0.88	0.50	0.40	0.030	0.030	4.00	9.20

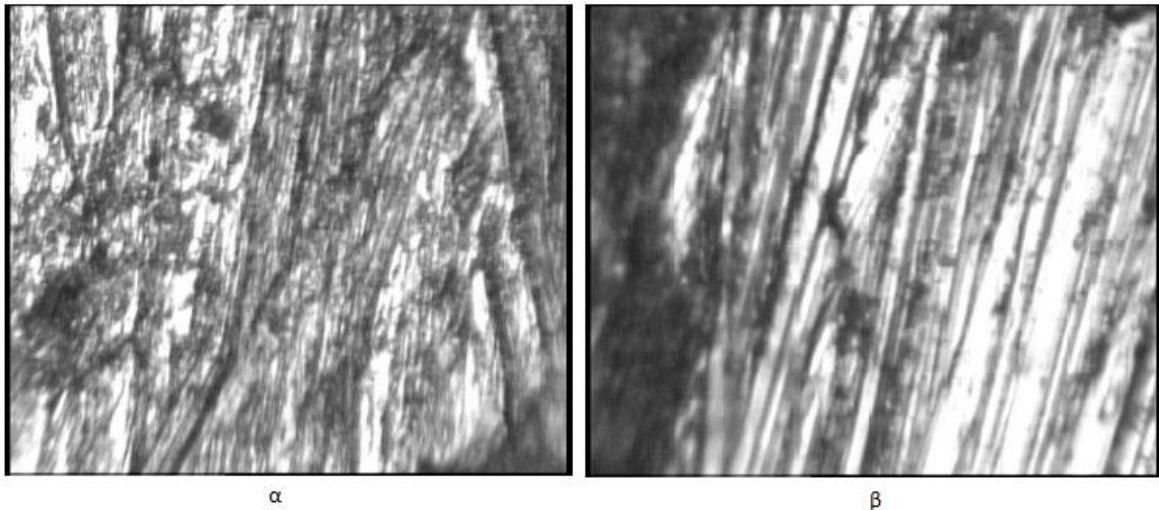
Σε κάθε ένα από τα επτά δοκίμια ακολουθήθηκε μια διαφορετική θερμική κατεργασία. Ειδικότερα, τα δοκίμια από τον εργαλειοχάλυβα M1 θερμάνθηκαν αργά και ομοιόμορφα εντός κλιβάνου, στη θερμοκρασία των 815°C. Ο χρόνος παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία ήταν 1 ώρα. Η διαδικασία της βαφής των δοκιμίων έγινε σε ένα λουτρό από κρύο νερό μέχρις ότου η θερμοκρασία τους να φτάσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος, έγινε η επαναφορά τους σε θερμοκρασία 550°C για 1 ώρα και ψύξη αυτών στον αέρα μέχρι να έλθουν ξανά σε θερμοκρασία δωματίου. Για το δοκίμιο από τον εργαλειοχάλυβα S7 ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με μόνη διαφορά την αρχική θερμοκρασία θέρμανσης του υλικού. Στη προκειμένη περίπτωση ήταν 820°C. Για τα δοκίμια τα οποία κατεργάστηκαν κρυογενικώς, η διαδικασία περιλάμβανε την αργή ψύξη τους για 3 ώρες μέχρι τη θερμοκρασία των -196°C, τη παραμονή τους σε αυτή τη θερμοκρασία για 24 ώρες και στη συνέχεια την αργή θέρμανσή τους για 6 ώρες μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Στην

εικόνα που ακολουθεί φαίνονται σχηματικά οι θερμικές κατεργασίες τις οποίες υπέστησαν τα εφτά δοκίμια για το κάθε υλικό που μελετάται.



Εικόνα 6: Θερμική κατεργασία δοκιμίων.

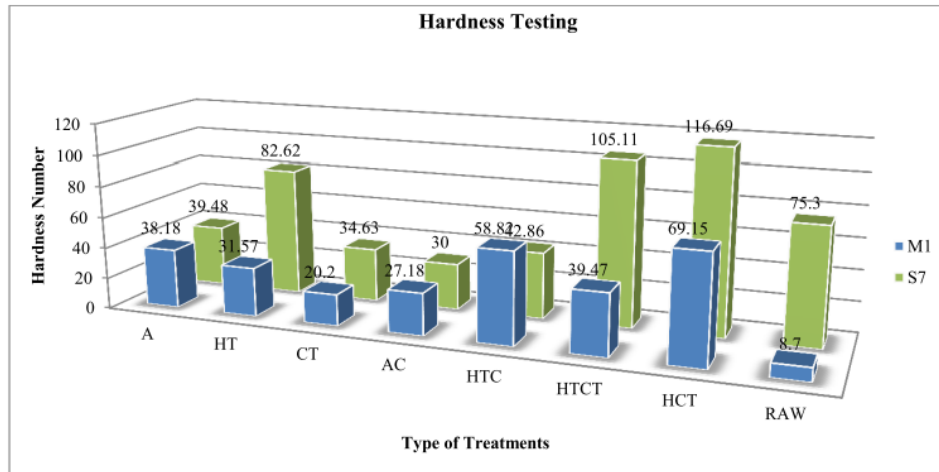
Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Ειδικότερα, σε ότι αφορά τη δομή των υλικών πριν και μετά τη κρυογενική κατεργασία, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη οδηγώντας σε ένα πιο ομογενές υλικό με ομοιόμορφους κόκκους.



Εικόνα 7: Μικροδομή α) Εργαλειοχάλυβα M1, β) Εργαλειοχάλυβα S7

Επιπλέον, η κρυογενική κατεργασία ενισχύει την αποσύνθεση του μαρτενσίτη μεταβάλλοντας τη συμπεριφορά των η-καρβιδίων. Προκαλείται δηλαδή μια εκλέπτυνση και αύξηση στον αριθμό τους, πράγμα που οδηγεί σε ένα πιο ισορροπημένο υλικό με αυξημένη

σκληρότητα και αντοχή στη φθορά. Τα δοκίμια τα οποία παρουσίασαν αυξημένη σκληρότητα ήταν αυτά τα οποία είχαν κατεργαστεί κρυογενικά αφού πρώτα είχε ακολουθήσει η διαδικασία σκλήρυνσής τους.



Εικόνα 8: Σκληρότητα δοκιμίων εργαλειοχάλυβα M1 και S7.

Ο D. Das και οι συνεργάτες του, [22] μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών υπομηδενικών κατεργασιών στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα D2. Η σύνθεση του συγκεκριμένου υλικού φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

Elements	Amount (wt%)
C	1.49
Mn	0.29
Si	0.42
S	0.028
P	0.029
Cr	11.38
Mo	0.80
V	0.68
Fe	Balance

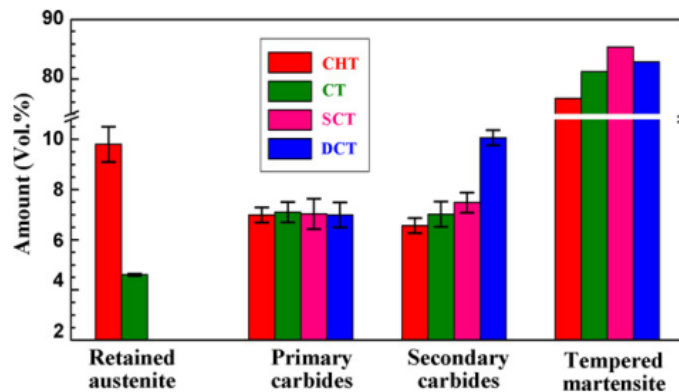
Εικόνα 9: Σύνθεση εργαλειοχάλυβα D2.

Αναλυτικότερα, για τη μελέτη τους χρησιμοποίησαν δοκίμια διαστάσεων 24x16x85mm τα οποία υπέστησαν τις ακόλουθες κατεργασίες:

- Συμβατική θερμική κατεργασία: Ωστενιτοποίηση στους 1297 K για 30 min, βαφή, επαναφορά στους 483 K για 120 min.
- Ψυχρή κατεργασία: Ωστενιτοποίηση στους 1297 K για 30 min, βαφή, ψύξη στους 198 K με ρυθμό 0,75 K/min και παραμονή για 5 min, επαναφορά στους 483 K για 120 min.

- SCT (Shallow Cryogenic Treatment): Ωστενιτοποίηση στους 1297 K για 30 min, βαφή, ψύξη στους 148 K με ρυθμό 0,75 K/min και παραμονή για 5 min, επαναφορά στους 483 K για 120 min.
- DCT (Deep Cryogenic Treatment): Ωστενιτοποίηση στους 1297 K για 30 min, βαφή, ψύξη στους 77 K με ρυθμό 0,75 K/min και παραμονή για 36 h, επαναφορά στους 483 K για 120 min.

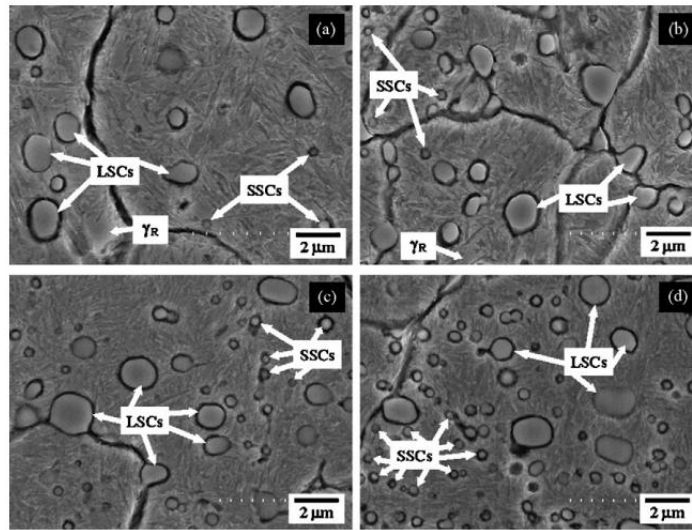
Η ανάλυση περίθλασης ακτινών-X των δοκιμίων, η λήψη εικόνων μικροδομής με τη χρήση SEM, καθώς και η διεξαγωγή μικρο/μάκροσκληρομετρήσεων, οδήγησε τους ερευνητές να διαπιστώσουν ότι το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη στη πρώτη κατεργασία ήταν 9,8% σε αντίθεση με 4,6% που ήταν δεύτερη. Στις κατεργασίες SCT και DCT το ποσοστό αυτό ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης.



Εικόνα 10: Ποσοστό διαφόρων στοιχείων στη δομή των δοκιμίων.

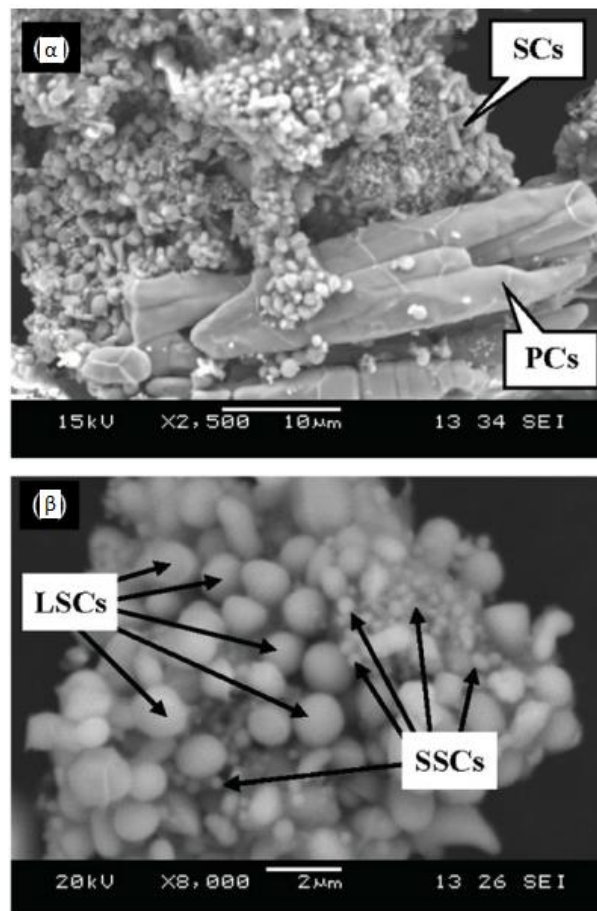
Επιπλέον, οι υπομηδενικές κατεργασίες επιταχύνουν την αποσύνθεση του μαρτενσίτη και τροποποιούν τη κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων. Ειδικότερα, οδηγούν στην εκλέπτυνση τους, στην αύξηση του αριθμού τους, στην αύξηση της πυκνότητας του πλήθους τους και στην ομοιόμορφη διασπορά τους στη μικροδομή του υλικού. Αυτό το φαινόμενο εντείνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία κρυογενικής κατεργασίας. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι η υπομηδενική κατεργασία δεν αλλοιώνει τη φύση των δευτερογενών καρβιδίων. Επιπρόσθετα, το ποσοστό των πρωτογενών καρβιδίων παραμένει σταθερό και δεν μεταβάλλεται συναρτήσει των θερμικών κατεργασιών. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η μικροδομή του υλικού για κάθε μια από τις τέσσερις κατεργασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δευτερογενή καρβίδια χωρίζονται σε μεγάλα δευτερογενή καρβίδια (LSC) και μικρά δευτερογενή καρβίδια (SSC).



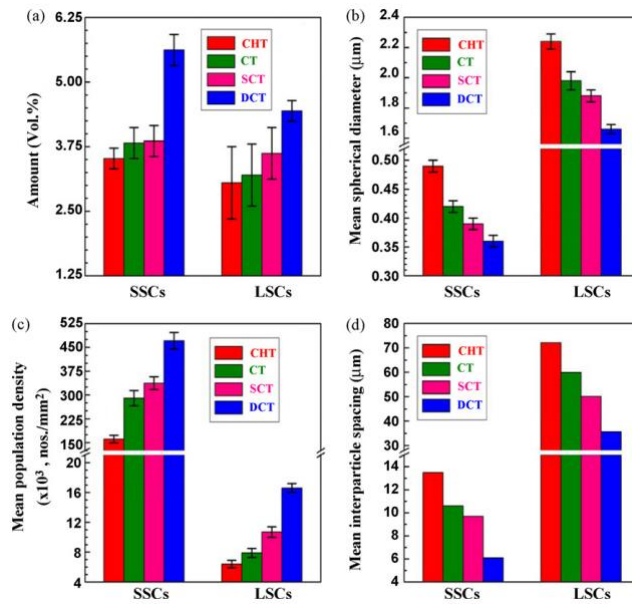


Εικόνα 13: Μικροδομή δοκιμίων μετά από α) Συμβατική θερμική κατεργασία, β) Ψυχρή κατεργασία, γ) SCT και δ) DCT

Η μορφή των LSC και SSC καθώς και στοιχεία για το μέγεθος, τη πυκνότητα και τον αριθμό τους για κάθε κατεργασία ξεχωριστά, φαίνονται παρακάτω.

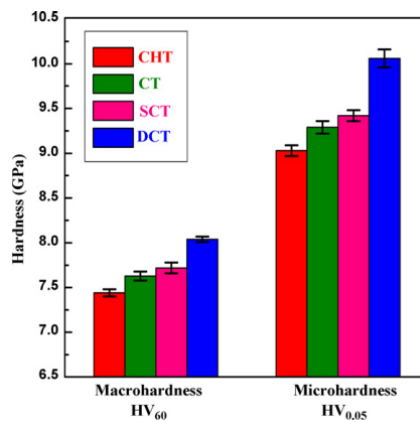


Εικόνα 14: Μορφολογία α) Πρωτογενών (PC) και Δευτερογενών (SC) καρβιδίων και β) LSC και SSC καρβιδίων.



Εικόνα 12: Αποτελέσματα ανάλυσης για α) Αριθμό, β) Μέση σφαιρική διάμετρο, γ) Μέση πυκνότητα πληθυσμού και δ) Μέση απόσταση σωματιδίων.

Τέλος, παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της μικρο/μακροσκληρότητας στη DCT κατεργασία συγκριτικά με τη SCT, τη ψυχρή κατεργασία και τη συμβατική θερμική κατεργασία.



Εικόνα 11: Αποτελέσματα μικροσκληρότητας και μακροσκληρότητας.

Σε μία άλλη έρευνα που έγινε από τον A. Akhbarizadeh και τους συνεργάτες του, [18] μελετήθηκε η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στον εργαλειοχάλυβα D6. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τα οποία διαμορφώθηκαν από ράβδο διαμέτρου 5 mm από το συγκεκριμένο υλικό. Τα δοκίμια κατεργάστηκαν και γυαλίστηκαν ώστε να έχουν ομοιόμορφη και λεία επιφάνεια. Για την ωστενιτοποίηση τους,



τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ένα λουτρό άλατος στους 980°C για 20 min και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε λάδι για τη βαφή τους μέχρι να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια, στη SCT κατεργασία, τα δοκίμια ψύχθηκαν στους -63°C με ρυθμό 15-20°C/h για 20h και 40h. Ακολούθως, θερμάνθηκαν με το ίδιο ρυθμό για να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου. Για τη DCT κατεργασία, τα δοκίμια ψύχθηκαν στους -63°C με ρυθμό 15-20°C/h για 20h. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε άζωτο για τη ψύξη τους στους -185°C όπου παρέμειναν για 10h. Η επαναφορά τους στη θερμοκρασία δωματίου έγινε με ρυθμό 15-20°C/h. Για την σταθεροποίηση, τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για μία εβδομάδα. Στο πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωτικά οι παραπάνω κατεργασίες.

Nomenclature	Heat treatment	Sample no.
CHT	Conventional heat-treatment	1
SCT20	Shallow cryogenically treated at -63 °C for 20 h	2
SSCT20	Stabilized for 1 week in room temperature and shallow cryogenically treated at -63 °C for 20 h	3
SCT40	Shallow cryogenically treated at -63 °C for 40 h	4
SSCT40	Stabilized for 1 week in room temperature and shallow cryogenically treated at -63 °C for 40 h	5
DCT	Cryogenically treated in -63 °C for 20 h and deep cryogenically treated with quench in liquid nitrogen for 10 h	6
SDCT	Stabilized for 1 week in room temperature, then cryogenically treated in -63 °C for 20 h and deep cryogenically treated with quench in liquid nitrogen for 10 h	7

*Εικόνα 13: Κατεργασίες δοκιμίων.*

Για τη σύγκριση της επίδρασης της SCT και DCT στη σκληρότητα χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια που υπέστησαν τη SCT20 και DCT κατεργασία. Οι κατεργασίες SCT20 και SCT40 χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου στη σκληρότητα. Τέλος, οι κατεργασίες SSCT20, SSCT40 και SDCT χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της επίδρασης του χρόνου σταθεροποίησης στη σκληρότητα των δοκιμίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά τη κρυογενική κατεργασία αλλά και τη συμβατική κατεργασία ακολούθησε η επαναφορά των δοκιμίων στους 180°C για 1h. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Sample	Retain austenite percent (%)
SHT	12.4
SCT20	8
SSCT20	5.3
SCT40	6.5
SSCT40	4.7
DCT	Was not seen
SDCT	Was not seen

*Εικόνα 14: Ποσοστό εναπομείναντα ωστενίτη.*

Sample	After temper	Before temper
SHT	62 ± 0.5	64 ± 0.7
SCT20	62.5 ± 0.6	65 ± 0.5
SSCT20	63.3 ± 0.4	65.5 ± 0.4
SCT40	63 ± 0.5	65.5 ± 0.3
SSCT40	63.5 ± 0.6	66 ± 0.5
DCT	64 ± 0.4	66.7 ± 0.4
SDCT	64.2 ± 0.3	67 ± 0.5

*Εικόνα 15: Σκληρότητα δοκιμών.*

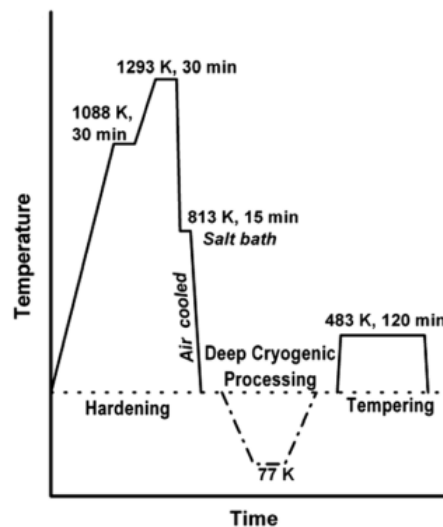
Ποιο συγκεκριμένα, όπως μπορεί να φανεί και από τους παραπάνω πίνακες, ως αποτέλεσμα της μείωσης του υπολειπόμενου ωστενίτη, η κρυογενική κατεργασία συμβάλει στην αύξηση της σκληρότητας. Αυτή η αύξηση είναι ιδιαίτερα εμφανής στη DCT κατεργασία λόγω της πιο ομοιόμορφης κατανομής των καρβιδίων, της εξάλειψης του υπολειπόμενου ωστενίτη και του υψηλότερου ποσοστού ύπαρξης καρβιδίων του χρωμίου συγκριτικά με τη SCT κατεργασία. Επιπλέον, λόγω της μείωσης του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη στα δοκίμια του διατηρήθηκαν για παραπάνω χρόνο στη SCT κατεργασία (40h αντί για 20h), παρατηρήθηκε αύξηση της σκληρότητας. Ομοίως, το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στα δοκίμια τα οποία σταθεροποιήθηκαν συγκριτικά με εκείνα που δεν ήταν σταθεροποιημένα.

O D. Das και οι συνεργάτες του, [23] σε μία άλλη έρευνα που πραγματοποίησαν, μελέτησαν την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας καθώς και της ώρας παραμονής στην υπομηδενική θερμοκρασία, στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα D2. Στα πειράματα που πραγματοποίησαν, χρησιμοποίησαν δοκίμια από το συγκεκριμένο υλικό τα οποία είχαν διαστάσεις 24x16x85 mm. Τα δοκίμια στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν στη συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης καθώς και στη κρυογενική κατεργασία. Συγκεκριμένα, στη κρυογενική κατεργασία τα δοκίμια αφέθηκαν στους 77K για 36h και 84h αντίστοιχα. Σε ό,τι αφορά τη διαδικασία σκλήρυνσης, τα δοκίμια αρχικά προθερμάθηκαν στους 1088K για 30min με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας να είναι 9K/min. Αυτό έγινε έτσι ώστε να αποκτήσουν τα δοκίμια ομοιόμορφη θερμοκρασία στη δομή τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ωστενιτοποίηση τους στη θερμοκρασία των 1297K, με το χρόνο παραμονής να είναι 30min. Κατά τη βαφή τους, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε λουτρό άλατος εντός φούρνου και στη συνέχεια μειώθηκε η θερμοκρασία τους στους 813K. Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτή τη θερμοκρασία για 15min. Εν συνεχεία,

ακολούθησε η περεταίρω μείωση της θερμοκρασίας τους, μέχρι αυτή να φτάσει τη θερμοκρασία δωματίου, με τη χρήση αέρα.

Πίνακας 4: Θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν.

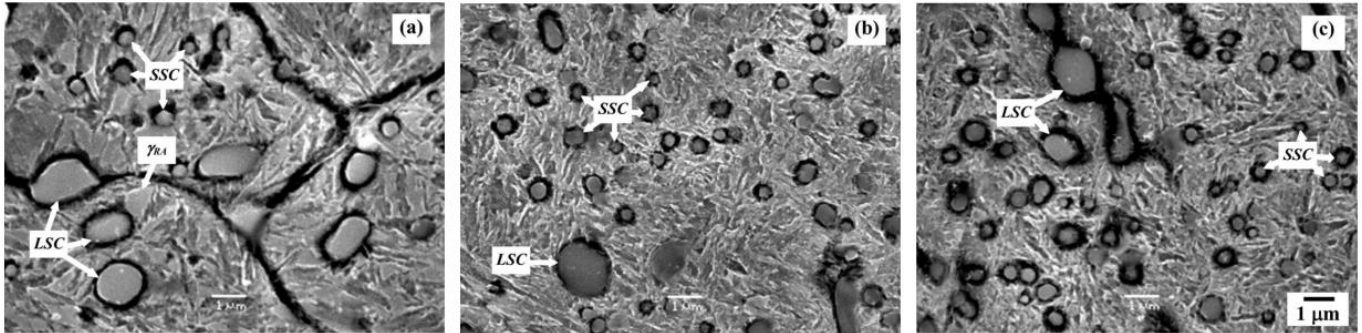
Sample codes	Description of heat-treatment cycles
QT	Hardening + Tempering
QCT36	Hardening + Deep Cryogenic processing for 36h + Tempering
QCT84	Hardening + Deep Cryogenic processing for 84h + Tempering



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα θερμικών κατεργασιών που ακολουθήθηκαν.

Τα αποτελέσματα στα οποία οδηγήθηκαν δείχνουν ότι λόγω της DCT κατεργασίας παρατηρείται μια αξιοσημείωτη μείωση του υπολειπόμενου ωστενίτη, ενώ ταυτόχρονα παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στη κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων. Η κρυογενική κατεργασία προάγει τη δημιουργία εκλεπτυσμένων δευτερογενών καρβιδίων, αυξάνει το ποσοστό ύπαρξής τους στη δομή του υλικού και οδηγεί στη ομοιόμορφη κατανομή τους. Αυτά τα φαινόμενα είναι πιο έντονα στη κρυογενική κατεργασία συγκριτικά με τη συμβατική. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί, στη QT κατεργασία παρατηρείται μικρότερος αριθμός LSC καρβιδίων ενώ ταυτόχρονα ο αριθμός των SSC καρβιδίων είναι σαφώς μεγαλύτερος. Ο αριθμός των πρώτων καρβιδίων στη μικροδομή των δοκιμίων που υπέστησαν τη QCT36 και QCT84 κατεργασία βρέθηκε να είναι σημαντικά μικρότερος από τη QT. Επιπλέον, τα SSC καρβίδια στις QTC κατεργασίες βρέθηκαν να είναι, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, περισσότερο εκλεπτυσμένα και ομοιόμορφα διασκορπισμένα συγκριτικά με τα αντίστοιχα καρβίδια στη QT κατεργασία. Ακόμα, από ότι φαίνεται, η αύξηση του χρόνου παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία

οδηγεί στην αύξηση του αριθμού των SSC με τη ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους τους. Αυτό δείχνει ότι η συμπεριφορά των καρβιδίων κατά τη κατακρήμνιση είναι μια ισοθερμική διαδικασία η οποία περιλαμβάνει την εντοπισμένη διάχυση του άνθρακα, οδηγώντας στη δημιουργία συμπλεγμάτων. Τα συμπλέγματα αυτά, λειτουργούν σαν πυρήνες για τη δημιουργία πολύ λεπτών καρβιδίων στην επακόλουθη διαδικασία της επαναφοράς όπως φάνηκε στη δομή των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων.



Εικόνα 16: Μικροδομή δοκιμίων με τις κατεργασίες α) QT, β) QCT36 και γ) QCT84

Επιπρόσθετα, η QCT κατεργασίες προκαλούν μια αύξηση της τάξης του 5% στη σκληρότητα των δοκιμίων συγκριτικά με τη QT κατεργασία. Ακόμα, η αύξηση του χρόνου παραμονής των δοκιμίων στην υπομηδενική θερμοκρασία δεν επιφέρει κάποια σημαντική αλλαγή στη σκληρότητα. Πιθανότατα, ο ρυθμός αύξησης της ποσότητας των εκλεπτυσμένων καρβιδίων είναι αρκετά μικρός για χρόνος παραμονής στη θερμοκρασία των 77K μεγαλύτερο των 36h. Αλλά οποιαδήποτε τέτοια πιθανή αύξηση της πυκνότητας σωματιδίων καρβιδίου, που οδηγεί σε υψηλότερη σκληρότητα, αντισταθμίζεται από τη χαλάρωση των εσωτερικών τάσεων που προκαλείται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων καρβιδίου και των ελαττωμάτων της δομής.

Πίνακας 5: Σκληρότητα δοκιμίων.

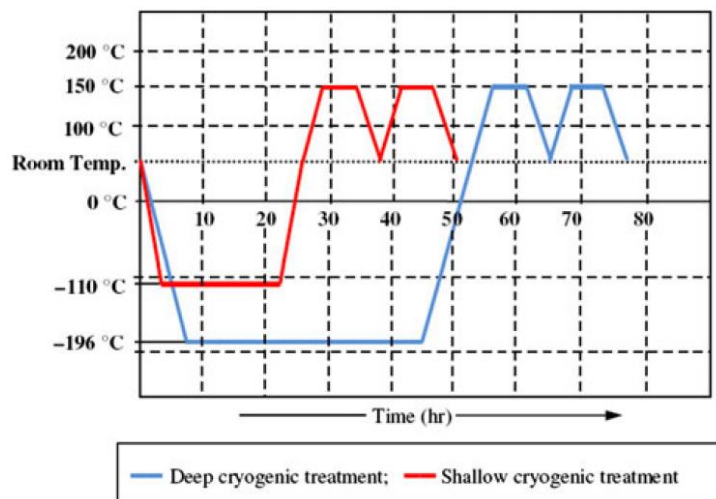
Sample	Volume fraction of retained austenite	Vicker's hardness number
QT	9.8	731 ± 8
QCT36	<2.0	767 ± 7
QCT84	<2.0	775 ± 5

Ακολούθως, στη μελέτη που έγινε από τον Gill S. και τους συνεργάτες του, [33] ερευνήθηκε η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του

ταχυγάλυβα M2. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 12x12x50 mm, ενώ το υλικό ήταν εμπορικά διαθέσιμο με δομή όπως αυτή προκύπτει μετά τη διαδικασία της βαφής και της επαναφοράς. Όλα τα δοκίμια, ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη κατεργασία στην οποία υποβλήθηκαν.

- Συμβατική κατεργασία (CQT)
- SCT (Shallow Cryogenic Treatment) κατεργασία
- DCT (Deep Cryogenic Treatment) κατεργασία

Κάθε ομάδα διέθετε 2 δοκίμια. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη SCT ψύχθηκαν τη θερμοκρασία των  $-110^{\circ}\text{C}$ , παρέμειναν εκεί για 18h και στη συνέχεια επανήλθαν σταδιακά στη θερμοκρασία δωματίου. Ομοίως, εκείνα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη DCT ψύχθηκαν στη θερμοκρασία των  $-196^{\circ}\text{C}$ , παρέμειναν εκεί για 38h και στη συνέχεια επανήλθαν σταδιακά στη θερμοκρασία δωματίου. Κατά τη ψύξη των δοκιμίων στις υπομηδενικές θερμοκρασίες, έγινε προσπάθεια ώστε αυτά να μην έρθουν σε επαφή με το υγρό άζωτο για να εξαλειφθεί ο κίνδυνος και η καταστροφή από το θερμικό σοκ. Επιπλέον, για να αποφευχθεί ο κίνδυνος για θερμικά σοκ από τη ραγδαία ψύξη/θέρμανση, η διαδικασία έγινε αργά με το χρόνο για τη SCT να είναι 4h και για τη DCT να είναι 7h. Έτσι, προκύπτει ένας μέσος ρυθμός θέρμανσης/ψύξης  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Τέλος, μετά από τις SCT και DCT κατεργασίες ακολούθησαν δύο επαναφορές των δοκιμίων στη θερμοκρασία των  $150^{\circ}\text{C}$ .

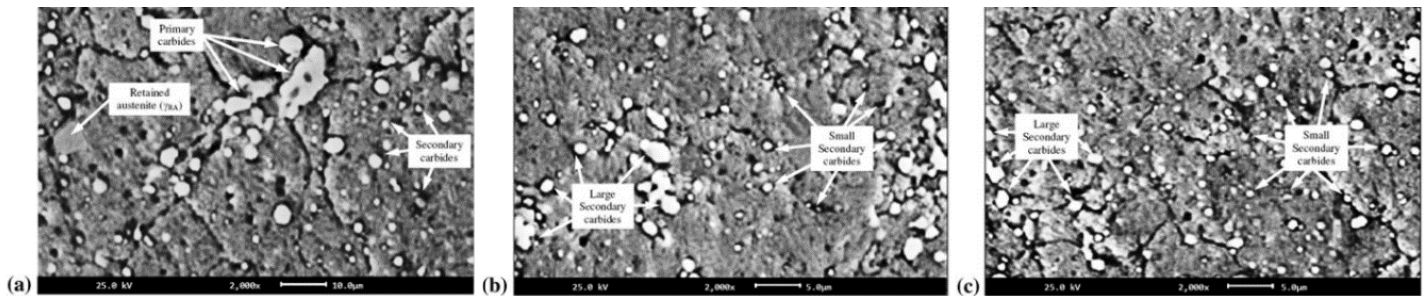


Διάγραμμα 9: Στάδια DCT και SCT κατεργασίας.

Η επεξεργασία των δοκιμίων μετά το τέλος των παραπάνω κατεργασιών έδειξε ότι στη μικροδομή τους μετά τις CQT, SCT και DCT κατεργασίες υπάρχει ισχυρή παρουσία



σωματιδίων καρβιδίων εντός μήτρας μαρτενσίτη από επαναφορά. Στην εικόνα που ακολουθεί μπορεί να φανεί με σχετική μεγάλη ευκολία η ύπαρξη πρωτογενών καρβιδίων με δενδριτική δομή, δευτερογενών καρβιδίων σε αριθμό μικρότερο από τα πρώτα καθώς και κάποιας ποσότητας υπολειπόμενου ωστενίτη (10,73%). Η μικροδομή αυτή ανήκει στα δοκίμια που αντιστοιχούν στη CQT. Εν συνεχεία, φαίνεται η δομή των δοκιμίων που αντιστοιχούν στη SCT. Εδώ, παρατηρείται η ύπαρξη δευτερογενών καρβιδίων τα οποία μπορεί να κατακρημνίστηκαν κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης κατεργασίας. Τα καρβίδια αυτά, ανάλογα με το μέγεθός τους χωρίζονται σε μεγάλα δευτερογενή καρβίδια (LSC) και μικρά δευτερογενή καρβίδια (SSC). Όπως φαίνεται, ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση τα LSC και τα SSC δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στη δομή του υλικού. Αυτό που προκαλεί μεγάλο ενδιαφέρον είναι η σχεδόν εξολοκλήρου μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Σε αντίθεση με τη μικροδομή των δοκιμίων μετά τη SCT κατεργασία, στα δοκίμια της DCT φαίνεται η ύπαρξη δευτερογενών καρβιδίων τα οποία είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στη δομή του υλικού. Επιπλέον, ο αριθμός των SSC φαίνεται να ενισχύεται συγκριτικά με τη προηγούμενη κατεργασία. Έτσι, μπορεί να συναχθεί από τα παραπάνω ότι το μέγεθος των δευτερογενών καρβιδίων μετά τη DCT είναι σαφώς πιο διαφορετικό από τη CQT. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στη δημιουργία των η-καρβιδίων στη DCT αντί των ε-καρβιδίων στη CQT.

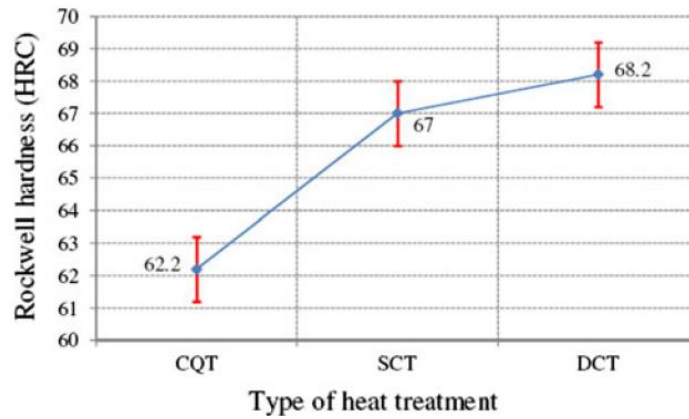


Εικόνα 17: Μικροδομή δοκιμίων μετά τη α) CQT κατεργασία, β) SCT κατεργασία και γ) DCT κατεργασία.

Πίνακας 6: Ποσοτικοποιημένες παράμετροι καρβιδίων ταχυάλυβα M2.

Type of heat treatment	Retained austenite ( $\gamma_{RA}$ ), %	$A_{carbides}$ , %	$D_{carbides}$ , mm	Total $N_{carbides}$ , $mm^{-2}$	Classification of carbides on the basis of size ( $N_{carbide}$ ), $mm^{-2}$					
					0-1 $\mu m$	1-2 $\mu m$	2-4 $\mu m$	4-8 $\mu m$	8-16 $\mu m$	> 16 $\mu m$
CQT	10.37	2.87	32.37	29,521	21,737	5533	1982	216	53	Not reported
SCT	01.64	4.93	37.74	39,871	29,683	7086	2891	164	47	Not reported
DCT	01.57	5.71	39.63	43,093	32,947	7179	2918	156	34	Not reported

Σε ότι αφορά τη σκληρότητα, τα δοκίμια της SCT έχουν εμφανώς υψηλότερη σκληρότητα (7,46%) από αυτά της CQT κατεργασίας. Επιπλέον, η βελτίωση της σκληρότητας (1,47%) της DCT κατεργασίας είναι μηδαμινή συγκριτικά με τη SCT.



Διάγραμμα 10: Σκληρότητα δοκιμίων μετά από κάθε κατεργασία.

Από τα παραπάνω μπορεί κανείς εύκολα να συμπεράνει ότι η ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η σκληρότητα, του ταχυχάλυβα M2 από τη κρυογενική κατεργασία μπορεί να αποδοθεί στη εξάλειψη του υπολειπόμενου ωστενίτη, τη κατακρήμνιση και την εκλέπτυνση των σωματιδίων καρβιδίου και την ομοιογενή κατανομή τους, όπου μαζί με τη δευτερογενή σκλήρυνση οδηγεί σε μια επιθυμητή αντοχή στην ανάπτυξη ρωγμών.



### 1.3.2 Μελέτες στον εργαλειοχάλυβα H13.

Στη συνέχεια, γίνεται η παρουσίαση ορισμένων μελετών που έχουν σαν σκοπό την μελέτη της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα H13. Στη μελέτη που έγινε από τον A. Molinari και τους συνεργάτες του, [29] δοκίμια από τον εργαλειοχάλυβα H13 υπέστησαν τέσσερις διαφορετικές θερμικές κατεργασίες προκειμένου να μελετηθούν τα παραπάνω. Στη πρώτη κατεργασία τα δοκίμια θερμάνθηκαν στη θερμοκρασία των 1020°C με το επόμενο στάδιο να είναι η βαφή τους σε κενό αέρος. Ακολούθως, έγινε διπλή επαναφορά των δοκιμίων στη θερμοκρασία των 570°C για 3h. Η δεύτερη κατεργασία ήταν ακριβώς η ίδια με τη προηγούμενη μόνο που μετά την επαναφορά τους τα δοκίμια τοποθετήθηκαν εντός κρυογενικού θαλάμου για 35h στη θερμοκρασία των -196°C. Στη τρίτη θερμική κατεργασία τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν ήταν: ωστενιτοποίηση, βαφή, κρυογενική και επαναφορά. Οι παράμετροι των βημάτων ήταν ακριβώς οι ίδιες με τις προηγούμενες θερμικές κατεργασίες. Τέλος, η τέταρτη θερμική κατεργασία ήταν ακριβώς ίδια με την αμέσως προηγούμενη με μόνη διαφορά τη προσθήκη μιας επιπλέον επαναφοράς στο τέλος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ο ρυθμός ψύξης των δοκιμίων στο κρυογενικό στάδιο ήταν 20-30°C/h προκειμένου να αποφευχθεί το θερμικό σοκ. Ακόμα, η παράμετρος των 35h επιλέχθηκε διότι παραπάνω ώρες παραμονής έδειξαν ότι δεν επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού. Η συνολική διάρκεια των θερμικών κατεργασιών ήταν περίπου 100h.

*Πίνακας 7: Θερμικές κατεργασίες εργαλειοχάλυβα H13.*

Code	Treatment
A	Q + T + T
B	Q + T + T + C
C	Q + C + T
D	Q + C + T + T

Τα αποτελέσματα των παραπάνω θερμικών κατεργασιών στη σκληρότητα, στην ενέργεια κρούσης και την αντοχή των δοκιμίων παρατίθενται στο πίνακα που ακολουθεί.

*Πίνακας 8: Αποτελέσματα θερμικών κατεργασιών.*

Specimen	HRc	E (J)	K <sub>IC</sub> (N/mm <sup>3/2</sup> )
A	46.5	17.9	42.8
B	46.7	18.1	49.1
C	49.7	13.6	45.4
D	47.9	16.9	45.0

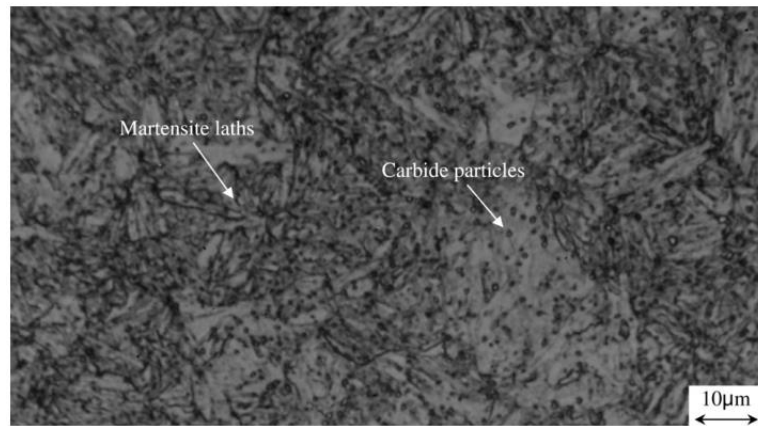
Όπως μπορεί να φανεί και από τον παραπάνω πίνακα, η μέγιστη τιμή της σκληρότητας επιτυγχάνεται όταν η κρυογενική κατεργασία πραγματοποιείται μετά τη βαφή και πριν την επαναφορά των δοκιμίων. Η επίδραση αυτή, της κρυογενικής κατεργασίας, έγκειται στη ενεργοποίηση στον μαρτενσίτη των μετασχηματισμών που συμβαίνουν κατά την επαναφορά λόγω του υψηλού υπερκορεσμού που επιτυγχάνεται στους  $-196^{\circ}\text{C}$ . Εξαιτίας αυτού, η κατακρήμνιση των καρβιδίων προκύπτει λόγω της υψηλότερης ενέργειας ενεργοποίησης, οδηγώντας έτσι στον υψηλότερο ρυθμό πυρηνοποίησης, και με τη σειρά του, σε μικρότερες διαστάσεις και πιο ομοιόμορφη κατανομή.

Εν συνεχεία, ο Koneshlou M. και οι συνεργάτες του, [27] χρησιμοποίησαν δοκίμια κατασκευασμένα από τον εργαλειοχάλυβα H13, τα οποία είχαν μορφή ράβδου και διάμετρο 20mm για να μελετήσουν την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στην μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Οι διαφορετικές θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

*Πίνακας 9: Στάδια κρυογενικής κατεργασίας.*

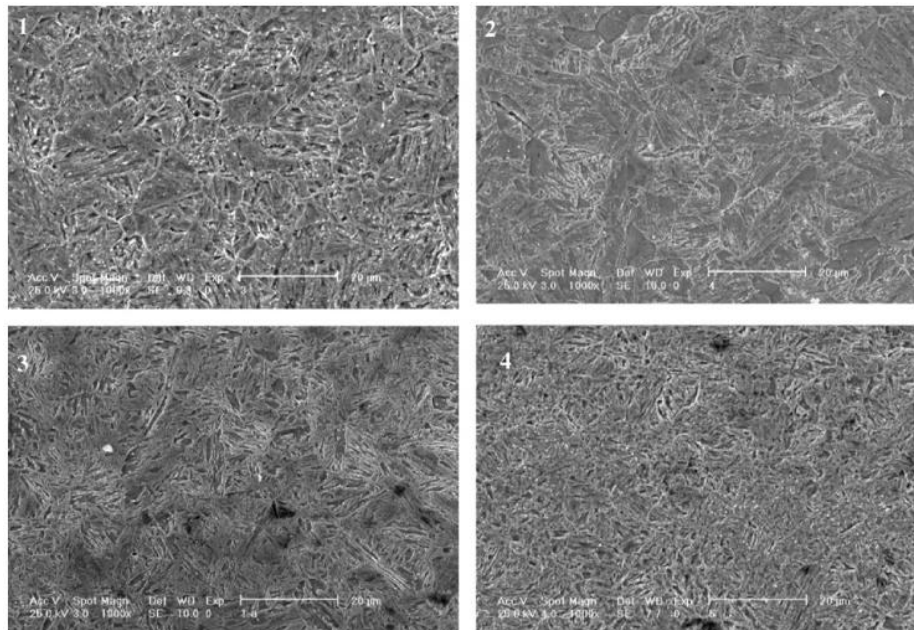
Sample	Processing sequences			
1	Heat treated at $1040^{\circ}\text{C}$ for 30 min followed by air quench	Tempered at $560^{\circ}\text{C}$ for 2 h	-	-
2	Heat treated at $1040^{\circ}\text{C}$ for 30 min followed by air quench	Tempered at $560^{\circ}\text{C}$ for 2 h	Cryogenic treatment at $-72^{\circ}\text{C}$ for 8 h	-
3	Heat treated at $1040^{\circ}\text{C}$ for 30 min followed by air quench	Tempered at $560^{\circ}\text{C}$ for 2 h	Deep cryogenic treatment at $-196^{\circ}\text{C}$ for 8 h	-
4	Heat treated at $1040^{\circ}\text{C}$ for 30 min followed by air quench	Tempered at $560^{\circ}\text{C}$ for 2 h	Deep cryogenic treatment at $-196^{\circ}\text{C}$ for 8 h	Tempered at $560^{\circ}\text{C}$ for 2 h

Η πρώτη θερμική κατεργασία του πίνακα είναι η συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα H13. Σε αυτή τη κατάσταση, η μικροδομή του υλικού βάσει του διαγράμματος φάσεων, αποτελείται από μαρτενσίτη σε μορφή βελόνων, υπολειπόμενο ωστενίτη και καρβίδια. Όπως έχει τονιστεί και παραπάνω, η κατεργασία αυτή οδηγεί σε υψηλά ποσοστά υπολειπόμενου ωστενίτη τα οποία έχουν αρνητικές συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα όπως, στη κατεργασιμότητα του υλικού, στη φθορά, στη σκληρότητα και πιο σημαντική όλων στη σταθερότητα της δομής του. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η μικροδομή του υλικού μετά τη παραπάνω κατεργασία.



Εικόνα 19: Μικροδομή υλικού μετά τη κατεργασία Νο1.

Εν συνεχεία, φαίνεται η μικροδομή του υλικού σε κάθε μια από τις τέσσερις θερμικές κατεργασίες. Η πραγματοποίηση της κρυογενικής κατεργασίας είχε σημαντική επίδραση στη δομή του υλικού καθώς οδήγησε στη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Όσο η κρυογενική θερμοκρασία συνέχιζε να πέφτει, όλο και περισσότεροι ωστενίτης μετατρέπονταν σε μαρτενσίτη. Αποτέλεσμα αυτής της μετατροπής είναι η αύξηση του όγκου η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Επιπλέον, μπορεί κανείς εύκολα να δει ότι οι βελόνες μαρτενσίτη είναι μικρότερες και πιο ομοιόμορφα κατανομημένες στη μικροδομή του υλικού μετά τη παραμονή των δοκιμών στην υπομηδενική θερμοκρασία για αρκετή ώρα.

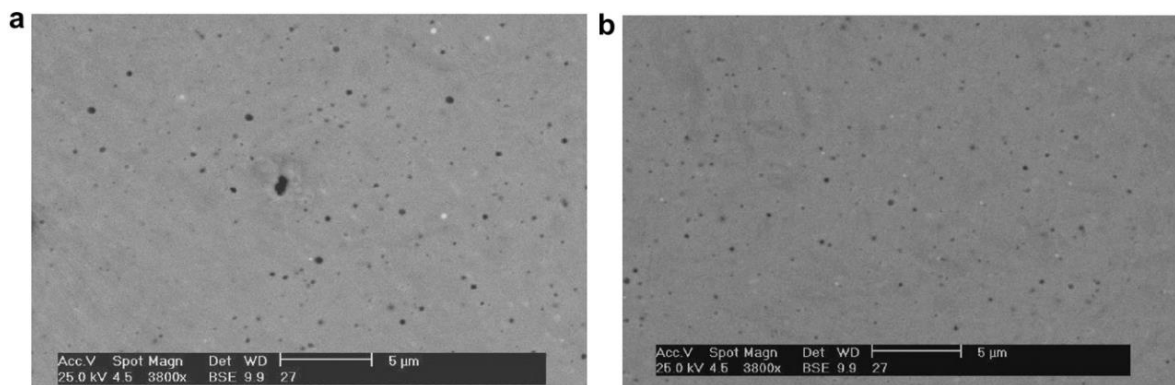


Εικόνα 18: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα μετά την κατεργασία α) Νο1, β) Νο2, γ) Νο3 και δ) Νο4

Πίνακας 10: Ποσοστό εναπομείναντα ωστενίτη μετά από κάθε κατεργασία.

Sample	Retained austenite percent (%)
1	8.1
2	7.4
3	4.5
4	3.8

Επιπρόσθετα, η παραμονή των δοκιμίων για πολύ ώρα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη κρυογενική κατεργασία έχει σαν αποτέλεσμα την κατακρήμνιση λεπτών καρβιδίων τα οποία είναι διασκορπισμένα ομοιόμορφα στη μικροδομή του υλικού μετά τη διαδικασία της επαναφοράς. Περαιτέρω εξέταση της μικροδομής του υλικού έδειξε ότι τα κυριότερα είδη καρβιδίων είναι δύο. Αυτά του χρωμίου και αυτά του μολυβδαινίου. Επιπλέον, παρατηρείται μια αύξηση στο ποσοστό των καρβιδίων. Αυτό οφείλεται στη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη πράγμα που οδηγεί στη κατακρήμνιση περισσότερων καρβιδίων κατά την διαδικασία της επαναφοράς. Επίσης, τα καρβίδια φαίνονται να είναι περισσότερο σφαιρικά στα δοκίμια που έχουν ψυχθεί στους  $-196^{\circ}\text{C}$ . Επομένως, δεδομένου ότι κατακρήμνιση των καρβιδίων κατά τη διαδικασία της επαναφοράς οφείλεται στη διάχυση των ατόμων του άνθρακα σε μικρές αποστάσεις, φαίνεται ότι η εφαρμογή της κρυογενικής κατεργασίας του H13 σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες προκαλεί την έναρξη εμφάνισης εστιών πυρηνοποίησης για τη κατακρήμνιση λεπτών καρβιδίων τα οποία ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Το παραπάνω φαινόμενο φαίνεται να έχει ιδιαίτερη βαρύτητα διότι η ύπαρξη πιο ομοιόμορφων και σφαιρικών καρβιδίων οδηγεί σε πιο ομοιόμορφη σκληρότητα, ιδιότητα που είναι ζωτικής σημασίας για τη εφαρμογή των εργαλειοχαλύβων.



Εικόνα 20: Επίδραση της DCT στη διασπορά των καρβιδίων χρωμίου (μαύρα) και μολυβδαινίου (άσπρα) στην κατεργασία α) No1 και β) No2.

Τέλος, η παραμονή των δοκιμίων σε κρυογενικές θερμοκρασίες φαίνεται να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας των δοκιμίων. Αυτό οφείλεται στη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη, την ύπαρξη λεπτότερων βελόνων μαρτενσίτη και την ομοιόμορφη κατανομή λεπτών καρβιδίων στη δομή του υλικού.

Πίνακας 11: Σκληρότητα δοκιμίων μετά από κάθε κατεργασία.

Sample	Ultimate tensile strength (MPa)	Hardness (HRC)	Impact energy (J)
1	1580	49	15.4
2	1640	51	16.1
3	1695	55	17.3
4	1720	59	18.2

Στη μελέτη που έγινε από τον Pérez M. και τον Belzunce F. J. [31] μελετήθηκε η επίδραση που είχαν διάφορες θερμικές κατεργασίες στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του H13. Οι θερμικές κατεργασίες που εφαρμόστηκαν φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12: Θερμικές κατεργασίες που υπέστησαν τα δοκίμια H13.

Heat treatments and samples	Processing sequences		
HT1	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by gas quench	–	Triple tempering at 590 °C for 2 h
HT2	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by gas quench	Cryogenic treatment at –196 °C for 12 h	Triple tempering at 590 °C for 2 h
HT3	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by oil quench	–	Triple tempering at 590 °C for 2 h
HT4	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by oil quench	Cryogenic treatment at –196 °C for 12 h	Triple tempering at 590 °C for 2 h
Sample 1	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by air quench (Q)	Cryogenic treatment at –196 °C for 12 h (C)	Triple tempering at 590 °C for 2 h (3 T)
Sample 2	Austenitizing at 1020 °C for 30 min. followed by oil quench (Q)	Cryogenic treatment at –196 °C for 12 h (C)	Triple tempering at 590 °C for 2 h (3 T)

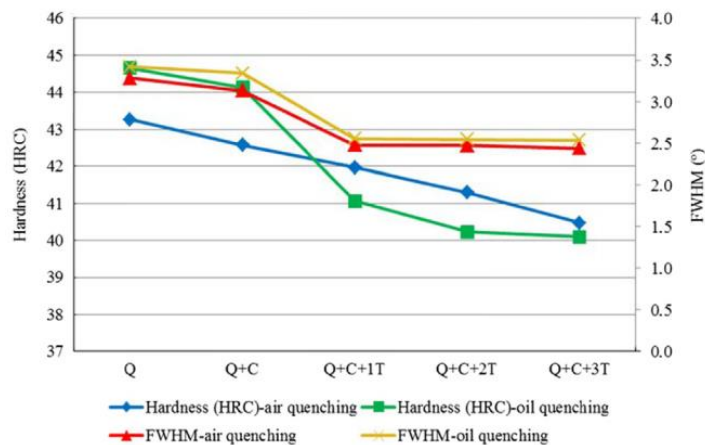
Τα αποτελέσματα από την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων μετά το πέρας των παραπάνω κατεργασιών φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13: Μηχανικές ιδιότητες υλικού μετά το πέρας των θερμικών κατεργασιών.

Heat treatment	HT1	HT2	HT3	HT4
$E$ (GPa)	208 ( $\pm 5$ )	210 ( $\pm 5$ )	211 ( $\pm 6$ )	211 ( $\pm 3$ )
$\sigma_{ys}$ (MPa)	1303 ( $\pm 5$ )	1265 ( $\pm 9$ )	1255 ( $\pm 4$ )	1253 ( $\pm 10$ )
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	1497 ( $\pm 2$ )	1469 ( $\pm 7$ )	1464 ( $\pm 3$ )	1469 ( $\pm 10$ )
$e$ (%)	16.8 ( $\pm 0.9$ )	14.2 ( $\pm 1.0$ )	12.1 ( $\pm 1.8$ )	18.0 ( $\pm 1.3$ )
$Z$ (%)	38.8 ( $\pm 0.4$ )	41.8 ( $\pm 1.8$ )	43.4 ( $\pm 1.8$ )	41.3 ( $\pm 2.2$ )
Hardness (HRC)	43.6 ( $\pm 1.1$ )	43.6 ( $\pm 0.6$ )	43.4 ( $\pm 0.8$ )	43.1 ( $\pm 1.1$ )
$K_{IC}$ fracture toughness (MPam <sup>1/2</sup> ) <sup>a</sup>	54.8 ( $\pm 1.7$ )	67.1 ( $\pm 5.7$ )	62.3 ( $\pm 1.5$ )	77.4 ( $\pm 6.6$ )



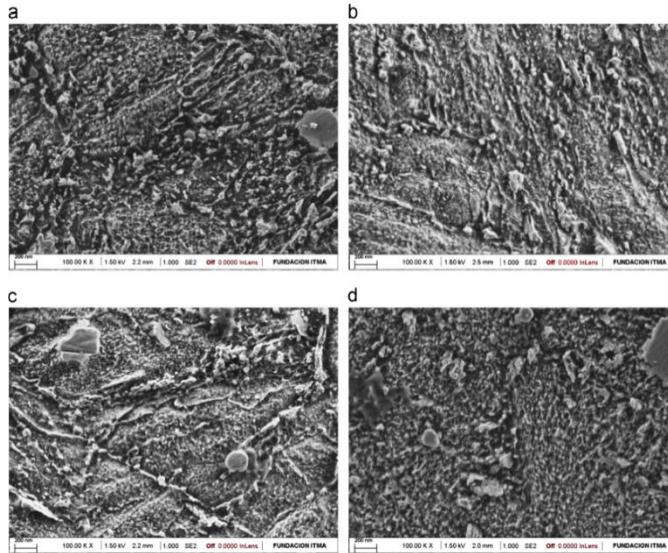
Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει, η διαφορά στη σκληρότητα μετά το τέλος της κάθε κατεργασίας είναι αμελητέα. Επιπλέον, η εξέλιξη της μέσης σκληρότητας των δοκιμίων 1 και 2 κατά τη διάρκεια όλης της θερμικής κατεργασίας στην οποία υποβάλλονται παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Και σε αυτή τη περίπτωση, συγκρίνοντας τις δύο κατεργασίες φαίνεται ότι η σκληρότητα των δοκιμίων στο τέλος δεν έχει σημαντικές διαφορές. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η μεταβολή της παραμέτρου FWHM. Η παράμετρος αυτή αποτελεί μια ένδειξη για τη παραμόρφωση της δομής του υλικού. Συγκεκριμένα, συνδέεται με τη πυκνότητα των διαταραχών και την ύπαρξη εναπομείναντων μικροτάσεων. Επομένως, ο συγκεκριμένος δείκτης αποτελεί ένα μέσο για τον χαρακτηρισμό της σκληρότητας του υλικού καθώς οι θερμικές τάσεις και οι τάσεις παραμόρφωσης τείνουν να αυξήσουν τις τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις και τη πυκνότητα των διαταραχών του υλικού.



Διάγραμμα 11: Μεταβολή σκληρότητας και δείκτη FWHM για τα δοκίμια 1 και 2 κατά τη διάρκεια της θερμικής τους κατεργασίας.

Σε ότι αφορά τη μικροδομή, αναμένεται να παρατηρηθεί η ύπαρξη μαρτενσίτη από επαναφορά καθώς και λεπτών, σφαιρικών και ομοιόμορφα κατανεμημένων καρβιδίων. Ειδικότερα, πρωτογενή καρβίδια βαναδίου ( $M_6C$ ) αναμένεται να δημιουργηθούν στον H13 κατά την ωστενιτοποίηση του τους  $1020^{\circ}C$ . Επιπλέον, καρβίδια μολυβδαινίου/σιδήρου ( $M_6C$ ) και χρωμίου/σιδήρου ( $M_7C_3$ ) μπορεί να είναι εμφανή λόγω της εφαρμογής χαμηλών θερμοκρασιών ωστενιτοποίησης. Αντιθέτως, δευτερογενή μικροκαρβίδια ( $M_7C_3$ ) αναμένεται να δημιουργηθούν στα όρια των κόκκων κατά την βαφή του υλικού. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η κρυογενική κατεργασία και η διαδικασία της επαναφοράς δεν επηρεάζουν τη μορφολογία των πρωτογενών καρβιδίων και των δευτερογενών

μικροκαρβιδίων, αλλά μόνο των δευτερογενών νανοκαρβιδίων. Στη κατεργασία λοιπόν Νο1, τα καρβίδια φαίνεται να έχουν μία σχετικά διογκωμένη και επίμηκες δομή σε αντίθεση με τη μικροδομή της Νο4 κατεργασίας όπου τα καρβίδια είναι λεπτότερα, πιο σφαιρικά και πιο ομοιόμορφα κατανομημένα. Εντωμεταξύ, οι κατεργασίες Νο2 και Νο3 οδήγησαν σε μια ενδιάμεση κατανομή καρβιδίων συγκριτικά με τις προηγούμενες κατεργασίες.



Εικόνα 21: Μικροδομή δοκιμίων μετά τη κατεργασία α) Νο1, β) Νο2, γ) Νο3 και δ) Νο4.

Το ποσοστό των καρβιδίων μετά από τη κάθε κατεργασία παρατίθεται στον πίνακα ακολουθεί. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κρυογενική κατεργασία οδήγησε στην αύξηση του ποσοστού των καρβιδίων στον H13 κατά 22,3% και 8,2% συγκριτικά με τις κατεργασίες στις οποίες δεν έγινε το στάδιο της κρυογενικής.

Πίνακας 14: Ποσοστό καρβιδίων.

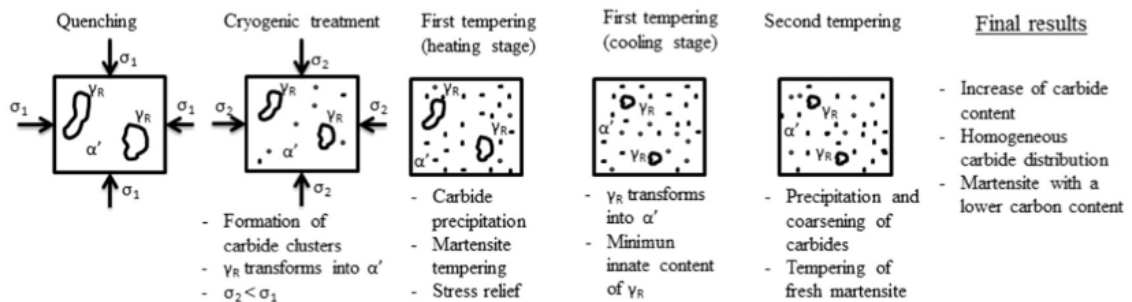
Heat treatment	HT1	HT2	HT3	HT4
Carbide content, $V_c$ (%)	11.2	13.7	13.4	14.5

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κρυογενική κατεργασία δημιουργεί θερμικές τάσεις οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε μία αύξηση των ατελειών στη δομή του υλικού κάνοντας με τη σειρά τους τον υπερκορεσμένο σε άνθρακα μαρτενσίτη ασταθή. Τα άτομα του άνθρακα λοιπόν, κινούνται προς αυτές τις ατέλειες και δημιουργούν συμπλέγματα μέσω δύο διαφορετικών μηχανισμών. Ο ένας μηχανισμός είναι αυτός της διάχυσης σε κοντινές αποστάσεις. Ο άλλος είναι αυτός τη μεταφοράς των ατόμων του άνθρακα μέσω της κίνησης των διαταραχών. Σε κάθε περίπτωση, ο μαρτενσίτης αποσυντίθεται προκαλώντας την έναρξη της κατακρήμνισης των καρβιδίων κατά την επαναφορά της θερμοκρασίας του

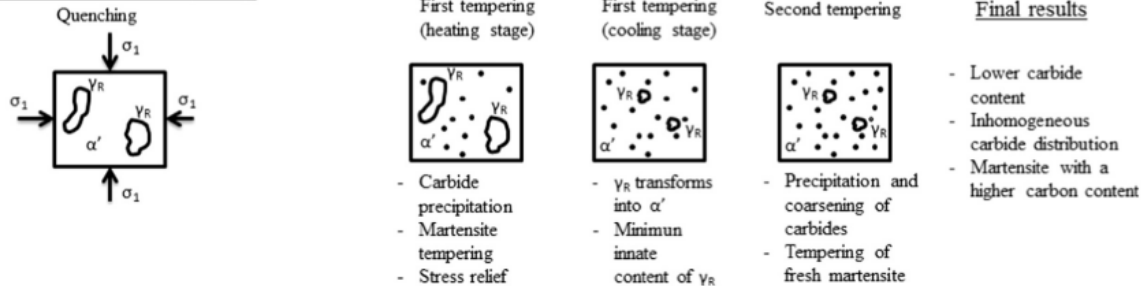


υλικού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των εναπομείναντων τάσεων. Παρόλα αυτά, οι κύριες αλλαγές στη μικροδομή συμβαίνουν κατά τη διαδικασία της πρώτης επαναφοράς, καθώς συμβαίνει μια σημαντική κατακρήμνιση καρβιδίων στο μεγάλο αριθμό ατελειών που δημιουργήθηκαν κατά το στάδιο της βαφής και της κρυογενικής κατεργασίας. Τα καρβίδια αυτά, τα οποία ονομάζονται η-καρβίδια εμφανίζονται στην αρχή του σταδίου της επαναφοράς. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται μια πυρηνοποίηση  $M_3C$  καρβιδίων στα η-καρβίδια. Το τελευταίο βήμα είναι η δημιουργία των καρβιδίων κραματικών στοιχείων τα οποία είναι υπεύθυνα για τη δευτερογενή σκλήρυνση του υλικού. Στη περίπτωση εργαλειοχαλύβων οι οποίοι περιέχουν χρώμιο, τα  $M_3C$  καρβίδια μετατρέπονται σε  $M_3C_7$ . Στους εργαλειογάλυβες που περιέχουν μολυβδαίνιο τα  $M_3C$  καρβίδια μετατρέπονται σε  $M_2C$ . Στον εργαλειογάλυβα H13, ο οποίος περιέχει και χρώμιο και μολυβδαίνιο τα  $M_3C$  καρβίδια μετατρέπονται σε  $M_3C_7$  και  $M_2C$ . Τα δύο παραπάνω είδη καρβιδίων μπορούν να μετατραπούν στις πιο σταθερές μορφές τους ( $M_{23}C_6$  και  $M_6C$ ) όταν η διαδικασία της επαναφοράς είναι παρατεταμένη ή επαναλαμβάνεται. Αποτέλεσμα της διαδικασίας που περιεγράφηκε παραπάνω είναι η ομοιογενής διασπορά πολύ λεπτών καρβιδίων. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η αλλαγή στη δομή του υλικού στη κατεργασία με ή χωρίς ο στάδιο της κρυογενικής.

### Quenching + Cryogenic treatment + Tempering



### Quenching + Tempering



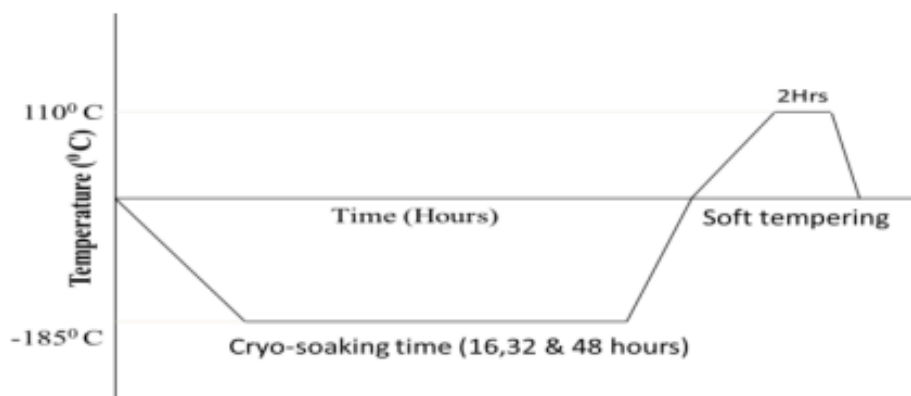
Εικόνα 22: Στάδια αλλαγής στη δομή του υλικού στη κατεργασία με ή χωρίς το στάδιο της κρυογενικής.

Τέλος, σε ότι έχει να κάνει με το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη, μετά και το τέλος της 3<sup>ης</sup> επαναφοράς το ποσοστό αυτό έπεσε περίπου στο 3% για όλες τις κατεργασίες. Ειδικότερα, στις κατεργασίες στις οποίες συμπεριλήφθηκε και το στάδιο της κρυογενικής, το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη ήταν μικρότερο συγκριτικά με τις άλλες δύο.

Πίνακας 15: Ποσοστό εναπομείναντα ωστενίτη.

Heat treatment	HT1	HT2	HT3	HT4
Retained austenite content without carbide correction <sup>a</sup>	3.7 ( $\pm 1.3$ )	2.3 ( $\pm 1.2$ )	2.9 ( $\pm 1.1$ )	2.5 ( $\pm 1.0$ )
Retained austenite content after carbide correction <sup>b</sup>	3.3 ( $\pm 1.1$ )	2.0 ( $\pm 1.0$ )	2.5 ( $\pm 1.0$ )	2.2 ( $\pm 1.0$ )

Ο Bhavar V. και οι συνεργάτες του, [20] θέλησαν να ερευνήσουν την επίδραση που θα έχει στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού H13 ο χρόνος παραμονής σε υπομηδενικές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό, παρήχθησαν δοκίμια σε κατάλληλες διαστάσεις προκειμένου να κατεργαστούν θερμικά. Η θερμική τους κατεργασία περιλάμβανε τη ωστενιτοποίηση τους στους 1030°C για 60 min με το επόμενο βήμα να είναι η βαφή τους σε αναδευόμενο λουτρό από λάδι. Μετά τη διαδικασία της σκλήρυνσης, τα δοκίμια θερμάνθηκαν στους 560°C για 2h και στη συνέχεια ψύχθηκαν μέσω αέρα προκειμένου να έρθουν στη θερμοκρασία δωματίου. Η διαδικασία αυτή ήταν η συμβατική θερμική κατεργασία που εφαρμόστηκε για όλα τα δοκίμια. Εν συνεχεία, ορισμένα δοκίμια ψύχθηκαν στους -185°C, με ρυθμό ψύξης 3°C/min προκειμένου να αποφευχθεί το θερμικό σοκ, και παρέμειναν εκεί για 16, 32 και 48. Τέλος, τα συγκεκριμένα δοκίμια θερμάνθηκαν ελαφρώς στους 110°C για 2h προτού ακολουθήσει η ψύξη τους με αέρα προκειμένου να έρθουν στη θερμοκρασία δωματίου.

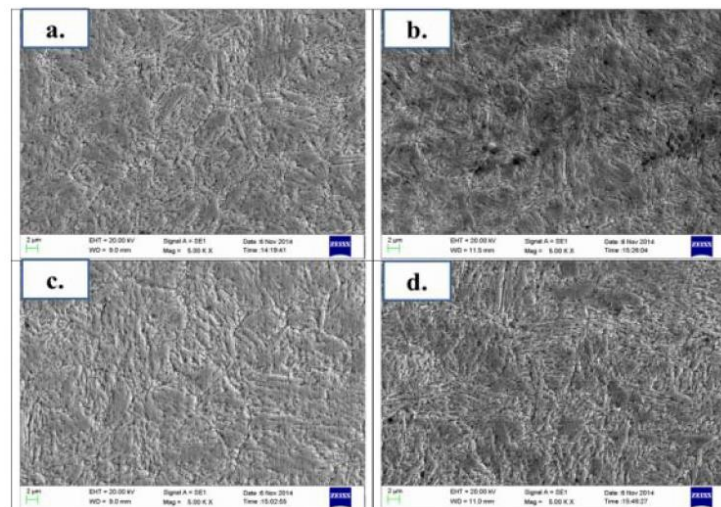


Διάγραμμα 12: Στάδιο κρυογενικούς και επαναφοράς δοκιμίων.

Πίνακας 16: Συνοπτική παρουσίαση κατεργασιών που πραγματοποιήθηκαν.

Sr.no.	Sample treatment	Nomenclature
1	Hardening and tempering (conventional)	HT
2	DCT with 16 hours soaking time	DCT16
3	DCT with 32 hours soaking time	DCT32
4	DCT with 48 hours soaking time	DCT48

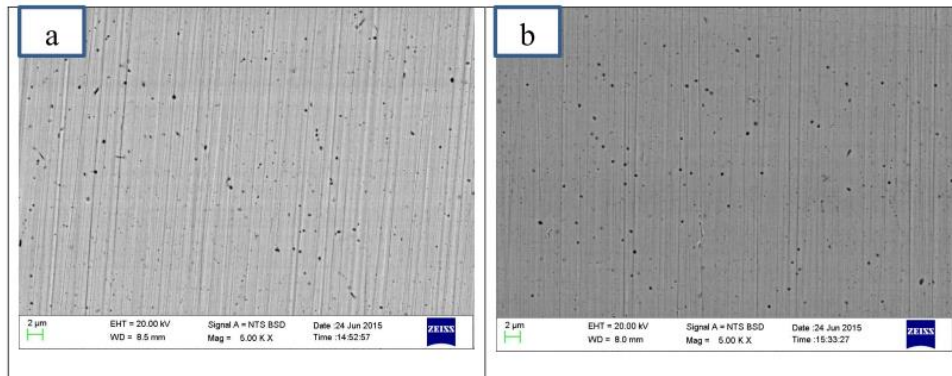
Αναφορικά με τη μικροδομή των δοκιμίων, εκείνο το οποίο υπέστη τη συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης φαίνεται να έχει μαρτενσίτη από επαναφορά σε μορφή βελόνων καθώς και καρβίδια χρωμίου, μολυβδαινίου και βαναδίου. Στα δοκίμια τα οποία κατεργάστηκαν κρυογενικώς παρατηρούνται πιο εκλεπτυσμένες βελόνες μαρτενσίτη. Η διάρκεια παραμονής στην υπομηδενική θερμοκρασία φαίνεται να έχει και αυτή σημαντική επίδραση στη μικροδομή του υλικού. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής του υλικού στην υπομηδενική θερμοκρασία, τόσο οι βελόνες μαρτενσίτη γίνονται πιο λεπτές και συνάμα κατανέμονται πιο ομοιόμορφα.



Εικόνα 23: Μικροδομή του υλικού μετά τη κατεργασία α) No1, β) No2, γ) No3 και δ) No4.

Επιπλέον, η μικροδομή του δοκιμίου που υπέστη τη κατεργασία No1 φαίνεται να αποτελείται κυρίως από πρωτογενή και δευτερογενή καρβίδια. Αντιθέτως, στα δοκίμια τα οποία κατεργάστηκαν κρυογενικώς, πέρα από την ύπαρξη των πρωτογενών και δευτερογενών καρβιδίων παρατηρείται η ύπαρξη και πολύ λεπτών καρβιδίων τα οποία αυξάνουν τη πυκνότητα σε καρβίδια του υλικού. Συγκεκριμένα, στη πρώτη κατεργασία το ποσοστό αυτό είναι 4,3% ενώ στα κρυογενικώς κατεργασμένα δοκίμια είναι 5,7%.

Ακόμα, η κρυογενική κατεργασία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του υπολειπόμενου ωστενίτη στα δοκίμια.



Εικόνα 24: Ποσοστό καρβιδίων στη α) Συμβατική θερμική κατεργασία και β) Κρυογενική κατεργασία.

Επιπλέον, η κρυογενική κατεργασία φαίνεται να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας των δοκιμίων κατά 1-2 HRC συγκριτικά με τη συμβατική θερμική κατεργασία. Αυτό οφείλεται πιθανώς στη πλήρη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη και στην αύξηση της πυκνότητα σε καρβίδια στη δομή του υλικού. Η υψηλότερη σκληρότητα εντοπίζεται στη περίπτωση παραμονής του υλικού για 32h στη κρυογενική θερμοκρασία.

Πίνακας 17: Σκληρότητα δοκιμίων.

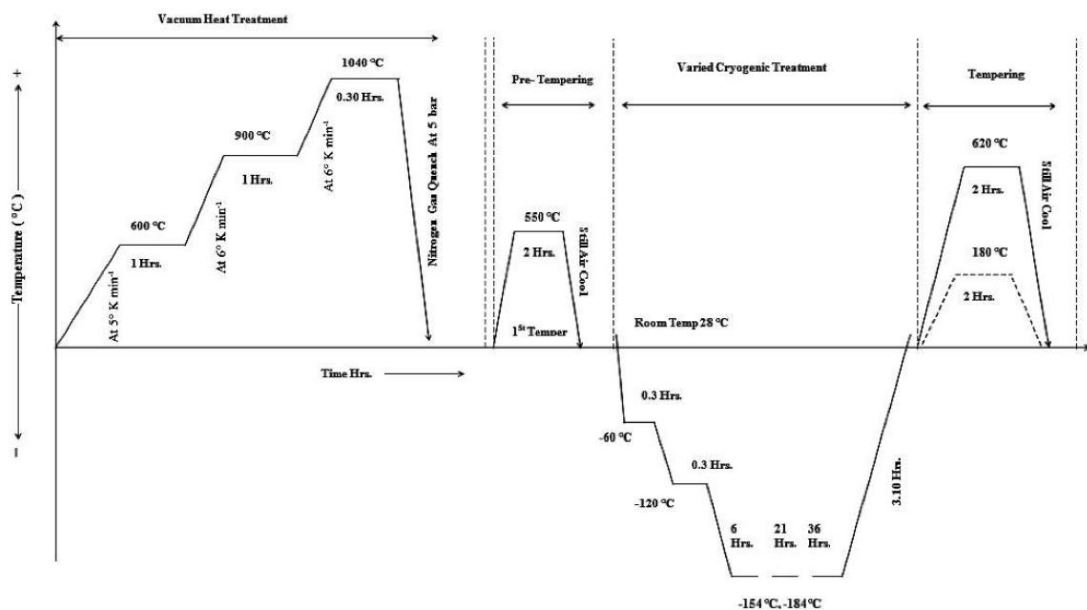
Sample treatment condition	Hardness (HRC)	Impact toughness (J)
HT	50.1	16.2
DCT16	52.1	16.7
DCT32	52.3	19.1
DCT48	51.8	17.5

Τέλος, στη μελέτη που διεξήγαγαν ο S. Katoch και οι συνεργάτες του, [26] μελέτησαν την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη σκληρότητα και τη μικροδομή του υλικού H13 συγκριτικά με τη συμβατική θερμική κατεργασία σκλήρυνσής του. Για το σκοπό αυτό παράχθηκε ορισμένος αριθμός δοκιμίων με διαστάσεις 6,35x6.35x9 mm από ράβδο διαμέτρου 16 mm. Αρχικά, όλα τα δοκίμια ωστενιτοποιήθηκαν στη θερμοκρασία των 1040°C για 30min με επακόλουθο βήμα να είναι η ψύξη τους μέσω αέριου αζώτου σε πίεση 5 bar μέχρις ότου να φτάσουν τη θερμοκρασία δωματίου. Εν συνεχεία τα δοκίμια χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες. Στη πρώτη κατηγορία δεν εκτελέστηκε το στάδιο της κρυογενικής. Έτσι μετά τη βαφή, ακολούθησε η τριπλή επαναφορά του υλικού στους 550°C, 570°C και

620°C. Στη δεύτερη κατηγορία τα δοκίμια κατεργάστηκαν κρυογενικώς για 6, 21 και 36 ώρες στους -154°C μετά τη βαφής τους. Ακολούθως, θερμάνθηκαν στους 620°C για 2h. Η τρίτη κατεργασία είναι ακριβώς ίδια με τη προηγούμενη με τη μόνη διαφορά να είναι η θερμοκρασία κρυογενικού κατεργασίας. Στη συγκριμένη περίπτωση ήταν -184°C. Προκείμενου να μην υποστούν τα δοκίμια θερμικό σοκ, ο ρυθμός ψύξης/θέρμανσης κατά τη κρυογενική κατεργασία ήταν 1K/min.

Πίνακας 18: Συνοπτική παρουσίαση των κατεργασιών που ακολουθήθηκαν.

S.No.	Nomenclature	Depiction of treatment
1	A3T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, quench pressure = 5 bar, Three T = 550 °C, 570 °C, 620 °C respectively for 2 h.
2	ATC1(6)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C1, ST = 6 h, T = 620 °C for 2 h.
3	ATC1(21)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C1, ST = 21 h, T = 620 °C for 2 h.
4	ATC1(36)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C1, ST = 36 h, T = 620 °C for 2 h.
5	ATC2(6)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C2, ST = 6 h, T = 620 °C for 2 h.
6	ATC2(21)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C2, ST = 21 h, T = 620 °C for 2 h.
7	ATC2(36)T	VFA = 1040 °C, ST = 30 min, Nitrogen gas quench, Quench pressure = 5 bar, T = 550 °C for 2 h, C2, ST = 36 h, T = 620 °C for 2 h.



Διάγραμμα 13: Κρυογενική κατεργασία εργαλειοχάλυβα H13.

Στη συνέχεια, παρατίθεται ο πίνακας με τη μικροσκληρότητα και μακροσκληρότητα που απέκτησαν τα δοκίμια μετά το τέλος της κάθε κατεργασίας. Όπως μπορεί κανείς εύκολα να δει, η μέγιστη σκληρότητα εντοπίζεται στη κατεργασία ATC1(6)T, η οποία είναι

μεγαλύτερη κατά 3,1% από τη συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης. Επίσης, η πιο σημαντική παρατήρηση είναι ότι η σκληρότητα και στις δύο κρυογενικές κατεργασίες αυξάνεται μέχρι τις 6 ώρες παραμονής, ενώ στη συνέχεια τείνει να μειωθεί φτάνοντας σε τιμές χαμηλότερες και από εκείνη της συμβατικής θερμικής κατεργασίας. Συγκεκριμένα η μείωση είναι 4% για τη κατεργασία C1 και 5,2% για τη κατεργασία C2. Η αύξηση στη σκληρότητα οφείλεται στη εξάλειψη του υπολειπόμενου ωστενίτη, τη κατακρήμνιση λεπτών καρβιδίων και στην ομοιόμορφη κατανομή τους στη μάζα του υλικού. Στη περίπτωση της παραμονής των δοκιμίων για παραπάνω ώρα στην υπομηδενική θερμοκρασία, αυτό που συμβαίνει είναι η διάγκωση των βελόνων μαρτενσίτη και η ανάπτυξη μεγάλων καρβιδίων κατά τη κατακρήμνιση. Η αύξηση του μεγέθους των καρβιδίων οφείλεται στο διαχωρισμό του άνθρακα. Αυτό προκαλεί μείωση στη πυκνότητα σε δευτερογενή καρβίδια στη μάζα του υλικού άρα την μείωση της αντοχής της. Στη περίπτωση της μακροσκληρότητας ισχύουν ακριβώς τα ίδια.

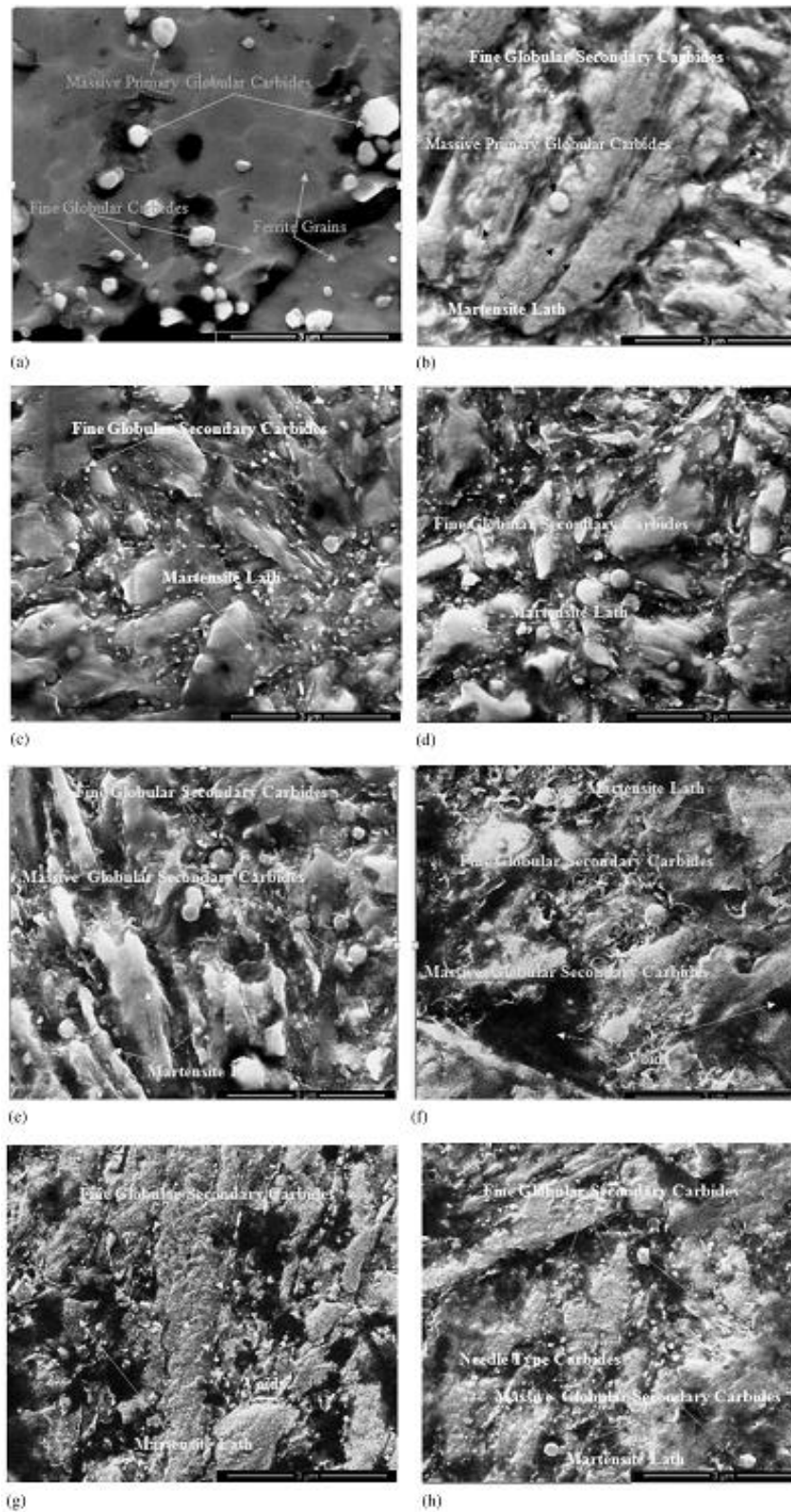
*Πίνακας 19: Σκληρότητα δοκιμίων μετά το τέλος της κάθε θερμικής κατεργασίας.*

Treatment conditions	Mean microhardness (HV <sub>1</sub> )	SE of Mean	Treatment conditions	Mean hardness (HRc)	SE of Mean
A3T	450.20	2.26	A3T	44.84	0.19
ATC1(6)T	464.40	2.06	ATC1(6)T	46.36	0.20
ATC1(21)T	443.40	1.88	ATC1(21)T	44.12	0.10
ATC1(36)T	433.60	1.60	ATC1(36)T	43.14	0.07
ATC2(6)T	452.10	2.19	ATC2(6)T	45.14	0.14
ATC2(21)T	434.80	2.85	ATC2(21)T	43.58	0.17
ATC2(36)T	426.40	1.80	ATC2(36)T	42.82	0.11

Στη συνέχεια, παρατίθενται ορισμένες εικόνες από τη μικροδομή του υλικού μετά το πέρας της κάθε κατεργασίας. Η δομή του υλικού, όπως αυτό πάρθηκε από τον προμηθευτή και μετά από τη διαδικασία της ανόπτησης, αποτελείται από λεπτά σφαιρικά καρβίδια σε μήτρα φερρίτη. Στη περίπτωση της συμβατικής θερμικής κατεργασίας του υλικού, η δομή του αποτελείται από βελόνες μαρτενσίτη, λεπτά σφαιρικά καρβίδια και ένα ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη. Τα δοκίμια τα οποία κατεργάστηκαν κρυογενικώς, φαίνεται να έχουν αυξημένη πυκνότητα σε δευτερογενώς κατακρημνισμένα καρβίδια τα οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στη δομή του υλικού. Επίσης, οι βελόνες μαρτενσίτη παρουσιάζουν μια διάγκωση καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στις υπομηδενικές θερμοκρασίες. Τέλος, στη παρούσα μελέτη δεν μπόρεσε να βρεθεί κάποια τεκμηρίωση



σχετικά με την πλήρη μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη κατά την αύξηση του χρόνου παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία.



Εικόνα 25: Μικροδομή δοκιμίων.



Εν κατακλείδι, μέσα από τις παραπάνω μελέτες έχει γίνει άμεσα αντιληπτό ότι η κρυογενική κατεργασία επηρεάζει σημαντικά τη μικροδομή και τις ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων. Η κατεργασία του υλικού σε υπομηδενικές θερμοκρασίες έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερων δευτερογενών καρβιδίων καθώς και την αύξηση της περιεκτικότητας σε αυτά. Επιπλέον, ο υπολειπόμενος ωστενίτης μέσα στη μήτρα του υλικού μετατρέπεται σε μαρτενσίτη οδηγώντας στην αύξηση της μικροσκληρότητας και της μακροσκληρότητας. Παρόλα αυτά, καθώς ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετατρέπεται σε φρέσκο μαρτενσίτη, αυξάνονται οι εσωτερικές τάσεις στο υλικό και άρα η ψαθυρότητα του. Με την διαδικασία της επαναφοράς που ακολουθεί επιτυγχάνεται η χαλάρωση των τάσεων και η σταθερότητα του υλικού. Τέλος, ο εργαλειοχάλυβας χαρακτηρίζεται από αυξημένη σκληρότητα και αντοχή, αντοχή στη φθορά και χρόνο ζωής. Η επίδραση της θερμικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα εξαρτάται από το είδος του υλικού (ιδιότητες, περιεκτικότητα σε άνθρακα) και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξάγεται η εκάστοτε κατεργασία. Ειδικότερα, η θερμοκρασία κρυογενικής κατεργασίας και ο χρόνος παραμονής σε αυτή παίζουν σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Πειραματικό Μέρος

### 2.1 Εισαγωγή.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή του πειραματικού σκέλους της διπλωματικής εργασίας. Αναλυτικότερα, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, το υλικό το οποίο μελετάται είναι ο εργαλειοχάλυβας H13, ή αλλιώς Uddeholm Onar 2M. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, η μελέτη της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στη σκληρότητα του συγκεκριμένου εργαλειοχάλυβα, ο προσδιορισμός του δευτερογενούς σημείου σκλήρυνσής του και η μελέτη των αλλαγών στη μικροδομή του. Για το λόγο αυτό, στα πειράματα τα οποία έγιναν, ακολουθήθηκε η παραδοσιακή θερμική κατεργασία για τη σκλήρυνση του εργαλειοχάλυβα συν το στάδιο της κρυογενικής κατεργασίας. Για τον εντοπισμό του δευτερογενούς σημείου σκλήρυνσης, έγινε «επαναφορά» των δοκιμίων σε 9 διαφορετικές θερμοκρασίες «επαναφοράς» (εφεξής και για λόγους συντομίας θα αναφέρονται ως Θ.Ε). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε παρατίθεται επιγραμματικά παρακάτω.

- Προετοιμασία δοκιμίων
- Ωστενιτοποίηση
- Βαφή
- Snap Tempering
- Κρυογενική
- Επαναφορές

Στη συνέχεια, έγινε σκληρομέτρηση των δοκιμίων. Αποτέλεσμα αυτού του σταδίου είναι η δημιουργία ενός διαγράμματος *Τιμή Σκληρότητας-Θ.Ε*. Επιπλέον, ελήφθησαν εικόνες στις οποίες φαίνεται η μικροδομή του εργαλειοχάλυβα μετά το πέρας των παραπάνω κατεργασιών. Τέλος, έγινε συγκριτική μελέτη μεταξύ των δοκιμίων που κατεργάστηκαν κρυογενικώς καθώς εκείνων που δεν κατεργάστηκαν κρυογενικώς προκειμένου να εντοπιστούν διαφορές στη σκληρότητά τους αλλά και στη μικροδομή τους.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ακολουθήθηκε με ακρίβεια το πρωτόκολλο που θεσπίστηκε για τη πειραματική διαδικασία.

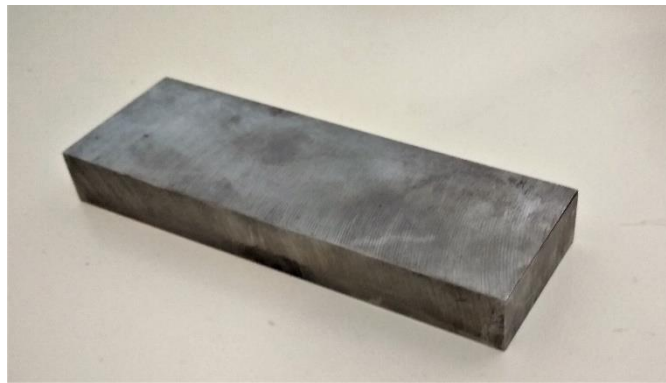
Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει: τα στάδια του πειράματος, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε καθώς και τον τρόπο λήψης των απαιτούμενων μετρήσεων και εικόνων.

## 2.2 1<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Προετοιμασία δοκιμίων.

Στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας έγινε η προετοιμασία των δοκιμίων. Στα πειράματα τα οποία έγιναν, χρησιμοποιήθηκαν 72 δοκίμια από εργαλειοχάλυβα H13. Η προετοιμασία των δοκιμίων έγινε μέσω των ακόλουθων σταδίων:

### I. Κοπή

Τα δοκίμια αποσπάστηκαν από μπάρες εργαλειοχάλυβα H13. Οι διαστάσεις τους επιλέχθηκαν να είναι: 40x15x15 mm.



Εικόνα 26: Μπάρα εργαλειοχάλυβα H13.

### II. Φρεζάρισμα

Η τελική μορφή των δοκιμίων επετεύχθη μέσω της κατεργασίας του φρεζαρίσματος.

### III. Τελική προετοιμασία

Σε αυτό το στάδιο γίνεται η τελική διαμόρφωση των δοκιμίων πριν μπουν στον φούρνο για το στάδιο της ωστενιτοποίησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο αριθμός των δοκιμίων είναι 72. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να γίνει πιο εύκολη η διαχείριση των δοκιμίων καθόλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας, τα χωρίζουμε σε 8 ομάδες κάθε μια αποτελούμενη από 9 δοκίμια. Όλα τα δοκίμια διαθέτουν μια διαμπερή τρύπα στη μια πλευρά τους, πράγμα που βοηθά στη καλύτερη στήριξη και ομαδοποίησή τους. Επιπλέον, όλα τα δοκίμια είναι αριθμημένα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι, μόνο ορισμένα

δοκίμια θα χρησιμοποιηθούν στο στάδιο της κρυογενικής. Τα υπόλοιπα θα τα χρησιμοποιήσουμε σαν controls, για να μας βοηθήσουν στη μελέτη της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στη συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα. Αναλυτικότερα,

- a. Δοκίμια **41 – 58**: Συμβατική κατεργασία συν κρυογενική (12 ώρες,  $-195^{\circ}\text{C}$ ).
- b. Δοκίμια **59 – 76**: Συμβατική κατεργασία χωρίς κρυογενική.
- c. Δοκίμια **77 – 94**: Συμβατική κατεργασία συν κρυογενική (1 ώρα,  $-195^{\circ}\text{C}$ ).
- d. Δοκίμια **95 – 112**: Συμβατική κατεργασία συν κρυογενική (4 ώρες,  $-195^{\circ}\text{C}$ ).

Τα δοκίμια καθώς και ο τρόπος ομαδοποίησής τους φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 27: Δοκίμιο εργαλειοχάλυβα H13 πριν από τη θερμική κατεργασία.



Εικόνα 28: Μορφή ομαδοποιημένων δοκιμίων πριν από τη θερμική κατεργασία.

### 2.3 2<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Ωστενιτοποίηση.

Όπως αναφέραμε και στο θεωρητικό μέρος, το πρώτο στάδιο της συμβατικής κατεργασίας σκλήρυνσης του εργαλειοχάλυβα είναι η ωστενιτοποίηση. Σε αυτή τη φάση, τα δοκίμια θερμαίνονται με χρήση ενός φούρνου βιομηχανικού τύπου μέχρι τη θερμοκρασία των 1030°C (θερμοκρασία ωστενιτοποίησης). Ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε, κατασκευής *Thermawatt*, βρίσκεται στο ισόγειο του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π και είναι τύπου «κουτιού».

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 29: Φούρνος τύπου «κουτιού», κατασκευής *Thermawatt*.

Όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα, ο φούρνος διαθέτει:

- Φωτεινή ένδειξη της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φούρνου.
- Διακόπτη για ρύθμιση επιθυμητής θερμοκρασίας.
- Διακόπτη αυτοματισμού.
- Διακόπτη ρυθμού αύξησης θερμοκρασίας φούρνου
- Διακόπτη λειτουργίας φούρνου.

Ο χρόνος ωστενιτοποίησης ορίζεται στα 55 λεπτά. Ειδικότερα, ο παραπάνω χρόνος επιμερίζεται ως εξής:

- 20 λεπτά: Χρόνος που απαιτείται προκειμένου να φτάσει ο πυρήνας του δοκιμίου στη θερμοκρασία των 1030°C.
- 30 λεπτά: Απαιτούμενος χρόνος ωστενιτοποίησης.
- 5 λεπτά: Χρόνος ασφαλείας σε περίπτωση που ο πυρήνας των δοκιμίων δεν έφτασε στην απαιτούμενη θερμοκρασία.

Καθώς ο αριθμός των δοκιμίων είναι αρκετά μεγάλος, χρειάστηκε να επαναληφθεί η διαδικασία της ωστενιτοποίησης τέσσερις φορές. Ειδικότερα:

- 1<sup>η</sup> ωστενιτοποίηση: Δοκίμια 41-58 (Ημερομηνία: 2/3/18)
- 2<sup>η</sup> ωστενιτοποίηση: Δοκίμια 59-76 (Ημερομηνία: 2/3/18)
- 3<sup>η</sup> ωστενιτοποίηση: Δοκίμια 77-94 (Ημερομηνία: 22/6/18)
- 4<sup>η</sup> ωστενιτοποίηση: Δοκίμια 95-112 (Ημερομηνία: 22/6/18)

#### Ωστενιτοποίηση Νο1 και Νο2

Αρχικά, τέθηκε σε λειτουργία ο φούρνος με τη θερμοκρασία να έχει ρυθμιστεί στους 1030°C. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του.

Πίνακας 20: Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου.

<b>T [°C]</b>	940	978	993	1007	1021	1027
<b>t [min]</b>	0	5	7	9	11	12

Μόλις το εσωτερικό του φούρνου έφτασε στην επιθυμητή θερμοκρασία, χρειάστηκε να περάσει ένα χρονικό διάστημα προκειμένου η διάταξη να ισορροπήσει σε αυτό το σημείο λειτουργίας. Για να ελεγχθεί εάν ο φούρνος είχε ισορροπήσει, μετρήθηκαν δύο διαδοχικοί κύκλοι του και εξετάστηκε εάν αυτοί οι δύο κύκλοι ταυτίζονται.

Ως κύκλος φούρνου ορίζεται, το χρονικό διάστημα που απαιτείται προκειμένου η ένδειξη της θερμοκρασίας για το εσωτερικό του, ξεκινώντας από μια μέγιστη τιμή, να φτάσει ξανά στη ίδια τιμή.

Στον παρακάτω πίνακα, δίνονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν για δύο διαδοχικούς κύκλους.

Πίνακας 21: Διαδοχικοί κύκλοι φούρνου για ρύθμιση  $T_{set}=1030^{\circ}\text{C}$ .

$T_{set}=1030^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	1029	0	1023	0.20	1022	0.36	1028	0.49	1030	1.09
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	1030	1.09 (0)	1023	1.28 (0.19)	1022	1.43 (0.34)	1028	1.57 (0.48)	1030	2.16 (1.07)

Όπου,

$T_{max}$ : Μέγιστη τιμή ένδειξης θερμοκρασίας για το εσωτερικό του φούρνου.

$T_{min}$ : Ελάχιστη τιμή ένδειξης θερμοκρασίας για το εσωτερικό του φούρνου.

$R_{on}$ : Ενεργοποίηση αντιστάσεων φούρνου.

$R_{off}$ : Απενεργοποίηση αντιστάσεων φούρνου.

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από το παραπάνω πίνακα, ο φούρνος ισορροπεί στην ρύθμιση των  $1030^{\circ}\text{C}$ . Παρόλα αυτά, αν και ο φούρνος έχει φτάσει τη θερμοκρασία των  $1030^{\circ}\text{C}$ , λόγω απωλειών του συστήματος τα δοκίμια θα αποκτήσουν θερμοκρασία μικρότερη από την προαναφερθείσα τιμή. Για το λόγο αυτό, έγινε επαναρίθμιση της θερμοκρασίας του φούρνου στους  $1040^{\circ}\text{C}$ . Ομοίως με πριν, χρειάστηκε να περάσει ένα χρονικό διάστημα μέχρι να ελεγχθεί ξανά η λειτουργία του φούρνου. Οι δύο, νέοι, διαδοχικοί κύκλοι που μετρήθηκαν φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 22: Διαδοχικοί κύκλοι φούρνου για ρύθμιση  $T_{set}=1040^{\circ}\text{C}$ .

$T_{set}=1040^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	1041	0	1033	0.44	1033	0.51	1038	1.04	1041	1.25
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	1041	1.25 (0)	1033	2.09 (0.44)	1033	2.17 (0.52)	1038	2.28 (1.03)	1041	2.49 (1.24)



Αφού ελέγχθηκε η λειτουργία του φούρνου, το επόμενο βήμα ήταν η προετοιμασία των δοκιμών για να την έναρξη του σταδίου της ωστενιτοποίησης. Σε αυτό το σημείο τα δοκίμια, αφού έχουν ομαδοποιηθεί όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2*, καλύπτονται με διηθητικό χαρτί και τοποθετούνται μέσα σε ένα μεταλλικό κουτί. Η ενέργεια αυτή έγινε με σκοπό την αποφυγή της οξείδωσης της επιφάνειας των δοκιμών κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης. Ειδικότερα, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, το οξυγόνο που υπάρχει στο περιβάλλον γύρω από τα δοκίμια μπορεί να απορροφηθεί πολύ πιο εύκολα από το καυτό μέταλλο με αποτέλεσμα τη δημιουργία προϊόντων οξείδωσης. Έτσι, τοποθετώντας το διηθητικό χαρτί γύρω από τα δοκίμια, επιτυγχάνεται η κατανάλωση του οξυγόνου που υπάρχει στην ατμόσφαιρα μέσω της ανάφλεξης του χαρτιού.



*Εικόνα 30: Ομαδοποιημένα δοκίμια τυλιγμένα με χαρτί φίλτρου.*



*Εικόνα 31: Τελική μορφή δοκιμών πριν την εισαγωγή στον φούρνο.*

Στη συνέχεια, ακολουθεί το στάδιο της ωστενιτοποίησης. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα δεδομένα για κάθε μια από τις 2 ωστενιτοποιήσεις.

Πίνακας 23: Δεδομένα Νο1 ωστενιτοποίησης.

<b>Ωστενιτοποίηση Νο1</b>										
Αριθμός δοκιμίων					41-58					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμίων										
$T_{set}=1040^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1033	0.44	1033	0.51	1038	1.03	1041	1.27
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.27 (0)	1033	2.09 (0.42)	1033	2.16 (0.49)	1038	2.29 (1.02)	1041	2.50 (1.23)
Ωρα εισαγωγής δοκιμίων					19:53					
Διάρκεια ανοίγματος-κλεισίματος πόρτας φούρνου					11 sec					
Χρόνος μέχρι $T_{set}$					13.14 min					
Κύκλος φούρνου κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης (Στα 47 min)										
$T_{set}=1040^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1033	1.06	1034	1.14	1038	1.23	1041	1.46
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.46 (0)	1033	2.50 (1.04)	1034	2.59 (1.13)	1038	3.08 (1.22)	1041	3.31 (1.45)
Ωρα εξόδου δοκιμίων					20:49					
Διάρκεια ωστενιτοποίησης					56 min					

Πίνακας 24: Δεδομένα Νο2 ωστενιτοποίησης.

<b>Ωστενιτοποίηση Νο2</b>										
Αριθμός δοκιμίων					59-76					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμίων										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1040	0	1033	0.49	1033	0.52	1038	1.08	1041	1.30
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.30 (0)	1033	2.19 (0.49)	1033	2.23 (0.53)	1038	2.39 (1.09)	1041	3.00 (1.30)
Ωρα εισαγωγής δοκιμίων					21:54					
Διάρκεια ανοίγματος-κλεισίματος πόρτας φούρνου					7 sec					
Χρόνος μέχρι T <sub>set</sub>					11.58 min					
Κύκλος φούρνου κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης (Στα 47 min)										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1033	1.01	1033	1.11	1038	1.19	1041	1.43
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.43 (0)	1033	2.44 (1.01)	1033	2.52 (1.09)	1038	3.02 (1.19)	1041	3.27 (1.44)
Ωρα εξόδου δοκιμίων					22:48					
Διάρκεια ωστενιτοποίησης					54 min					

## Ωστενιτοποίηση Νο3 και Νο4

Για την εκτέλεση των δύο τελευταίων ωστενιτοποιήσεων, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία όπως και στις δύο πρώτες. Αρχικά, έγινε ρύθμιση της θερμοκρασίας του φούρνου και στη συνέχεια καταγράφηκε ο ρυθμός αύξησής της. Στους πίνακες που ακολουθούν, παρατίθενται οι μετρήσεις που ελήφθησαν.

Πίνακας 25: Ρύθμιση φούρνου για τη δεύτερη σειρά ωστενιτοποιήσεων.

<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>	1040 °C
<b>Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας</b>	7 (αλλαγή σε 10 στους 694°C)

Πίνακας 26: Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου.

<b>T [°C]</b>	<b>t [min]</b>	<b>T [°C]</b>	<b>t [min]</b>
18	0	518	120
116	10	545	130
187	21	570	140
233	31	599	152
270	40	616	160
305	50	636	170
338	60	656	180
370	70	680	192
400	80	694	200
428	90	882	212
456	100	993	223
486	110	1039	238

Στους δυο πίνακες που ακολουθούν, παρατίθενται τα στοιχεία από τη διαδικασία των δυο τελευταίων ωστενιτοποιήσεων.

Πίνακας 27: Δεδομένα Νο3 ωστενιτοποίησης.

<b>Ωστενιτοποίηση Νο3</b>										
Αριθμός δοκιμίων					77-94					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμίων [Ωρα: 18:19]										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1040	0	1033	0.32	1033	0.42	1038	0.56	1040	1.15
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1040	1.15 (0)	1033	1.47 (0.32)	1033	1.57 (0.42)	1038	2.10 (0.55)	1041	2.33 (1.18)
Ωρα εισαγωγής δοκιμίων					18:24					
Διάρκεια ανοίγματος-κλεισίματος πόρτας φούρνου					12,5 sec					
Χρόνος μέχρι T <sub>set</sub>					9.10 min					
Κύκλος φούρνου κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης [Ωρα: 19:11]										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1034	0.54	1033	1.01	1038	1.15	1041	1.33
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.33 (0)	1034	2.27 (0.54)	1033	2.37 (1.04)	1038	2.47 (1.14)	1041	3.07 (1.34)
Ωρα εξόδου δοκιμίων					19:17					
Διάρκεια ωστενιτοποίησης					53 min					

Πίνακας 28: Δεδομένα Νο4 ωστενιτοποίησης.

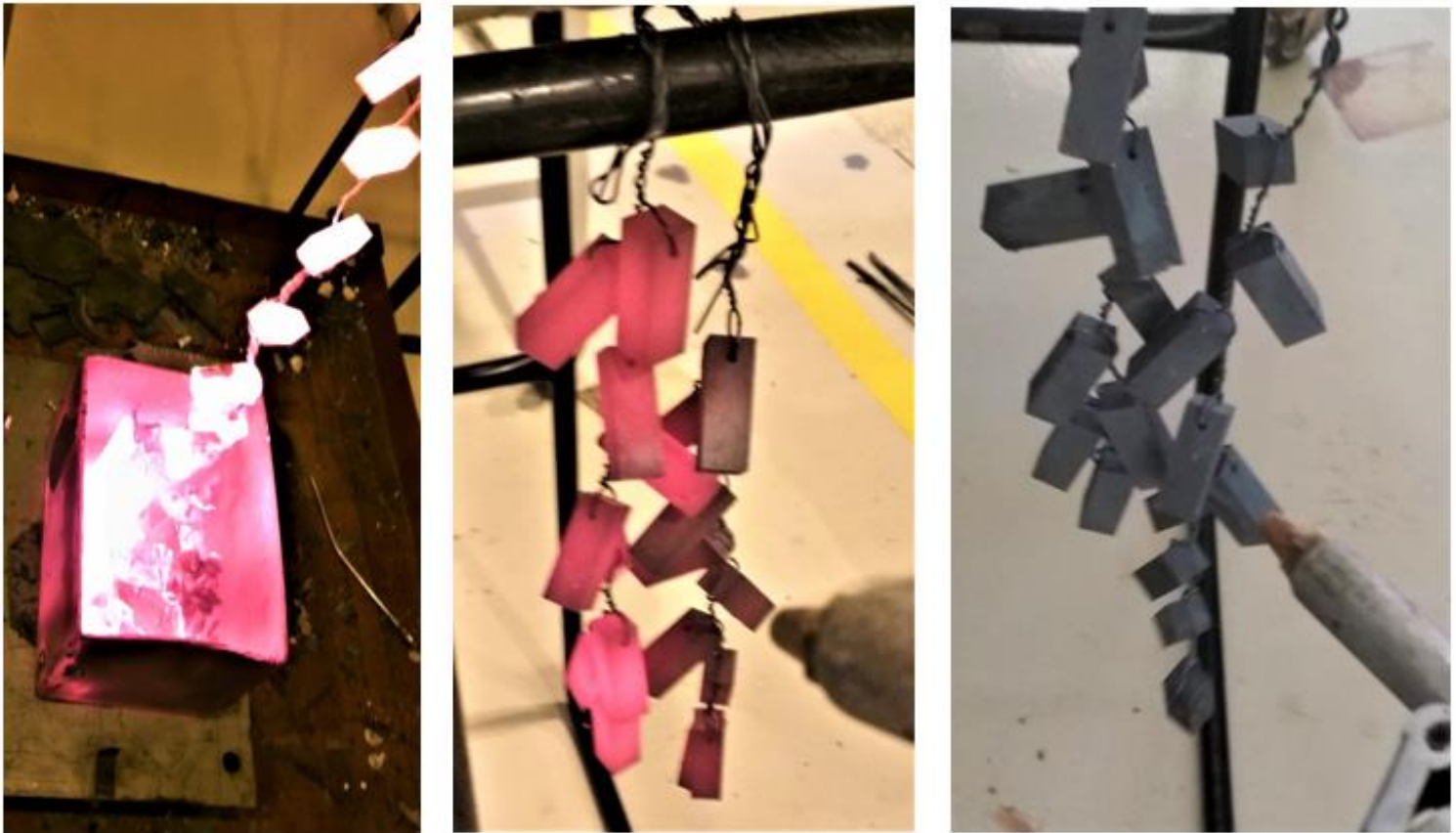
<b>Ωστενιτοποίηση Νο4</b>										
Αριθμός δοκιμίων					95-112					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμίων [Ωρα: 19:54]										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1033	0.42	1033	0.50	1038	1.01	1041	1.27
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.27 (0)	1033	2.08 (0.41)	1033	2.14 (0.47)	1038	2.27 (1.00)	1041	2.50 (1.23)
Ωρα εισαγωγής δοκιμίων					20:02					
Διάρκεια ανοίγματος-κλεισίματος πόρτας φούρνου					8.2 sec					
Χρόνος μέχρι T <sub>set</sub>					10.07 min					
Κύκλος φούρνου κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης [Ωρα: 20:51]										
<b>T<sub>set</sub>=1040°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	0	1033	0.57	1033	1.05	1038	1.17	1041	1.44
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	1041	1.44 (0)	1033	2.41 (0.57)	1033	2.44 (1.00)	1038	2.56 (1.12)	1041	3.20 (1.36)
Ωρα εξόδου δοκιμίων					20:57					
Διάρκεια ωστενιτοποίησης					54.48 min					



## 2.4 3<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Βαφή.

Μετά το στάδιο της ωστενιτοποίησης ακολουθεί το στάδιο της βαφής. Σε αυτή τη φάση, γίνεται ακαριαία απόψυξη των δοκιμίων προκειμένου να αποκτήσουν μαρτενσιτική δομή με αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας τους. Το μέσο απόψυξης, όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος, είναι πεπιεσμένος αέρας. Για το σκοπό αυτό, γίνεται χρήση ενός πιστολιού πεπιεσμένου αέρα το οποίο βρίσκεται στο ισόγειο του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Αναλυτικότερα, τα δοκίμια μετά το στάδιο της ωστενιτοποίησης, εξέρχονται από τον φούρνο σε θερμοκρασία περίπου 1030°C. Στη συνέχεια, και όσο το δυνατόν γρηγορότερα, βγαίνουν από το κουτί και αναρτώνται σε μια αυτοσχέδια διάταξη προκειμένου να αρχίσει το στάδιο της βαφής.



*Εικόνα 32: Δοκίμια κατά τη διάρκεια εξαγωγής από το φούρνο και βαφής τους.*

Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνεται η χρονική διάρκεια κάθε βαφής για κάθε μια ωστενιτοποίηση που πραγματοποιήθηκε.

Πίνακας 29: Διάρκεια βαφής για κάθε μια διαδικασία ωστενιτοποίησης.

Ωστενιτοποίηση	Χρόνος απόψυξης
Ωστενιτοποίηση Νο1	31 min
Ωστενιτοποίηση Νο2	27 min
Ωστενιτοποίηση Νο3	26 min
Ωστενιτοποίηση Νο4	27 min

### 2.5 4<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Snap Tempering.

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της βαφής, ακολουθεί το στάδιο την προσωρινής επαναφοράς των δοκιμίων. Το στάδιο αυτό καλείται διαφορετικά και snap tempering. Για το σκοπό αυτό, τα δοκίμια τοποθετούνται ξανά σε ένα βιομηχανικό φούρνο «τύπου κουτιού». Ο φούρνος αυτός είναι κατασκευής *Thermawatt* και βρίσκεται στο ισόγειο του κτιρίου Α της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Μέσω αυτής της διεργασίας αποφεύγεται η εμφάνιση ρωγμών στα δοκίμια, λόγω της χαλάρωσης των εσωτερικών τάσεων στη δομή τους. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται ο φούρνος που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η τοποθέτηση των δοκιμίων στο εσωτερικό του.



Εικόνα 33: Διαδικασία snap tempering

Η διαδικασία του snap tempering πραγματοποιήθηκε τρεις φορές. Την μια φορά για τα δοκίμια της Νο1 & Νο2 ωστενιτοποίησης, τη δεύτερη φορά για τα δοκίμια της Νο3 ωστενιτοποίησης και τέλος για τη Νο4 ωστενιτοποίηση. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται αναλυτικά τα δεδομένα του συγκεκριμένου πειραματικού σταδίου.

Πίνακας 30: Δεδομένα σταδίου snap tempering.

Snap Tempering	T <sub>set</sub> [°C]	Ωρα Έναρξης	Ωρα Λήξης	Διάρκεια
Snap Tempering No1 (Ωστενιτοποίηση Νο1 & Νο2)	100	23:30	24:32	1h 02min
Snap Tempering No2 (Ωστενιτοποίηση Νο3)	100	20:33	21:33	1h
Snap Tempering No3 (Ωστενιτοποίηση Νο4)	100	21:34	22:34	1h

## 2.6 5<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Κρυογενική.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το στάδιο της κρυογενικής κατεργασίας. Σε αυτή τη φάση της πειραματικής διαδικασίας, τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικό κρυογενικό θάλαμο που υπάρχει στο υπόγειο του κτιρίου Α της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Μέσω της συγκεκριμένης κατεργασίας επιδιώκεται η μείωση του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη στη δομή των δοκιμίων. Ως μέσο ψύξης χρησιμοποιείται υγρό άζωτο το οποίο είναι αποθηκευμένο, υπό πίεση, σε ειδική δεξαμενή που βρίσκεται στον ίδιο χώρο με το κρυογενικό θάλαμο. Η θερμοκρασία βρασμού του αζώτου είναι -196°C, ίδια με τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η ψύξη των δοκιμίων. Σαν αποτέλεσμα, το άζωτο δεν προλαβαίνει να μεταβεί στην αέρια φάση του και άρα εισέρχεται ως υγρό στο κρυογενικό θάλαμο. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη συγκεκριμένη κατεργασία.



*Εικόνα 34: Κρυογενικός θάλαμος και δεξαμενή αποθήκευσης αζώτου.*

Αρχικά, γίνεται η ρύθμιση των παραμέτρων της κρυογενικής κατεργασίας στο πίνακα ελέγχου του κρυογενικού θαλάμου. Αναλυτικότερα, καθορίζεται ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου, η επιθυμητή θερμοκρασία καθώς και η διάρκεια παραμονής του θαλάμου σε αυτή τη θερμοκρασία. Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι μόνο ορισμένα δοκίμια κατεργάστηκαν κρυογενικά. Εν συνεχεία, γίνεται η εισαγωγή των δοκιμίων. Για τη λήψη όσο το δυνατόν καλύτερων αποτελεσμάτων, θα πρέπει τα δοκίμια να εφάπτονται με τον πυθμένα του θαλάμου. Ακολούθως, ασφαρίζεται ο θάλαμος και ανοίγουν οι δύο κεντρικές βαλβίδες της διάταξης. Μόλις ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω βήματα, ξεκινάει η διαδικασία της κρυογενικής. Τέλος, τα δοκίμια εξέρχονται από τον θάλαμο και αναρτώνται σε μια αυτοσχέδια διάταξη προκειμένου να έλθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 35: Δοκίμια μετά την έξοδο από τον κρυογενικό θάλαμο.*

Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης κατεργασίας, μικρή ποσότητα αερίου αζώτου διαχέονταν στη γύρω ατμόσφαιρα. Για το λόγο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή, διότι παρόλο που το αέριο άζωτο είναι διαφανές, άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη τοξικό, μπορεί να προκαλέσει ασφυξία.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα δεδομένα του συγκεκριμένου πειραματικού σταδίου.

*Πίνακας 31: Δεδομένα κρυογενικής κατεργασίας.*

Κρυογενική	Δοκίμια 41-58	Δοκίμια 77-94	Δοκίμια 95-112
Θερμοκρασία [°C]	-195	-195	-195
Ωρα παραμονής [h]	12	1	4
Μείωση θερμοκρασίας [°C/min]	-2.5	-2.5	-2.5
Αρχική πίεση δεξαμενής [bar]	3.2	3.9	3.9
Τελική πίεση δεξαμενής [bar]	3.9	3.6	3.6
Αρχική θερμ./Ωρα [°C/min]	16/00:53	27/22:12	23/8:08
Τελική Θερμ./Ωρα [°C/min]	-169/15:27	-175/00:51	-167/14:47

## 2.7 6<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Επαναφορές.

Στο συγκεκριμένο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας γίνεται η επαναφορά των δοκιμίων μέσα σε ένα τήγμα άλατος, αφού αυτά έχουν κατεργαστεί κρυογενικώς. Σκοπός είναι, η μετατροπή του μαρτενσίτη μετά από βαφή σε μαρτενσίτη μετά από επαναφορά, και άρα η

αύξηση της δυσθραυστότητας των δοκιμίων συνοδευόμενη από μια μείωση της σκληρότητάς τους.

Αναλυτικότερα, οι απαιτούμενες επαναφορές πραγματοποιήθηκαν στον ίδιο βιομηχανικό φούρνο που έγινε και η ωστενιτοποίηση των δοκιμίων. Αρχικά, τα δοκίμια ομαδοποιήθηκαν σε ζευγάρια τα οποία στη συνέχεια ενώθηκαν ανά δύο μεταξύ τους όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 36: Μορφή δοκιμίων κατά το στάδιο των επαναφορών.

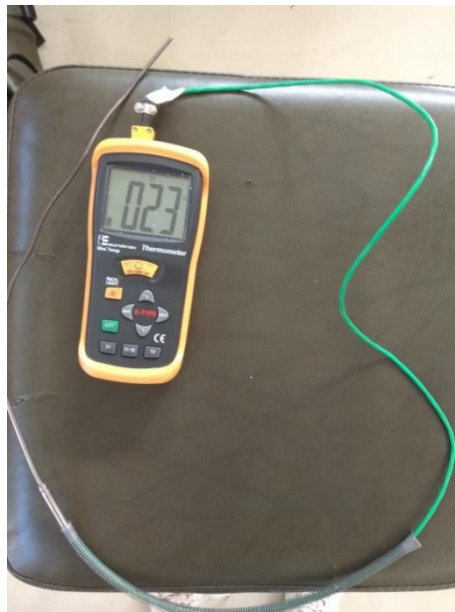
Ακολούθως, τέθηκε σε λειτουργία ο βιομηχανικός φούρνος αφού πρώτα είχε τοποθετηθεί εντός του, το μεταλλικό κουτί το οποίο περιείχε το άλας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε, ότι οι επαναφορές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες και άρα για το λόγο αυτό έγινε χρήση διαφορετικών αλάτων. Οι θερμοκρασίες στις οποίες έγιναν οι επαναφορές είναι: 180°C, 280°C, 350°C, 450°C, 500°C, 525°C, 550°C, 575°C και 630°C. Στη συνέχεια, και αφού το αλάτι είχε λιώσει, έγινε ο έλεγχος της θερμοκρασίας του τήγματος. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας έγινε με τη χρήση ενός θερμοστοιχείου διπλής εισόδου. Το αποδεκτό εύρος απόκλισης από την επιθυμητή θερμοκρασία ήταν  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Στη περίπτωση που η θερμοκρασία του τήγματος ήταν αποδεκτή, έγινε απευθείας η εισαγωγή των δοκιμίων. Διαφορετικά, έγινε εκ νέου ρύθμιση του φούρνου και μέτρηση της θερμοκρασίας του τήγματος, αφού προηγουμένως είχε ισορροπήσει η διάταξη. Τέλος, μετά την εξαγωγή των δοκιμίων από το φούρνο έγινε αργή απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καθώς στα δοκίμια υπήρχε εναπομείνουσα ποσότητα άλατος, μόλις η



θερμοκρασία τους έφτασε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, έγινε απόπλυσή τους. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το μεταλλικό κουτί με το αλάτι που χρησιμοποιήθηκε στην επαναφορά των 280°C καθώς και το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του τήγματος άλατος.



*Εικόνα 38: Αλάτι για την επαναφορά των 280°C.*



*Εικόνα 37: Θερμοστοιχείο διπλής εισόδου.*

Στη συνέχεια, παρατίθεται ενδεικτικά ένας πίνακας με τα δεδομένα από τη διαδικασία επαναφοράς των δοκιμών 89-90 και 107-108. Οι υπόλοιποι πίνακες με τα αντίστοιχα δεδομένα για τα υπόλοιπα δοκίμια, παρατίθενται στα Παραρτήματα της παρούσας εργασίας.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>550°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					89-90 & 107-108					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:24]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					529					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:24]										
<b>T [°C]</b>	207	281	353	410	460	501	532			
<b>t [min]</b>	0	3	6	9	12	15	18			
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 13:56]										
<b>T<sub>set</sub>=529°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	0	526	3.41	526	3.59	530	4.12	539	5.24
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	5.24 (0)	526	9.09 (3.45)	526	9.28 (4.04)	530	9.40 (4.16)	539	10.52 (5.28)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 14:09]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					547 (Αποδεκτή)					
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 14:11]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 15:54]										
<b>T<sub>set</sub>=529°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	

	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	0	526	4.29	526	4.46	530	4.59	539	6.18
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	6.18 (0)	526	10.45 (4.27)	526	11.02 (4.44)	530	11.15 (4.57)	539	12.36 (6.18)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 16:10]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>							548			
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>							16:11			
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>							17:10			

## 2.8 7<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Κοπή δοκιμίων.

Το επόμενο βήμα μετά την επαναφορά των δοκιμίων ήταν η κοπή τους, προκειμένου να εγκιβωτιστούν και να γυαλιστούν. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση του κοπτικού μηχανήματος Discotom-5 κατασκευής Struers, το οποίο βρίσκεται στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Για τη κοπή των δοκιμίων επιλέχθηκαν οι ακόλουθες ρυθμίσεις για τη λειτουργία του μηχανήματος κοπής.

- Ταχύτητα πρόωσης τράπεζας: 0,5 mm/s
- Ταχύτητα περιστροφής κοπτικού δίσκου: 2200 RPM

Εν συνεχεία, και αφού έγινε η ρύθμιση του μηχανήματος, όλα τα δοκίμια κόπηκαν σε δύο τμήματα:

- 1<sup>ο</sup> τμήμα: 15x15x15 mm
- 2<sup>ο</sup> τμήμα: 25x15x15 mm

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το κοπτικό μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε κατά το συγκεκριμένο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας.



*Εικόνα 40: Κοπτικό μηχάνημα.*



*Εικόνα 39: Εσωτερικό κοπτικού μηχανήματος*

### 2.9 8<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Εγκιβωτισμός δοκιμίων.

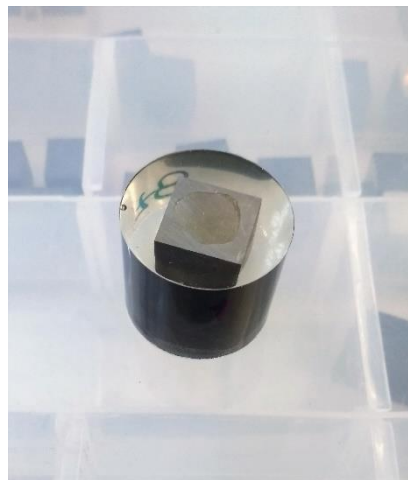
Κατά το συγκεκριμένο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, τα κομμένα δοκίμια τοποθετήθηκαν εντός πλαστικών κυλινδρικών καλουπιών διαμέτρου 30mm τα οποία στη συνέχεια γέμισαν με εποξική ρητίνη. Η εποξική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι η EpoFix της Struers. Η ενέργεια αυτή γίνεται προκειμένου να είναι εύκολος ο χειρισμός των δοκιμίων κατά τη λείανση-στίλβωση τους.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά τον εγκιβωτισμό χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια με διαστάσεις 25x15x15 mm. Επιπλέον, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε και στις δύο πλευρές του τελικού τεμαχίου να είναι εκτεθειμένο το υπό μελέτη δοκίμιο. Με αυτό τον τρόπο ήταν δυνατή η λήψη εικόνων καλύτερης ποιότητας μετά τη τοποθέτηση των

δοκιμίων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η αναλογία εποξικής ρητίνης-σκληρυντή που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 32: Αναλογία εποξικής ρητίνης και σκληρυντή.*

<b>Εποξική Ρητίνη (EpoFix)</b>	15ml
<b>Σκληρυντής</b>	2ml
<b>Χρόνος στερεοποίησης</b>	12h



*Εικόνα 41: Εγκιβωτισμένο δοκίμιο.*

## 2.10 9<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Λείανση-Στίλβωση δοκιμίων.

Σε αυτό το σημείο, τα δοκίμια τα οποία εγκιβωτίστηκαν προηγουμένως λειαινούνται προκειμένου να ακολουθήσει η μεταλλογραφική τους ανάλυση και να μετρηθεί η μικροσκληρότητα τους. Η λείανση έγινε στο υδρόψυκτο λειαντικό μηχάνημα τύπου Struers LaboPol-5. Το μηχάνημα αυτό διαθέτει ένα περιστρεφόμενο τροχό διαμέτρου 200mm καθώς και έναν περιστρεφόμενο υποδοχέα δοκιμίων. Ο συγκεκριμένος υποδοχέας μπορεί να δεχθεί μέχρι τρία δοκίμια διαμέτρου 30mm. Τα λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου που χρησιμοποιήθηκαν, κατασκευής Struers, είχαν τραχύτητα 80P, 120P, 220P, 320P, 500P, 800P, 1000P, 1200P, 2000P και 4000P. Οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν στον αριθμό των κόκκων του SiC ανά τετραγωνική ίντσα. Η εφαρμογή των δοκιμίων πάνω στο

περιστρεφόμενο δίσκο έγινε με τη τοποθέτησή τους στον αυτόματο περιστρεφόμενο υποδοχέα και όχι χειρωνακτικά γιατί κατά τη προσπάθεια εφαρμογής με το χέρι δημιουργούνται πολλαπλά επίπεδα στην επιφάνεια λείανσης λόγω της χαμηλής σκληρότητας της πολυεστερικής ρητίνης που επιλέχθηκε. Ο χρόνος λείανσης των δοκιμίων με το κάθε λειαντικό χαρτί κυμαίνονταν στα 5-7 λεπτά, με τη ταχύτητα περιστροφής του τροχού να είναι 280 rpm. Το κάθε δοκίμιο, μετά τη λείανση με το εκάστοτε λειαντικό χαρτί, ξεπλένονταν με νερό και αιθανόλη και στη συνέχεια για το στέγνωμά του χρησιμοποιούνταν θερμός αέρας.



*Εικόνα 42: Λειαντικό μηχάνημα.*

Για τη στίλβωση έγινε χρήση ακριβώς του ίδιου εξοπλισμού, αλλάζοντας όμως ορισμένες από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, αντί για λειαντικά χαρτιά έγινε χρήση βελούδινων μεταλλικών δίσκων πάνω στους οποίους τοποθετήθηκε αδαμαντόπαστα διαφορετικής κοκκομετρίας (1 $\mu$ m και 0,3 $\mu$ m) της εταιρίας Struers. Η ταχύτητα περιστροφής του δίσκου μειώθηκε στα 150 rpm, ενώ παράλληλα οι βελούδινοι δίσκοι βράχθηκαν ελαφρώς με νερό προτού προστεθεί η αδαμαντόπαστα. Το κάθε δοκίμιο, μετά τη στίλβωση με την εκάστοτε αδαμαντόπαστα, ξεπλένονταν με νερό και αιθανόλη και στη συνέχεια για το στέγνωμά του χρησιμοποιούνταν θερμός αέρας για να μην δημιουργηθούν λεκέδες.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σκληρομέτρηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε πριν από τη στίλβωση τους. Συγκεκριμένα, αφού τα δοκίμια λειάνθηκαν με το λειαντικό χαρτί 2000P, σκληρομετρήθηκαν και ακολούθως λειάνθηκαν με το λειαντικό χαρτί 4000P πριν στιλβωθούν με τη διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω.



Αυτό έγινε διότι μετά τη διαδικασία της στίλβωσης τα δοκίμια διαθέτουν μια επιφάνεια η οποία μοιάζει με καθρέφτη και άρα βρίσκεται σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Σαν αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στην οξείδωση. Για το λόγο αυτό, επειδή ο αριθμός των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά μεγάλος, υπήρχε αυξημένος κίνδυνος οξείδωσης της επιφάνειάς τους στη περίπτωση που είχε γίνει πρώτα η στίλβωση και ακολούθως η σκληρομέτρηση και η μεταλλογραφική ανάλυσή τους.

## 2.11 10<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίων.

Σε αυτή τη φάση της πειραματικής διαδικασίας γίνεται η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων προκειμένου στη συνέχεια να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της κρουγενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα H13. Αναλυτικότερα, μέσω της μεθόδου Vickers με εφαρμοζόμενο φορτίο 0,3kg για 15 sec, έγινε η μικροσκληρομέτρηση ορισμένων δοκιμίων που αντιστοιχούν σε κάθε θερμοκύκλο και σε κάθε θερμοκρασία επαναφοράς που μελετήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια που σκληρομετρήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 33: Αναγνωριστικός αριθμός δοκιμίων που σκληρομετρήθηκαν.*

Κατεργασία	Θερμοκρασία Επαναφοράς								
	180°C	280°C	350°C	450°C	500°C	525°C	550°C	575°C	630°C
1h/-196°C	78	79	82	83	85	87	89	91	93
4h/-196°C	95	97	100	102	103	105	108	110	111
12h/-196°C	42	43	46	48	50	52	53	55	57

Κατά τη σκληρομέτρηση καθενός από τα παραπάνω δοκίμια, έγινε λήψη τουλάχιστον 10 μετρήσεων προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες αποκλίσεις. Η τελική τιμή της σκληρότητας διαμορφώθηκε από τον μέσο όρο των μετρήσεων. Αυτή η διαδικασία θεωρήθηκε ως αποδεκτή διότι όπως δείχθηκε και στην εργασία που πραγματοποίησε η Τσαρουχά Α. [34], το σύνολο των μετρήσεων σε κάθε δοκίμιο ακολουθεί την κανονική κατανομή. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η σκληρομέτρηση έγινε στην εσωτερική

πλευρά των κομμένων δοκιμίων και όχι την εξωτερική. Τέλος, κατά τη διαδικασία λήψης των σκληρομετρήσεων, τιμές οι οποίες δεν ήταν «κοντινές» μεταξύ τους δεν ελήφθησαν υπόψιν και για το λόγο αυτό η διαδικασία της εκάστοτε σκληρομέτρησης επαναλήφθηκε. Αιτία αυτού του φαινομένου είναι η σκληρομέτρηση πάνω σε κάποια χαραγή της επιφάνειας ή πάνω σε κάποιο καρβίδιο.



Εικόνα 43: Μηχάνημα λήψης μικροσκληρομετρήσεων.

## 2.12 11<sup>ο</sup> Στάδιο Πειραμάτων: Λήψη εικόνων μικροδομής δοκιμίων.

Προκειμένου να ερευνηθεί η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή του υπό μελέτη υλικού, ήταν απαραίτητη η λήψη εικόνων μέσω της χρήσης οπτικού μικροσκοπίου αλλά και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Leica DMIL το οποίο ήταν εφοδιασμένο με τη ψηφιακή κάμερα μικροσκοπίου Leica DFC290 HD. Επιπρόσθετα, το οπτικό μικροσκόπιο ήταν συνδεδεμένο με έναν προσωπικό υπολογιστή ο οποίος διέθετε το λογισμικό Leica Application Suite. Έτσι, ήταν δυνατή η live time παρατήρηση των δοκιμίων μέσω του υπολογιστή, η λήψη εικόνων καθώς και η άμεση επεξεργασία αυτών. Η συγκριμένη διάταξη επιτρέπει τη λήψη εικόνων μικροδομής δοκιμίων σε μεγεθύνσεις x100, x200, x500 και x1000.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν ορισμένα δοκίμια για τη λήψη εικόνων με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Το μικροσκόπιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν το Jeol JSM-6390. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παράγει εικόνες ενός δοκιμίου σκανάροντας την επιφάνεια του με μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αντιδρούν με τα άτομα του δοκιμίου, παράγοντας έτσι ποικίλα σήματα τα οποία περιέχουν πληροφορίες για τη τοπογραφία της επιφάνειας του δοκιμίου αλλά και για τη σύνθεση του.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη των παραπάνω διαδικασιών ήταν η χημική προσβολή των δοκιμίων. Σκοπός της συγκεκριμένης ενέργειας είναι να αποκαλυφθεί η μικροδομή των δοκιμίων, δηλαδή τα όρια των κόκκων και οι διάφορες φάσεις, σε τέτοιο βαθμό ώστε αυτά να είναι ορατά στο SEM. Για τη χημική προσβολή έγινε χρήση διαλύματος Nital 4%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα

### 3.1 Μικροσκληρότητα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες με τις τιμές της μικροσκληρότητας των δοκιμίων σε κάθε θερμική κατεργασία και για κάθε θερμοκρασία επαναφοράς. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η λήψη των μετρήσεων, έχει περιγραφεί προηγουμένως.

*Πίνακας 34: Μικροσκληρότητα δοκιμίων για κατεργασία στους -196°C για 1h.*

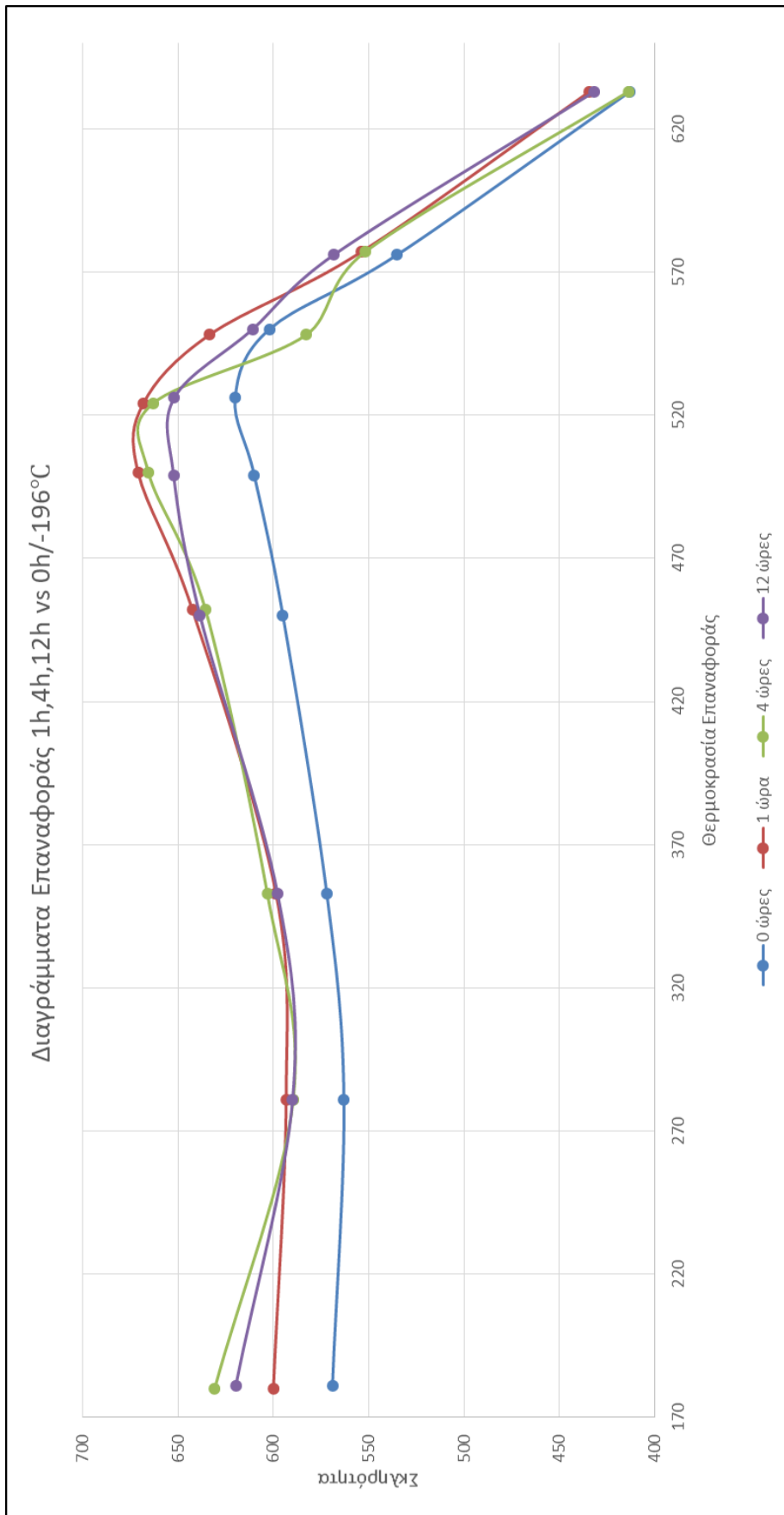
Κρυογενική Κατεργασία (1h / -196°C)									
Θ.Ε [°C]	180	281	353	452	500	524	548	577	633
HV0.3	599.97	593.26	598.63	642.43	670.90	668.14	633.48	553.79	434.19

*Πίνακας 35: Μικροσκληρότητα δοκιμίων για κατεργασία στους -196°C για 4h.*

Κρυογενική Κατεργασία (4h / -196°C)									
Θ.Ε [°C]	180	281	353	452	500	524	548	577	633
HV0.3	630.76	589.57	603.21	635.55	665.48	663.18	582.75	551.82	413.8

*Πίνακας 36: Μικροσκληρότητα δοκιμίων για κατεργασία στους -196°C για 12h.*

Κρυογενική Κατεργασία (12h / -196°C)									
Θ.Ε [°C]	181	281	353	450	499	526	550	576	633
HV0.3	619.70	589.86	597.83	638.44	652.29	651.93	610.80	568.21	431.61



Διάγραμμα 14: Διαγράμματα Επαναφοράς για κάθε θερμική κατεργασία.

Όλα τα διαγράμματα επαναφορών παρουσιάζουν δευτερογενή σκλήρυνση που είναι χαρακτηριστική για τη συγκεκριμένη ποιότητα εργαλειοχαλύβων. Επιπλέον, με μια περεταίρω αξιολόγηση των διαγραμμάτων για όλες τις θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν, οδηγούμαστε σε ορισμένα πολύ σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής) στη μικροσκληρότητα του εργαλειοχάλυβα H13. Τα συμπεράσματα αυτά θα ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία έχει να κάνει με την επίδραση της κατεργασίας του υλικού στη θερμοκρασία των  $-195^{\circ}\text{C}$ . Η δεύτερη, έχει να κάνει με την επίδραση του χρόνου παραμονής του υλικού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

- Επίδραση της θερμοκρασίας

Η κρυογενική κατεργασία του υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μικροσκληρότητας του. Συγκεκριμένα, σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών επαναφοράς, παρατηρείται μία ομοιόμορφη διαφορά σκληρότητας μεταξύ των περιπτώσεων της κρυογενούς κατεργασίας και της θερμικής κατεργασίας χωρίς κρυογενή σκλήρυνση. Αναλυτικότερα, στις πρώτες θερμοκρασίες επαναφοράς, η σκληρότητα των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμών συγκριτικά με αυτή των συμβατικά κατεργασμένων δοκιμών παρουσιάζει μια αύξηση της τάξης των 30-40HV. Στη περιοχή της δευτερογενούς σκλήρυνσης, αυτή η αύξηση είναι 40-50HV. Τέλος, στις υψηλές θερμοκρασίες επαναφοράς η αύξηση που παρατηρείται είναι 10-20HV. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό μετατροπής του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη [31,39]. Ο παραμένων ωστενίτης είναι πιο μαλακή φάση συγκριτικά με τον μαρτενσίτη. [13,14,22,18,33]. Επιπλέον, ο δεύτερος λόγος για την αύξηση της μικροσκληρότητας του υλικού είναι η κατακρήμνιση περισσότερων και πιο λεπτών, σφαιρικών και ομοιόμορφα διασκορπισμένων καρβιδίων στη δομή του υλικού. [31] Τα καρβίδια αυτά αποτελούν ανυπέρβλητα εμπόδια στη κίνηση των διαταραχών στη δομή του υλικού οδηγώντας έτσι στη αύξηση της σκληρότητάς του. Ο τρόπος με τον οποίο συμβάλει η κρυογενική κατεργασία στην αύξηση του αριθμού των καρβιδίων αλλά και στην εκλέπτυνσή τους έχει περιγραφεί παραπάνω. Ένα άλλο συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε από την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων είναι ότι η θερμοκρασία στην οποία παρουσιάζεται η δευτερογενή σκλήρυνση είναι μικρότερη. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του κρυσταλλικού πλέγματος και της θερμοδυναμικής του αστάθειας. Όλα αυτά, συντελούν στην αύξηση της



εσωτερικής ενέργειας του μαρτενσίτη και άρα στην ενεργοποίηση των μετασχηματισμών που παρατηρούνται στην διαδικασία της επαναφοράς ήδη στις υπομηδενικές θερμοκρασίες. Έτσι, απαιτείται η πρόσδοση μικρότερης ενέργειας (θερμότητας) προκειμένου να ολοκληρωθεί η δευτερογενής κατακρήμνιση καρβιδίων η οποία πραγματοποιείται με υψηλές ενέργειες ενεργοποίησης. [17,25,29,31,30]. Ακόμα, παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι στις υψηλές θερμοκρασίες επαναφοράς, η σκληρότητα του υλικού παρουσιάζει μια ραγδαία πτώση. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτές τις θερμοκρασίες μειώνονται οι εσωτερικές τάσεις στη μαρτενσιτική μήτρα αφού αυτός επαναφέρεται περεταίρω και τα ήδη υπάρχοντα καρβίδια συνενώνονται. [17, 34]

- Επίδραση του χρόνου παραμονής στην υπομηδενική θερμοκρασία

Ο χρόνος παραμονής στην υπομηδενική θερμοκρασία των  $-196^{\circ}\text{C}$  επηρεάζει και αυτός με τη σειρά του, πέρα από την ίδια τη θερμοκρασία, τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή του H13. Κατά την επαναφορά στους  $180^{\circ}\text{C}$ , παρατηρείται διαφορά σκληρότητας μεταξύ του χρόνου παραμονής στους  $-196^{\circ}\text{C}$ , για 1, 4 και 12 h αντίστοιχα. Χαρακτηριστικά, η μέση τιμή σκληρότητας, παρουσιάζεται να είναι, κατά φθίνουσα τιμή, μετά από 4h ( $630,76\text{HV}_{0,3}$ ), μετά από 12h ( $619,7\text{HV}_{0,3}$ ) και μετά από 1h ( $599\text{HV}_{0,3}$ ). Μέχρι τη θερμοκρασία των  $180^{\circ}\text{C}$ , έχουν προηγηθεί τα στάδια της προ-κατακρήμνισης (κάτω από  $80^{\circ}\text{C}$ ) όπου πραγματοποιείται ανακατανομή των ατόμων του C μέσω διαφορισμού (C atoms redistribution by segregation) καθώς και δημιουργία συμπλεγμάτων του C που δρουν στην συνέχεια ως σημεία πυρηνοποίησης για την κατακρήμνιση μετασταθών καρβιδίων (μέχρι τους  $180^{\circ}\text{C}$ ) [38,36]. Η βαθιά κρυογενική κατεργασία ενισχύει την προ-κατακρήμνιση, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη κατακρήμνιση καρβιδίων κατά την επαναφορά [38] το οποίο αποτυπώνεται μέσω της αύξησης της μικροσκληρότητας. Παρόλα, αυτά, η σκληρότητα μετά από 4h είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση της παραμονής των 12h. Παρόμοια διαφοροποίηση παρατηρείται στο ρυθμό φθοράς (wear rate) του ίδιου εργαλειοχάλυβα αλλά και χαλύβων όπου τα φαινόμενα κατακρήμνισης είναι πιο έντονα [20,37]. Η παρατηρούμενη διαφοροποίηση στη σκληρότητα πιθανά να οφείλεται σε φαινόμενα “γήρανσης” της μικροδομής που εξαρτώνται από το χρόνο παραμονής στην κρυογενική θερμοκρασία ή ότι η μικροσκληρότητα δεν μπορεί να αποτυπώσει επαρκώς τις πραγματοποιηθείσες αλλαγές. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Στο διάγραμμα παρατηρείται σύγκλιση και των τριών περιπτώσεων παραμονής

στους  $-196^{\circ}\text{C}$  σε σκληρότητα 589-593HV<sub>0.3</sub>, στην περιοχή των  $240^{\circ}\text{C}$ . Στη συγκεκριμένη θερμοκρασιακή περιοχή πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός τον υπολειπόμενου ωστενίτη, ο ελάχιστος που έχει απομείνει από την κρυογενική κατεργασία [31,35], αλλά και ο μετασχηματισμός των ευσταθών καρβιδίων όπου οδηγεί τη μικροδομή σε νέα θερμοδυναμική ισορροπία σε σχέση με τη θερμοκρασία επαναφοράς, μη πλήρως αιτιολογημένη από την επιστημονική κοινότητα μέχρι σήμερα [35]. Εν συνεχεία, η σκληρότητα και στις τρεις περιπτώσεις παραμονής αυξάνεται βαθμιαία μέχρι τους  $470^{\circ}\text{C}$ , το οποίο συμφωνεί με το γεγονός ότι μέχρι τους  $500^{\circ}\text{C}$  πραγματοποιείται η εξαφάνιση των μετασταθών καρβιδίων και ο σχηματισμός ευσταθούς σεμεντίτη. Η συμπεριφορά του υλικού σε αυτή την περιοχή είναι ανεξάρτητη του χρόνου παραμονής στην κρυογενική θερμοκρασία.

Τα διαγράμματα αποκλίνουν εκ νέου στην περιοχή της κατακρήμνισης των δευτερογενών καρβιδίων. Υπάρχουν διαφοροποιήσεις, σε σχέση με το χρόνο παραμονής στους  $-196^{\circ}\text{C}$ , ως προς τη θερμοκρασία κατακρήμνισης αλλά και στη μετρούμενη μικροσκληρότητα. Η μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας παρουσιάζεται για παραμονή 1h (673HV<sub>0.3</sub>) και ακολούθως για 4h (668HV<sub>0.3</sub>) και 12h (654HV<sub>0.3</sub>) αντίστοιχα. Η διαφορά στην αποκτηθείσα μικροσκληρότητα μεταξύ 1h και 4h είναι πρακτικά αμελητέα, αλλά καταγράφει μία τάση. Το γεγονός ότι στη περίπτωση της 1h παρατηρείται μεγαλύτερη σκληρότητα, πιθανότατα να οφείλεται στο γεγονός ότι η μαρτενσιτική μήτρα έχει αποβάλει μικρότερη ποσότητα άνθρακα κατά τα στάδια της επαναφοράς του υλικού και άρα διατηρεί μέρος της αρχικής της σκληρότητας. Αυτό φαίνεται στα πρώτα στάδια της επαναφοράς του υλικού όπου για τις περιπτώσεις των 4h και 12h έχουμε μεγαλύτερες σκληρότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε περισσότερα καρβίδια τα οποία κατακρημνίζονται στη μήτρα, άρα περισσότερο άνθρακα που βγαίνει από το κρυσταλλικό πλέγμα, άρα εξασθένιση της μαρτενσιτικής μήτρας προοδευτικά μέχρι το σημείο της δευτερογενούς σκλήρυνσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η τελική σκληρότητα του υλικού αποτελεί έναν συνδυασμό μεταξύ της σκληρότητας της μαρτενσιτικής μήτρας, της σκληρότητας των καρβιδίων και της ποσότητας αυτών. Όσον αφορά τη θερμοκρασία όπου πραγματοποιείται η δευτερογενής σκλήρυνση, αυτή αυξάνεται με την αύξηση της παραμονής στους  $-196^{\circ}\text{C}$ . Έτσι για παραμονή 1h, 4h και 12h, η θερμοκρασία είναι  $510^{\circ}\text{C}$ ,  $515^{\circ}\text{C}$  και  $520^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Η θερμοκρασία δευτερογενούς σκλήρυνσης στην περίπτωση χωρίς κρυογενική κατεργασία

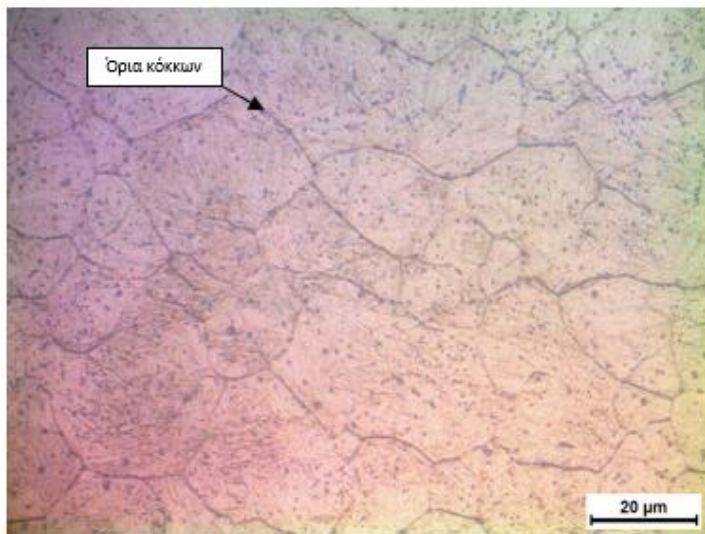
είναι 525°C. Το φαινόμενο αυτό πιθανότατα να ερμηνεύεται μέσω της εξήγησης που δόθηκε προηγουμένως. Πιο αναλυτικά, επειδή στη περίπτωση της 1h αποβάλλεται μικρότερη ποσότητα άνθρακα συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις, η μαρτενσιτική μήτρα διατηρεί μέρος από την αρχική της σκληρότητα, δηλαδή ένα ποσοστό εσωτερικών τάσεων μεγαλύτερο από τη περίπτωση των 4h και 12h. Το μεγαλύτερο ποσοστό εσωτερικών τάσεων όμως, όπως σχολιάστηκε και προηγουμένως σημαίνει μικρότερη ενέργεια ενεργοποίησης για τη κατακρήμνιση των καρβιδίων.

Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε αρμονία και παραπέμπουν στη εξέταση του φαινομένου μέσω θερμοδυναμικής των μετασχηματισμών. Όλοι οι μετασχηματισμοί των φάσεων που συντελούνται από το στάδιο της προ-κατακρήμνισης μέχρι την κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων συσχετίζονται με μεγάλες διαφοροποιήσεις της ενθαλπίας που μπορούν να παρατηρηθούν μέσω θερμοδομετρίας και ογκομετρίας [35]. Μετά από κρυογενική κατεργασία, η ενέργεια ενεργοποίησης της κατακρήμνισης των μετασταθών καρβιδίων είναι μικρότερη που σημαίνει ότι ενισχύεται μέσω αυτής. Αντίστοιχα μειώνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής, γεγονός που επαληθεύεται μέσω των μετρήσεων της μικροσκληρότητας στους 180°C, μερικώς [38]. Με βάση την ίδια πηγή, η θερμοκρασία ενεργοποίησης για την κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων μειώνεται μετά την κρυογενική κατεργασία, γεγονός που τεκμηριώνει την χαμηλότερη θερμοκρασία δευτερογενούς σκλήρυνσης.

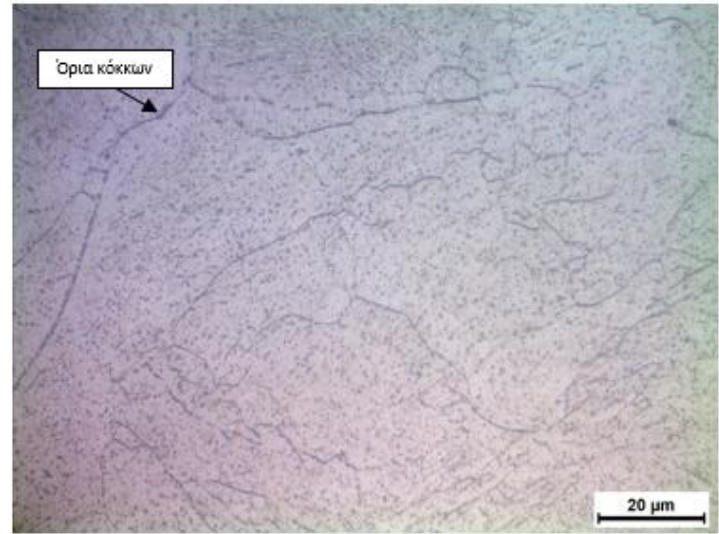
Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι ως επι το πλείστον να παρατηρήσει και να τεκμηριώσει τις διαφοροποιήσεις που υφίσταται το διάγραμμα επαναφοράς του χάλυβα H13 αφού κατεργασθεί κρυογενικά. Δεν μπορούμε να αποφανθούμε ποιος χρόνος παραμονής είναι ο βέλτιστος. Γι' αυτό, απαιτείται ο καθορισμός κριτηρίων και ένα σύνολο μηχανικών δοκιμών όπως π.χ δυσθραυστότητας.

### 3.2 Μικροδομή (Οπτικό Μικροσκόπιο).

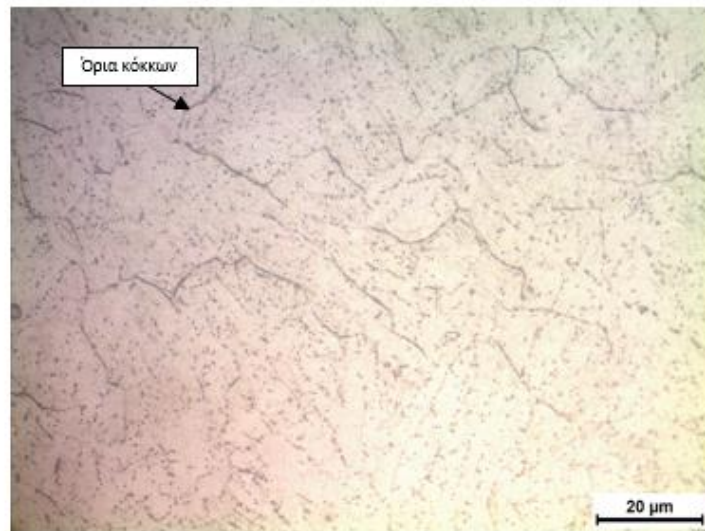
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή του εξεταζόμενου εργαλειοχάλυβα. Συγκεκριμένα, οι εικόνες που παρατίθενται έχουν ληφθεί σε μεγέθυνση  $\times 1000$  και αναφέρονται στη περίπτωση της επαναφοράς του υλικού στους  $180^{\circ}\text{C}$ ,  $450^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $525^{\circ}\text{C}$ ,  $550^{\circ}\text{C}$  και  $630^{\circ}\text{C}$  μετά το πέρας της κρυογενικής του κατεργασίας στους  $-195^{\circ}\text{C}$ . Οι τρεις εικόνες αντιστοιχούν στους τρεις εξεταζόμενους χρόνους παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 44: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους  $180^{\circ}\text{C}$  και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

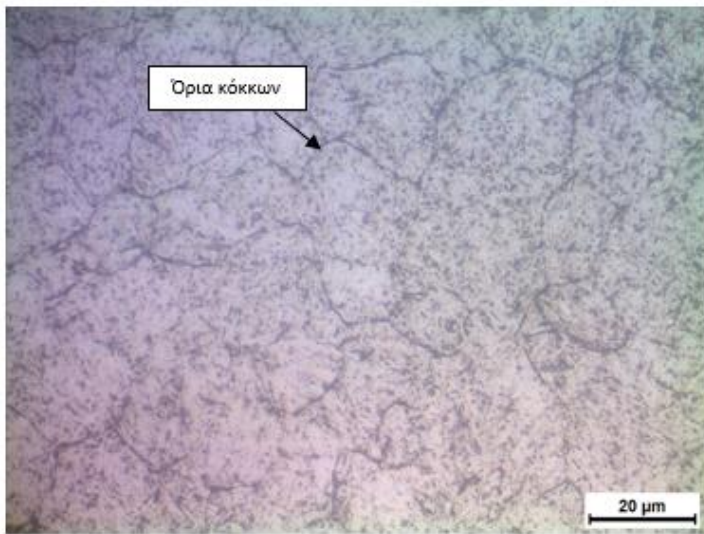
Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε να γίνει μελέτη στο οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο στη μεγέθυνση  $\times 1000$  και στις παραπάνω περιπτώσεις επαναφοράς του υλικού είναι αντίστοιχα:

- Επειδή στη συγκεκριμένη μεγέθυνση μπορεί να αποδοθεί καλύτερα η μικροδομή και να παρατηρηθούν οι οποιοσδήποτε διαφοροποιήσεις.
- Επειδή με αυτό τον τρόπο θα μπορούν να παρατηρηθούν αλλαγές στη μικροδομή του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς αλλά και του χρόνου παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία.

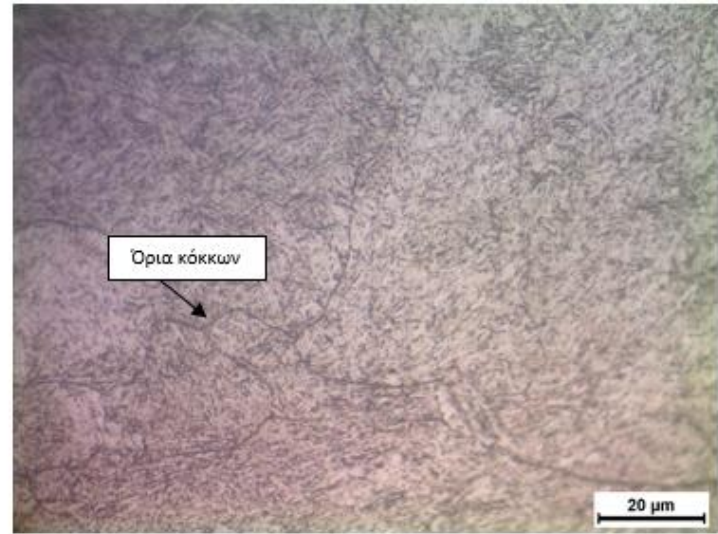
Σε όλες τις περιπτώσεις η μικροδομή αποτελείται από μήτρα επαναφερμένου μαρτενσίτη, με διασκορπισμένα καρβίδια διαφόρων διαμετρημάτων και μορφών που έχουν σχηματιστεί στα διάφορα στάδια της κρυογενούς κατεργασίας και επαναφοράς. Το μεγαλύτερο ποσοστό των καρβιδίων κατακρημνίζεται χρονικά μέχρι και την πρώτη επαναφορά [31], οπότε οι μικροδομές που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές. Τα είδη των καρβιδίων που περιέχονται είναι πρωτογενή, τα οποία είναι σχετικά μεγαλύτερα και προέρχονται από τη φάση κατασκευής του χάλυβα καθώς και δευτερογενή καρβίδια τα οποία έχουν σχηματιστεί κατά την απόψυξη και κατά τις φάσεις των κατακρημνίσεων μέχρι τους  $525^{\circ}\text{C}$ .

Σε ότι αφορά τώρα τη περίπτωση επαναφοράς του υλικού στους  $180^{\circ}\text{C}$ , μπορεί κανείς να παρατηρήσει με ευκολία τα όρια των κόκκων στη δομή του υλικού και για τους τρεις χρόνους παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία. Το μέγεθος των ευμεγέθων κόκκων μπορεί να υποδεικνύει μειωμένο ποσοστό κατακρημνισμένων καρβιδίων μέσα στα όρια, συγκριτικά με τις υπόλοιπες θερμοκρασίες επαναφοράς.

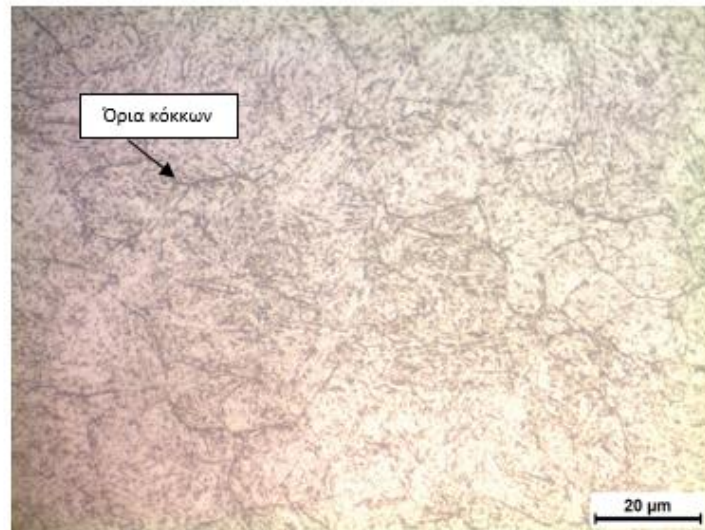




(α)



(β)

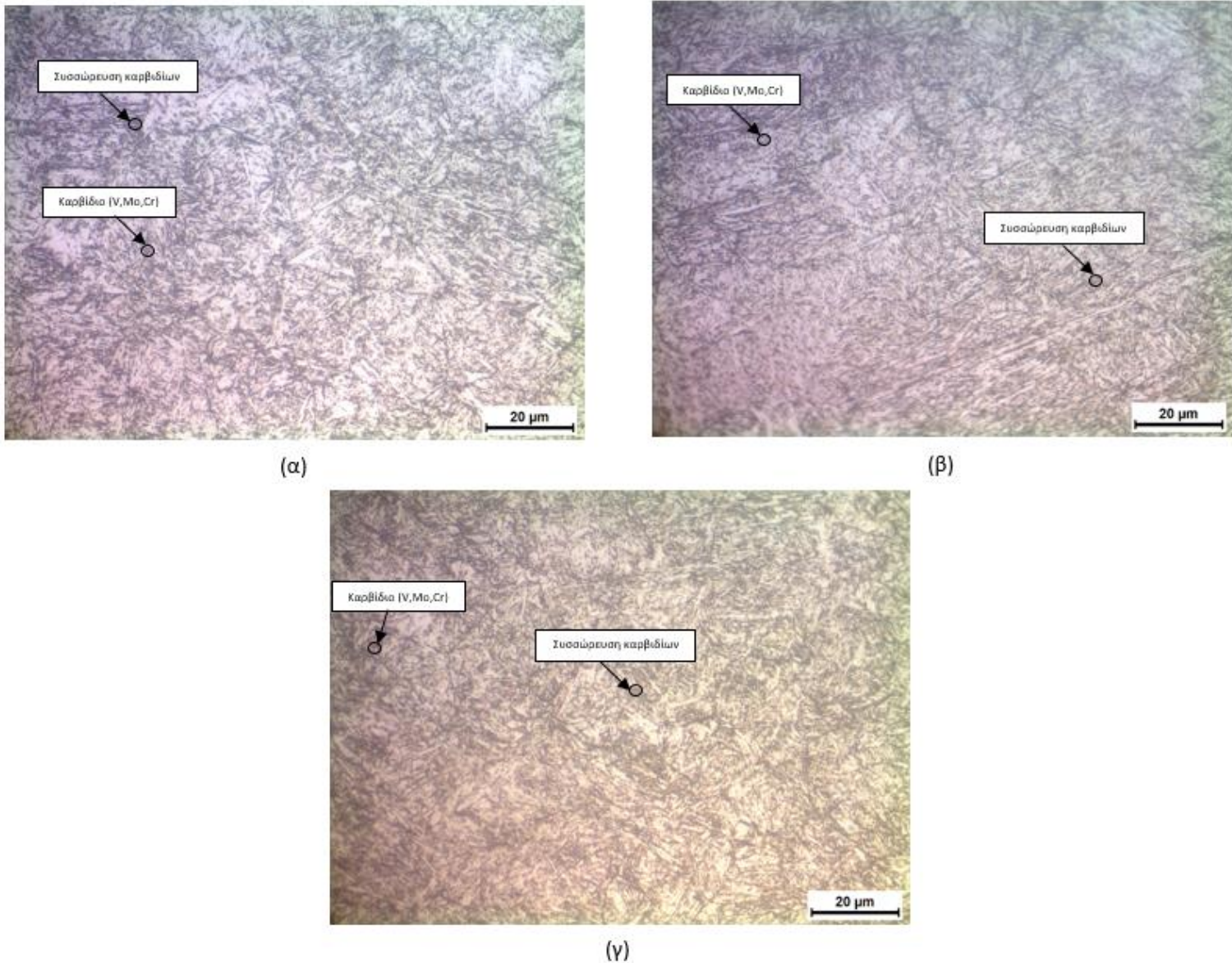


(γ)

Εικόνα 45: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 450°C και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

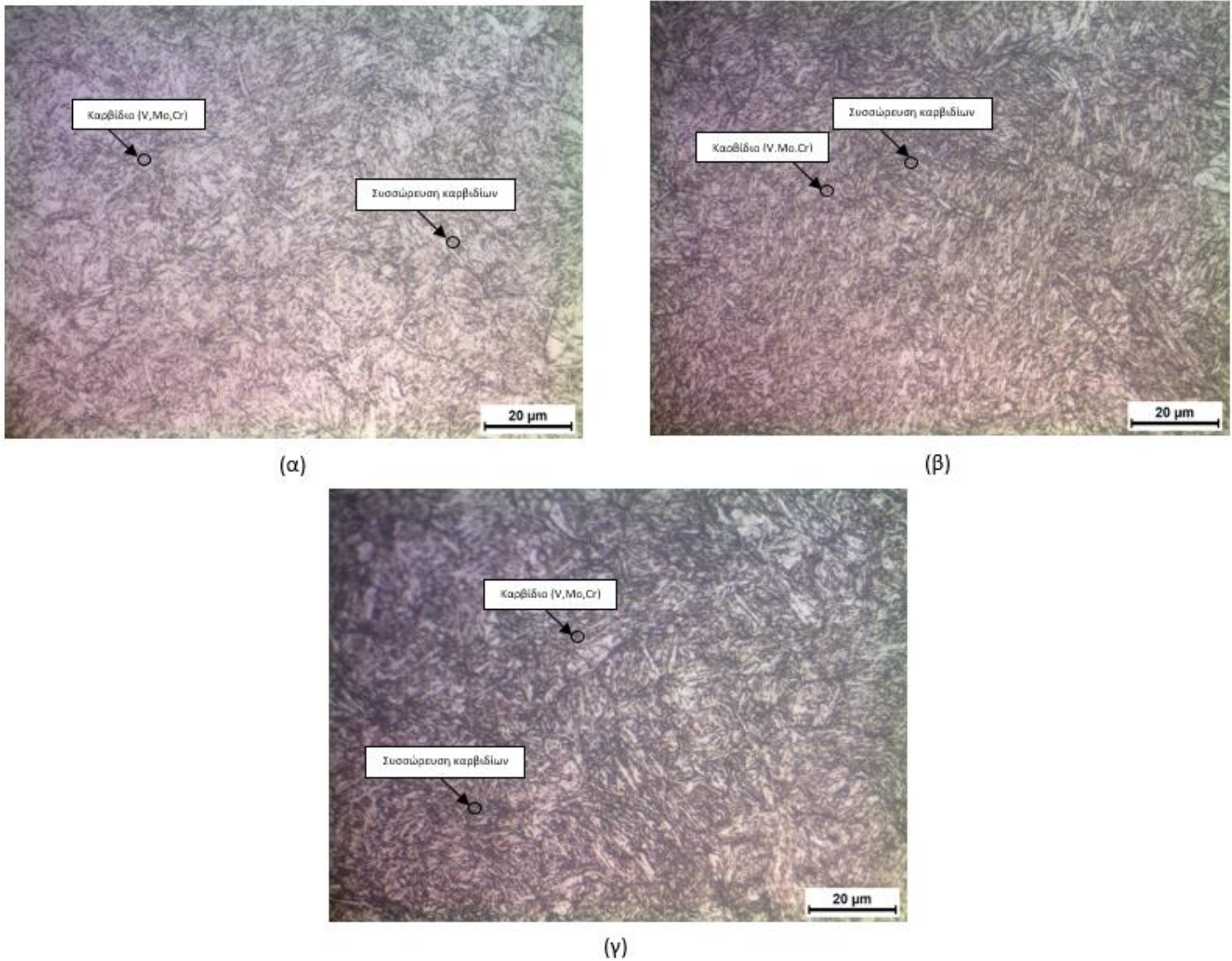
Στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, η δομή του υλικού και για τους τρεις χρόνους παραμονής φαίνεται να είναι παρόμοια με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης επαναφοράς του υλικού. Όπως και προηγουμένως, τα όρια των κόκκων είναι ευδιάκριτα.





Εικόνα 46: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 500°C και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούνται καρβίδια τα οποία έχουν κατακρημνιστεί στη δομή του υλικού καθώς και συσσωρεύσεις καρβιδίων. Με την αύξηση του χρόνου παραμονής, ο αριθμός αυτών φαίνεται να αυξάνει.

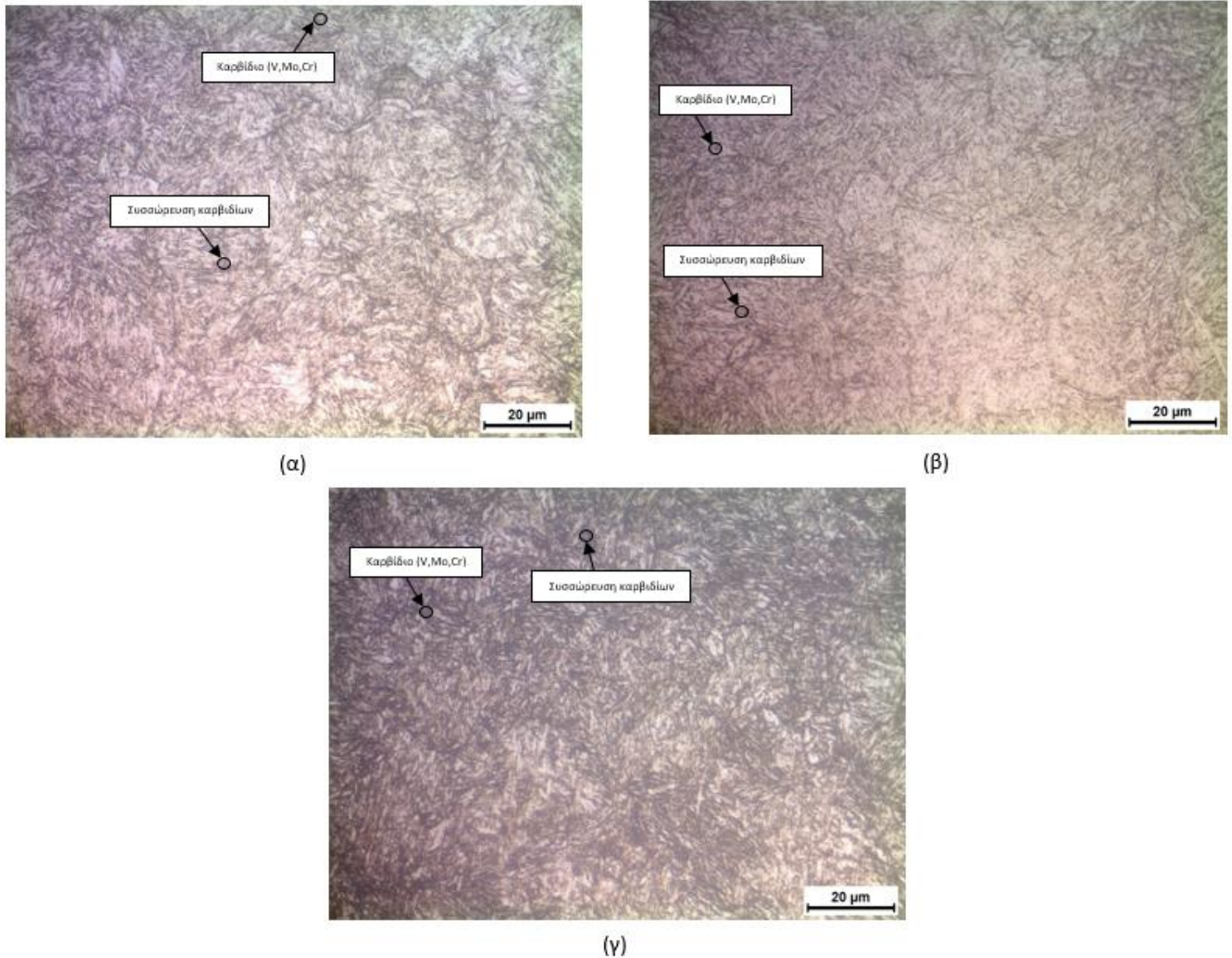


Εικόνα 47: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 525°C και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

Η μικροδομή, σε αυτή τη θερμοκρασία αποτελείται κυρίως από  $M_6C$ ,  $M_7C_3$  και  $M_2C$  καρβίδια. Από τις παραπάνω φωτογραφίες είναι εμφανής η διαφορά στο ποσοστό των διασκορπισμένων καρβιδίων η οποία είναι περισσότερο εκτενής όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στην κρυογενική θερμοκρασία. Επιπλέον, σύμφωνα και με την αντίστοιχη βιβλιογραφία [31], μόνο ένα ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη μετατράπηκε σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια της κρυογενικής κατεργασίας. Σε αυτό συνέβαλε και το γεγονός ότι το μέσο βαφή ήταν πεπιεσμένος αέρας. Παρόλα αυτά, το ποσοστό του

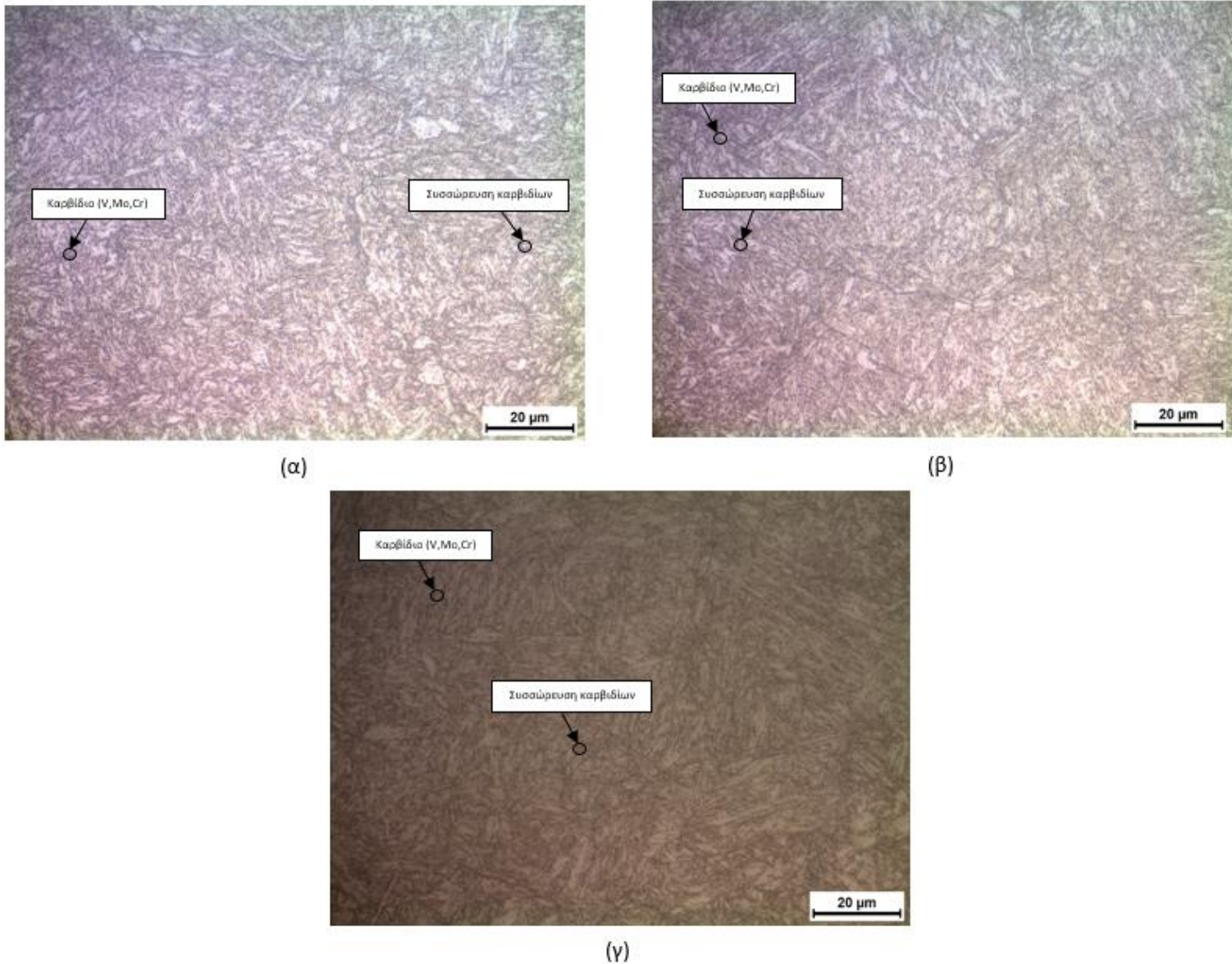


υπολειπόμενου ωστενίτη πρέπει να είναι μικρότερο του 5%, αφού πρακτικά δεν μπορεί να αξιολογηθεί μέσω των εικόνων του οπτικού μεταλλογραφικού μικροσκοπίου.



Εικόνα 48: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 550°C και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

Σε αυτή τη θερμοκρασία επαναφοράς, φαίνονται συσσωρεύσεις καρβιδίων οι οποίες είναι περισσότερο εμφανής συγκριτικά με τις προηγούμενες θερμοκρασίες. Ο αριθμός αυτών αυξάνει καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στη κρυογενική. Επιπλέον, καθώς αυξάνει η θερμοκρασία επαναφοράς το μέγεθος αυτών τείνει να μεγαλώσει. Τέλος παρατηρούνται λεπτά σφαιρικά καρβίδια διασκορπισμένα στη δομή του υλικού.



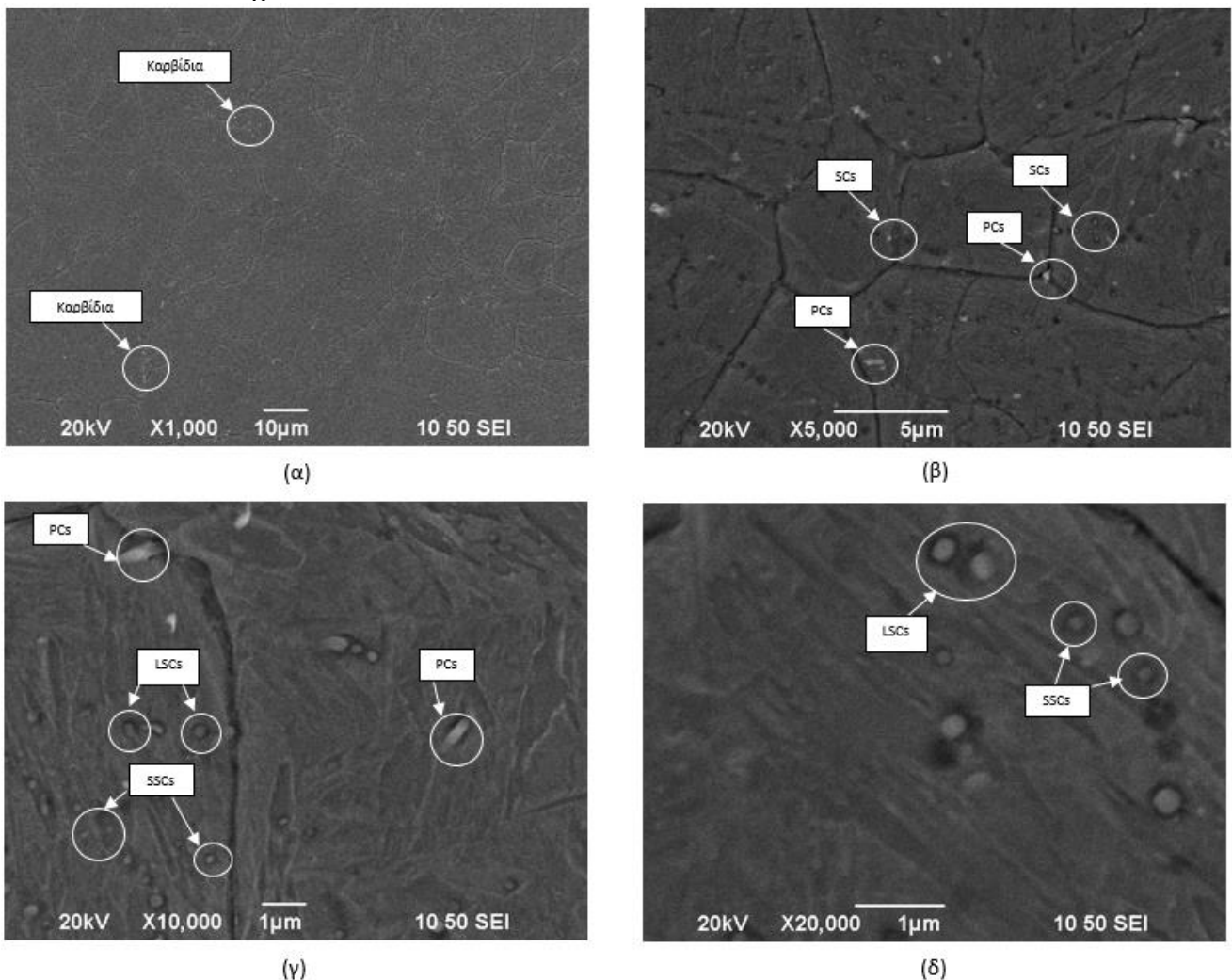
Εικόνα 49: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους  $630^{\circ}\text{C}$  και για διάφορες ώρες παραμονής στη κρυογενική θερμοκρασία: α) 1 ώρα, β) 4 ώρες και γ) 12 ώρες.

Και στις τρεις παραπάνω δομές φαίνονται καρβίδια διαφόρων μεγεθών τα οποία έχουν κατακρημνιστεί στη δομή του υλικού καθώς και συσσωρεύσεις αυτών. Τέλος, μπορεί να φανεί η δομή των βελόνων μαρτενσίτη.



### 3.3 Κατακρήμιση Καρβιδίων.

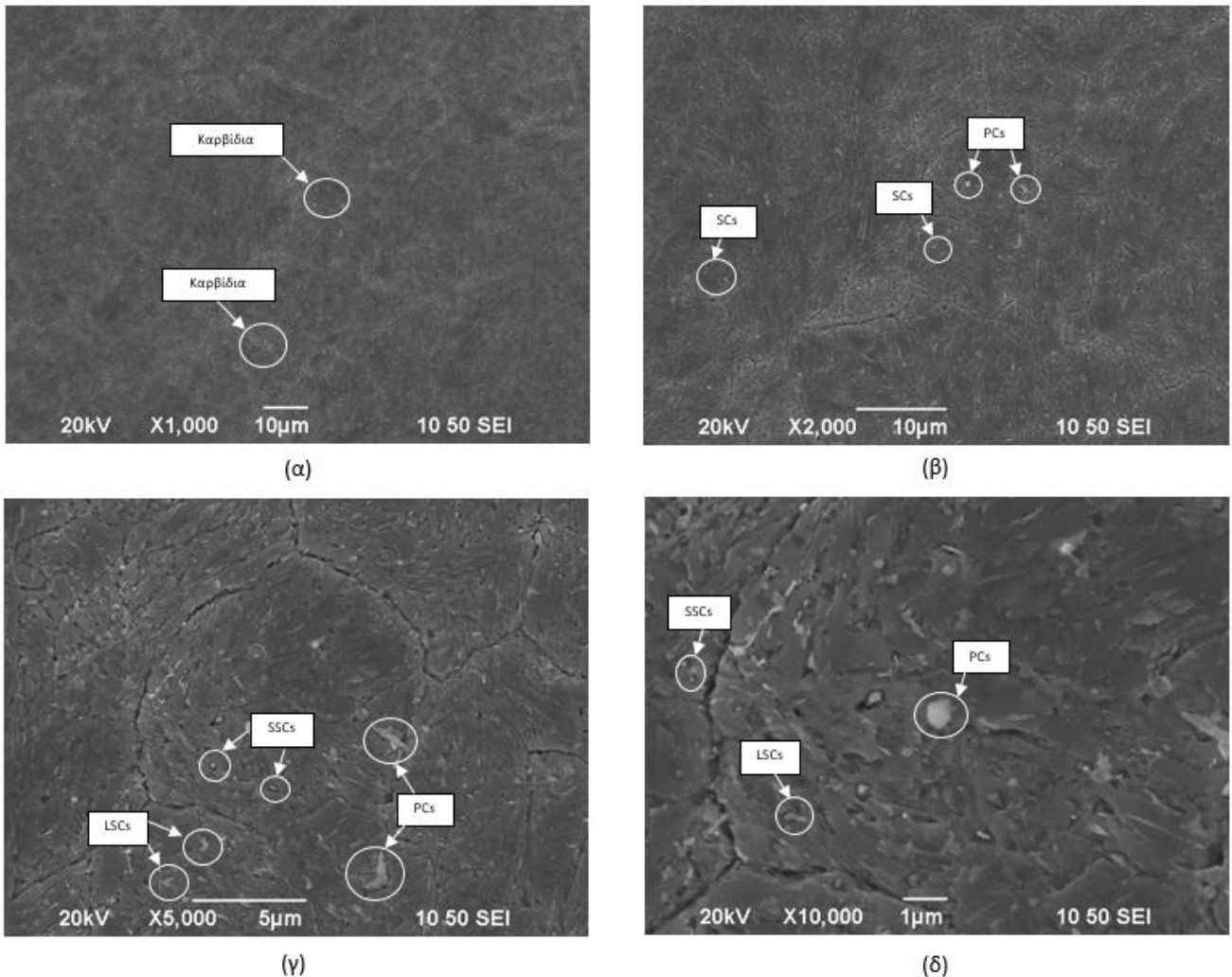
Για να γίνουν καλύτερα αντιληπτές οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στη δομή του υλικού αναφορικά με το είδος, το μέγεθος και τη πυκνότητα των καρβιδίων, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης προκειμένου να παρατηρηθεί η μικροδομή του υλικού. Στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνεται η μικροδομή του εργαλειοχάλυβα H13 όπως αυτή προέκυψε μετά τη κρυογενική κατεργασία του για 12 ώρες στη θερμοκρασία των  $-195^{\circ}\text{C}$  ακολουθούμενη από την επαναφορά του στους  $180^{\circ}\text{C}$ ,  $450^{\circ}\text{C}$ ,  $550^{\circ}\text{C}$ ,  $525^{\circ}\text{C}$ ,  $550^{\circ}\text{C}$  και  $630^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 50: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους  $180^{\circ}\text{C}$  σε μεγέθυνση: α)  $\times 1000$ , β)  $\times 5000$ , γ)  $\times 10000$  και δ)  $\times 20000$ .

Κατά την επαναφορά στους  $180^{\circ}\text{C}$ , απεικονίζονται καρβίδια διαφόρων διαστάσεων. Απεικονίζεται πλήθος καρβιδίων διαμέτρου μέχρι  $0,3\mu\text{m}$  τα οποία έχουν κατακρημνιστεί

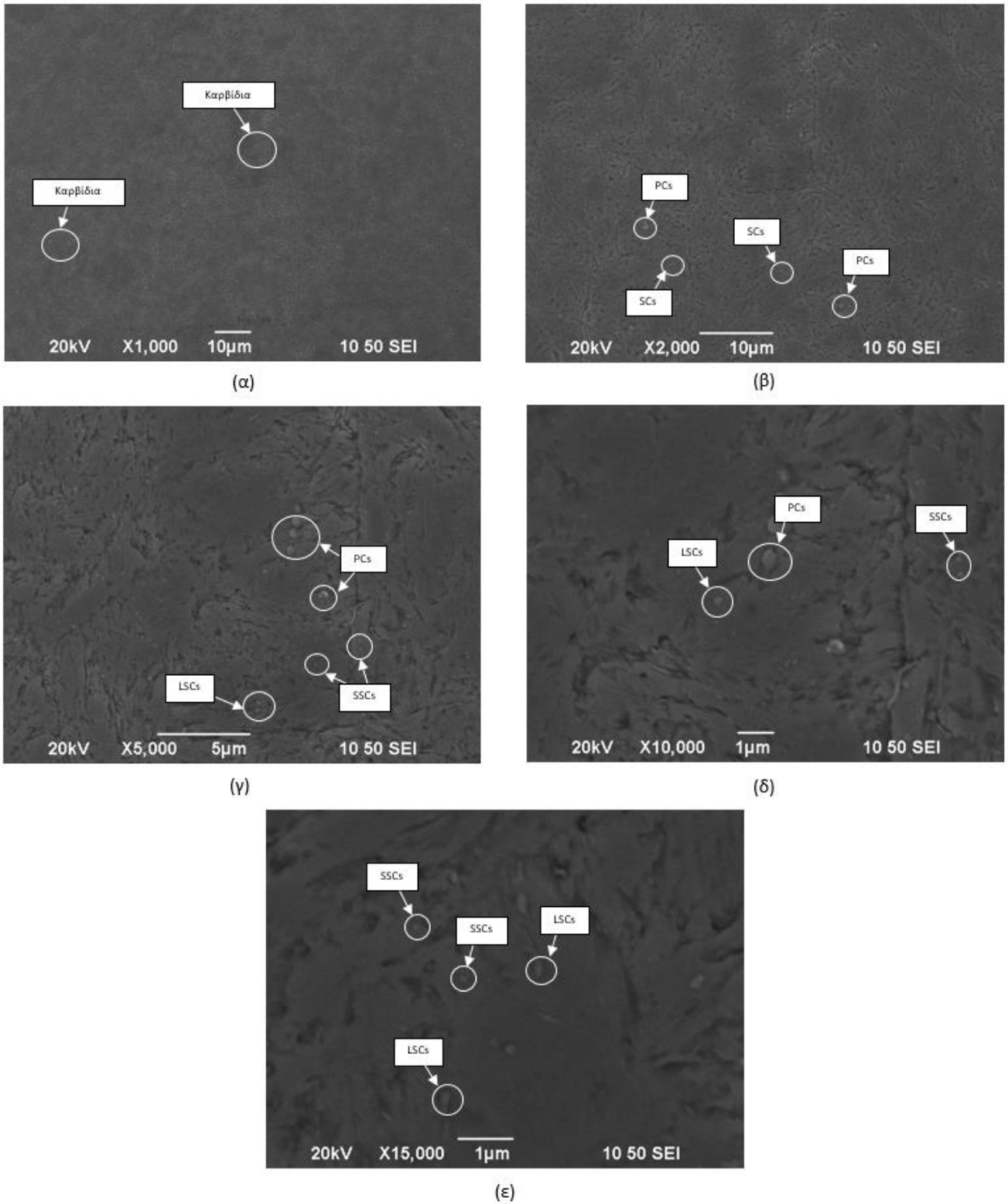
κατά την επαναφορά σε αυτή τη θερμοκρασία. Απεικονίζονται κυρίως τα πρωτογενή, τα καρβίδια που έχουν προκύψει κατά την απόψυξη του δοκιμίου και τα μετασταθή. Τα πρωτογενή καρβίδια φαίνεται να έχουν μια ακανόνιστη δομή σε αντίθεση με τα δευτερογενή τα οποία διαθέτουν μια σφαιρική δομή. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από την εικόνα, η κατακρήμνιση των πρωτογενών γίνεται κατά κύριο λόγο στα όρια των κόκκων.



Εικόνα 51: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 450°C σε μεγέθυνση: α) x1000, β) x2000, γ) x5000 και δ) x10000.

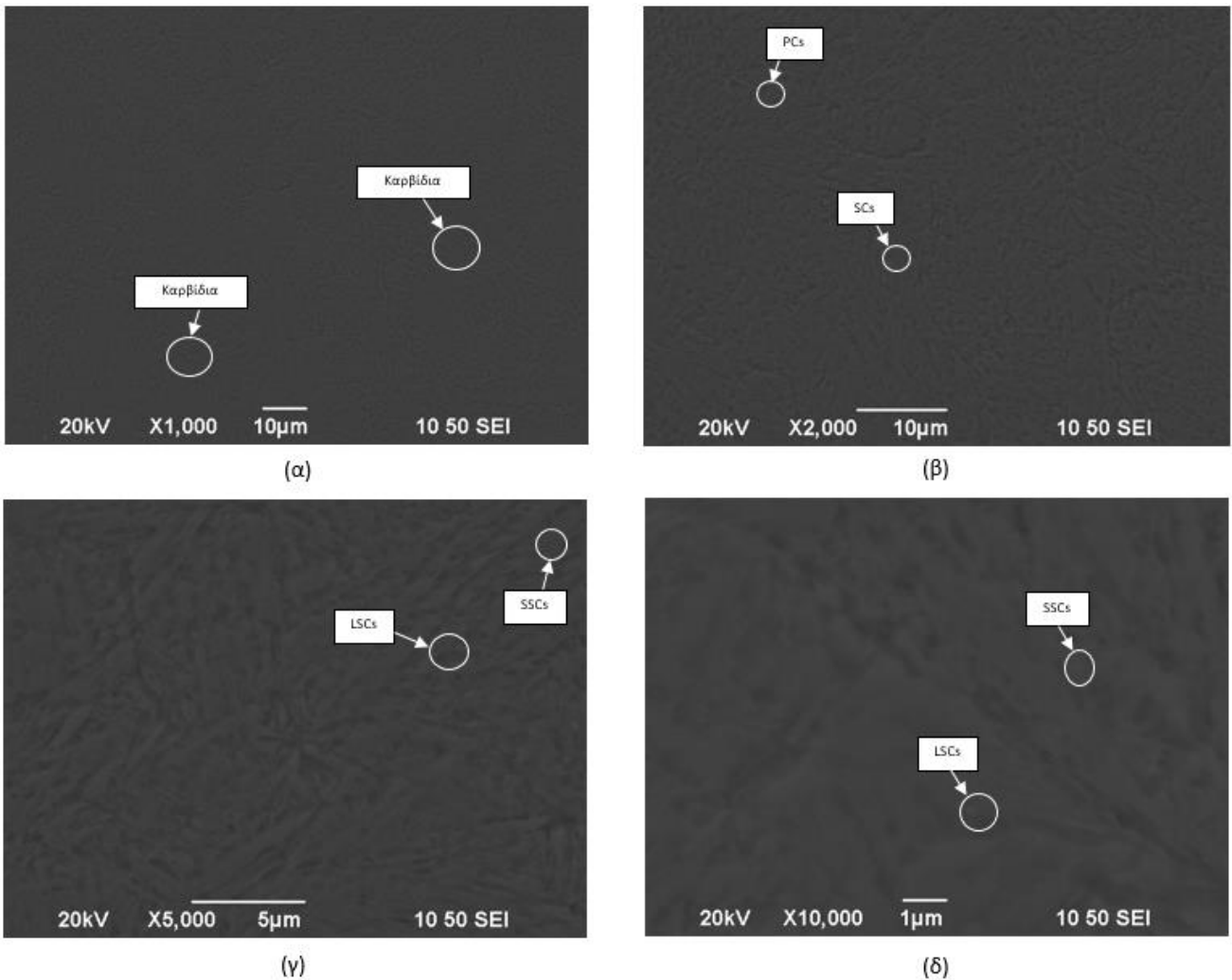
Στη περίπτωση των 450°C, παρατηρείται εμφανώς αυξημένο το ποσοστό των καρβιδίων. Υπάρχει πληθώρα μεγεθών που οφείλεται στον μετασχηματισμό των μετασταθών καρβιδίων καθώς και την κατακρήμνιση καρβιδίων άλλων κραματικών στοιχείων. Η βαθμιαία αύξηση της σκληρότητας που παρατηρήθηκε μακροσκοπικά επιβεβαιώνεται και μέσω του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.





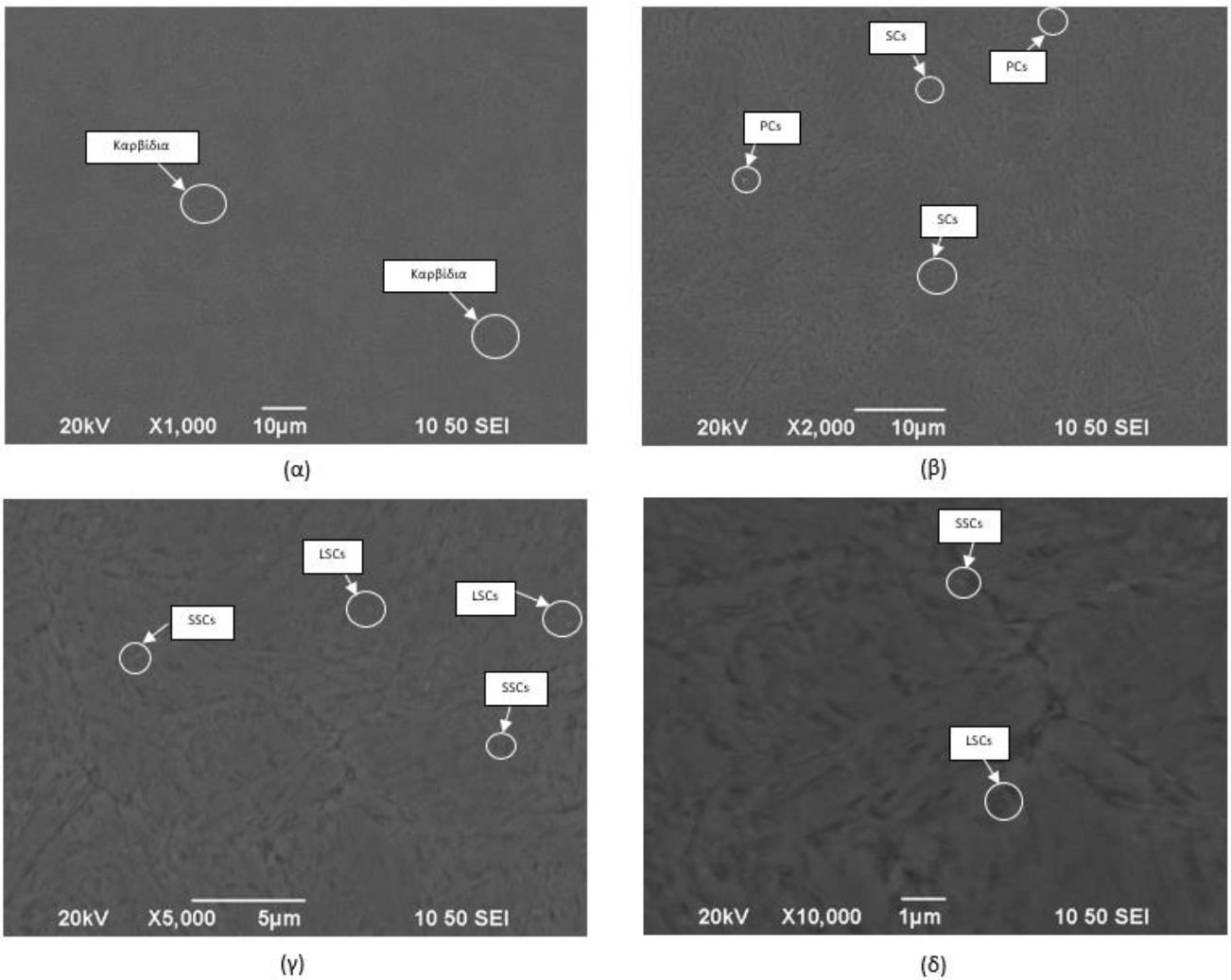
Εικόνα 52: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 500°C σε μεγέθυνση: α) x1000, β) x2000, γ) x5000, δ) x10000 και ε) x15000.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επαναφοράς, παρατηρείται μια αύξηση του αριθμού των δευτερογενών καρβιδίων και συγκεκριμένα των λεπτών δευτερογενών καρβιδίων στη δομή του υλικού. Επιπλέον, φαίνεται ότι τα καρβίδια αυτά είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένα στη μαρτενσιτική μήτρα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την αύξηση της σκληρότητας του υλικού σε αυτή τη θερμοκρασία επαναφοράς.



Εικόνα 53: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 525°C σε μεγέθυνση: α) x1000, β) x2000, γ) x5000 και δ) x10000.

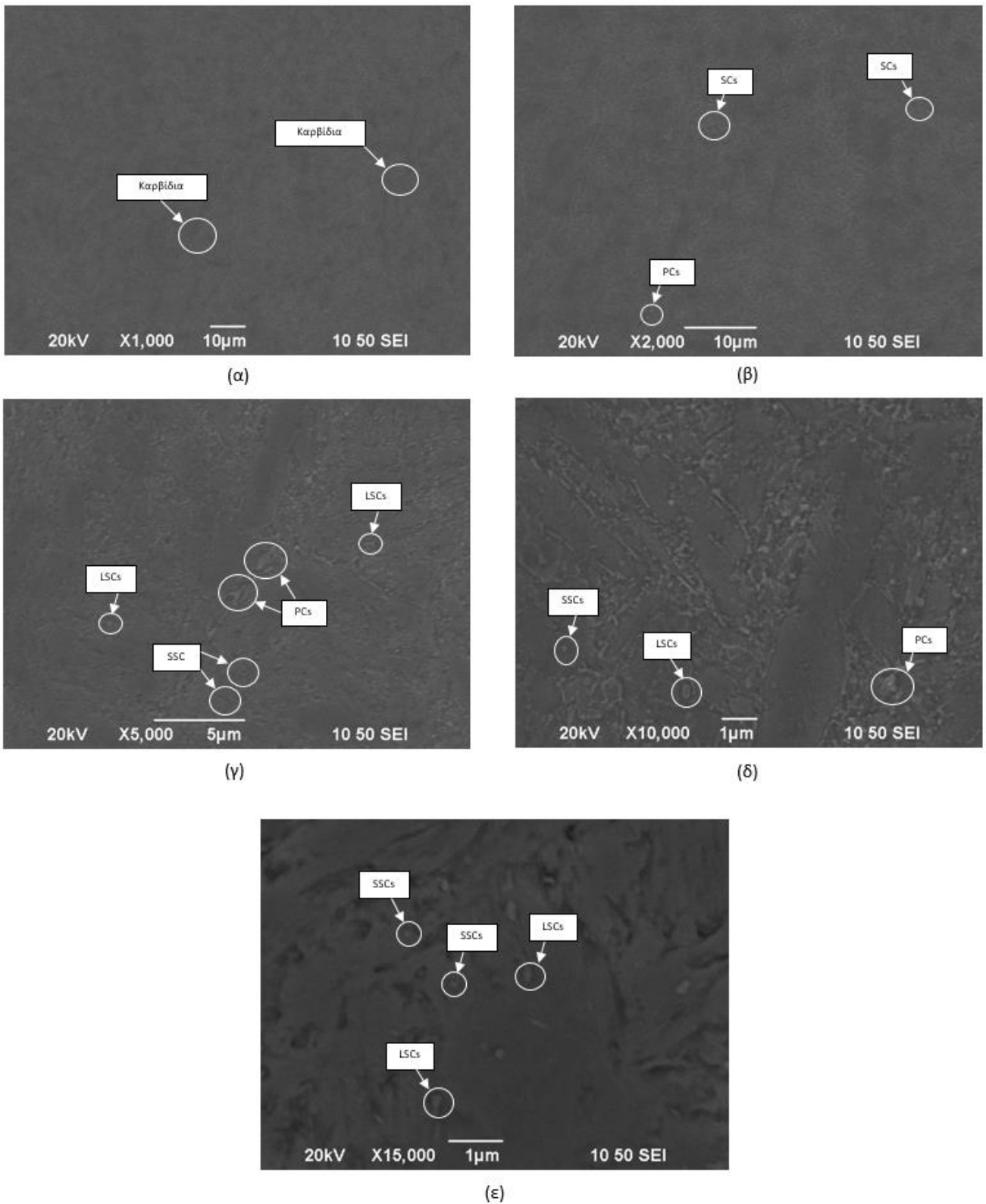
Δυστυχώς, λόγω μη επιτυχημένης χημικής προσβολής αλλά και περιορισμών στη ικανότητα ανάλυσης και μεγέθυνσης των εικόνων δεν είναι δυνατός ο σωστός εντοπισμών των πρωτογενών και δευτερογενών καρβιδίων. Παρόλα αυτά, η δομή του υλικού υπονοεί την ύπαρξη πρωτογενών καρβιδίων αλλά και λεπτών καρβιδίων ομοιόμορφα διασκορπισμένων στη δομή του.



Εικόνα 54: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 550°C σε μεγέθυνση: α) x1000, β) x2000, γ) x5000 και δ) x10000.

Ομοίως και σε αυτή τη περίπτωση, για τους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως, δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός των καρβιδίων στη δομή του υλικού. Και πάλι όμως, η δομή του υλικού, υπονοεί την ισχυρή παρουσία πρωτογενών και δευτερογενών καρβιδίων.

Τέλος, όπως φαίνεται και στη συνέχεια, κατά την επαναφορά στους 630°C απεικονίζεται εκτενέστατη συσσωμάτωση καρβιδίων και κατακρήμνιση στα όρια των κόκκων. Παρόλα αυτά η σκληρότητα του υποβάθρου η οποία έχει υποχωρήσει αρκετά, οδηγεί σε μείωση της σκληρότητας μακροσκοπικά. Η δομή αυτή της δημιουργίας δικτύων καρβιδίων δεν έχει καλή πρόβλεψη για την αντοχή σε κόπωση του υλικού.



Εικόνα 55: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα H13 μετά από επαναφορά στους 630°C σε μεγέθυνση: α) x1000, β) x2000, γ) x5000, δ) x10000 και ε) x15000.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Συζήτηση

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίπτωσης της κρυογενικής κατεργασίας στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Onar 2M. Η συγκεκριμένη κατεργασία, σύμφωνα με μια πληθώρα μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί, συμβάλει στην:

- Εξάλειψη του υπολειπόμενου ωστενίτη
- Δημιουργία η-καρβιδίων
- Κατακρήμνιση, πυρηνοποίηση και ανάπτυξη ιδιαίτερα λεπτών και μικρών δευτερογενών καρβιδίων τα οποία έχουν μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα
- Ομοιογενή μικροδομή του υλικού

Οι παραπάνω αλλαγές στη μικροδομή του υλικού έχουν σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση της μικροδομής του, και πιο συγκεκριμένα την αύξηση της σκληρότητας του και της αντοχής του στη φθορά. Ο βαθμός των παραπάνω αλλαγών εξαρτάται από τη κρυογενική κατεργασία που επιλέγεται καθώς και από το ίδιο το υλικό. Αναλυτικότερα, η θερμοκρασία κρυογενικούς κατεργασίας, ο χρόνος παραμονής σε αυτή τη θερμοκρασία, το μέσον ψύξης, ο ρυθμός ψύξης και αναθέρμανσης του υλικού, καθώς και η περιεκτικότητά του σε άνθρακα και κραματικά στοιχεία είναι κάποιοι από τους παράγοντες που καθορίζουν το αποτέλεσμα της κρυογενικής κατεργασίας.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, δοκίμια από το εξεταζόμενο υλικό ψύχθηκαν στους  $-195^{\circ}\text{C}$ , μετά τη βαφής τους και πριν ακολουθήσει η επαναφορά τους, και παρέμειναν σε αυτή τη θερμοκρασία για τρία διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν, συγκρίθηκαν με εκείνα της συμβατικής κατεργασίας σκλήρυνσης του υλικού. Όπως παρατηρήθηκε από τα σχετικά διαγράμματα, σε όλες της περιπτώσεις εντοπίστηκε το φαινόμενο της δευτερογενούς σκλήρυνσης και γενικότερα μια αύξηση της σκληρότητας συγκριτικά με τη συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης του υλικού. Επιπλέον, κατά την επαναφορά των δοκιμίων στους  $180^{\circ}\text{C}$ , τα δοκίμια τα οποία παρέμειναν στη κρυογενική για 4 ώρες παρουσίασαν τη μεγαλύτερη σκληρότητα ενώ εκείνα που έμειναν για 1 ώρα, παρουσίασαν τη μικρότερη. Το φαινόμενο όμως αυτό αντιστρέφεται στη θερμοκρασία δευτερογενούς σκλήρυνσης. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια τα οποία παρέμειναν στη κρυογενική για 1 ώρα παρουσίασαν τη μεγαλύτερη σκληρότητα ενώ εκείνα που έμειναν

για 12 ώρες, παρουσίασαν τη μικρότερη. Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται με μεγάλες διαφοροποιήσεις της ενθαλπίας τα οποία μπορούν να παρατηρηθούν μέσω θερμοδομετρίας και ογκομετρίας. Ακόμα, με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου και μικροσκοπίου ηλεκτρονικής σάρωσης παρατηρήθηκαν οι αλλαγές στη μικροδομή του υλικού. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης εξαλείφθηκε σχεδόν πλήρως με το ποσοστό του να είναι κάτω από 5%, ενώ το ποσοστό των καρβιδίων αυξήθηκε. Τα λεπτά καρβίδια είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένα μέσα στη μήτρα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μικροσκληρότητα του υλικού. Το ίδιο αναμένεται να συμβεί και με την αντοχή στη φθορά.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία έδωσε την ευκαιρία να κατανοήσουμε τη κρυογενική κατεργασία, ένα θέμα στο οποίο πολλές μελέτες περιέχουν συγκρουόμενα ή συγκεκριμένα, γενικά, συμπεράσματα και πληροφορίες. Ωστόσο, η κρυογενική κατεργασία συμβάλλει στην ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων και στη σταθερότητα της δομής του υλικού.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 37: Επαναφορά δοκιμίων 41-42 και 59-60.

Επαναφορά δοκιμίων στους <b>180°C</b>										
Αριθμός δοκιμίων				41-42 & 59-60						
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 10:40]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>				160						
<b>Ταχύτητα</b>				6-7						
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 10:40]										
<b>T [°C]</b>	20	78	122	158	160					
<b>t [min]</b>	0	5	10	15	15.25					
Τελική ρύθμιση φούρνου										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>				140						
<b>Ταχύτητα</b>				9-10						
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμίων [Ωρα: 19:32]										
<b>T<sub>set</sub>=140°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	160	0	138	48.03	138	48.24	142	48.42	159	52.32
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	159	52.32 (0)	138	1:37:01 (44.29)	138	1:37:20 (44.48)	142	1:37:41 (45.09)	159	1:41:49 (49.17)

Μέτρηση $T_{αλατιού}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 21:18]										
$T_{αλατιού}$ [°C]				182 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 21:19]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών										
$T_{set}=140^{\circ}C$	$T_{max}$ [°C]		$R_{on}$		$T_{min}$ [°C]		$R_{off}$		$T_{max}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	160	0	138	45.33	138	45.53	142	46.14	160	49.59
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 23:17]										
$T_{αλατιού}$ [°C]				181						
<b>Ωρα εξόδου δοκιμών</b>				23:18						
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμών</b>				15:45 (Την επόμενη μέρα)						

Πίνακας 38: Επαναφορά δοκιμών 43-44 και 61-62.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>280°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					43-44 & 61-62					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 8:47]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					260					
<b>Ταχύτητα</b>					6-7					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 8:47]										
<b>T [°C]</b>	27	79	119	152	180	203	225	244	261	
<b>t [min]</b>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
Τελική ρύθμιση φούρνου										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					238					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:35]										
<b>T<sub>set</sub>=238°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	254	0	235	21.34	235	21.51	239	22.10	254	24.49
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	254	24.49 (0)	235	45.57 (21.08)	235	46.15 (21.26)	239	46.33 (21.44)	254	49.12 (24.23)

Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 18:24]										
$T_{\text{αλατιού}} [^{\circ}\text{C}]$				283 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 18:32]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων										
$T_{\text{set}}=238^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	254	0	235	20.45	235	21.02	239	21.20	254	23.54
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	254	23.54 (0)	235	44.25 (20.31)	235	44.41 (20.47)	239	45.01 (21.07)	254	47.42 (23.48)
Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 20:32]										
$T_{\text{αλατιού}} [^{\circ}\text{C}]$				281						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				20:33						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				09:34 (Την επόμενη μέρα)						

Πίνακας 39: Επαναφορά δοκιμών 45-46 και 63-64.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>350°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					45-46 & 63-64					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 10:00]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					330					
<b>Ταχύτητα</b>					6-7					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 10:00]										
<b>T [°C]</b>	90	145	185	216	242	265	284	302	318	332
<b>t [min]</b>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 16:32]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					314					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:27]										
<b>T<sub>set</sub>=314°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	328	0	311	12.19	311	12.33	315	12.51	328	15.08
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	328	15.08 (0)	311	27.33 (12.25)	311	27.47 (12.39)	315	28.05 (12.57)	328	30.11 (15.03)

Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 18:03]										
$T_{\text{αλατιού}} [^{\circ}\text{C}]$				353 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 18:05]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:30]										
$T_{\text{set}}=314^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	328	0	311	12.29	311	12.43	315	13.01	328	15.25
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	328	15.25 (0)	311	28.03 (12.38)	311	28.17 (12.52)	315	28.35 (13.10)	328	30.59 (15.34)
Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 20:04]										
$T_{\text{αλατιού}} [^{\circ}\text{C}]$				353						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				20:06						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				20:50						



Πίνακας 40: Επαναφορά δοκιμών 47-48 και 65-66.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>450°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών				47-48 & 65-66						
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:52]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>				430						
<b>Ταχύτητα</b>				6-7						
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:52]										
<b>T [°C]</b>	17	64	105	138	168	191	213	231	250	266
<b>t [min]</b>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 16:20]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>				419						
<b>Ταχύτητα</b>				9-10						
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 16:56]										
<b>T<sub>set</sub>=419°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	0	416	6.16	416	6.35	420	6.47	431	8.15
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	8.15 (0)	416	14.31 (6.16)	416	14.47 (6.32)	420	15.01 (6.46)	431	16.31 (8.16)

Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:17]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				448 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:20]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 18:54]										
$T_{\text{set}}=419^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}$ [°C]		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}}$ [°C]		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	431	0	416	7.05	416	7.21	420	7.36	431	9.25
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	431	9.25 (0)	416	16.30 (7.05)	416	16.46 (7.21)	420	17.01 (7.36)	431	18.48 (9.23)
Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:20]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				450						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				19:21						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				20:10						

Πίνακας 41: Επαναφορά δοκιμών 49-50 και 67-68.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>500°C</u></b>														
Αριθμός δοκιμών					49-50 & 67-68									
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:35]														
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					480									
<b>Ταχύτητα</b>					6-7									
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:35]														
<b>T [°C]</b>	40	133	190	229	264	290	317	342	367	390	414	436	458	480
<b>t [min]</b>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 15:55]														
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					476									
<b>Ταχύτητα</b>					9-10									
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 16:56]														
<b>T<sub>set</sub>=476°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>					
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]				
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	0	473	5.05	473	5.24	477	5.36	487	6.54				
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	6.54 (0)	473	12.03 (5.09)	473	12.22 (5.28)	477	12.33 (5.39)	487	13.48 (6.54)				

Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:15]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				498 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:16]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 18:40]										
$T_{set}=476^{\circ}C$	$T_{max}$ [°C]		$R_{on}$		$T_{min}$ [°C]		$R_{off}$		$T_{max}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	487	0	473	5.46	473	6.03	477	6.16	487	7.36
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	487	7.36 (0)	473	13.24 (5.48)	473	13.41 (6.05)	477	13.54 (6.18)	487	15.19 (7.43)
Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:17]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				499						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				19:18						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				20:05						

Πίνακας 42: Επαναφορά δοκιμών 51-52 και 69-70.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>525°C</u></b>											
Αριθμός δοκιμών						51-52 & 69-70					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 9:44]											
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>						505					
<b>Ταχύτητα</b>						6-7					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 9:44]											
<b>T [°C]</b>	161	264	299	335	366	394	421	447	470	494	505
<b>t [min]</b>	0	13	20	30	40	50	60	70	80	90	95
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 14:02]											
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>						501					
<b>Ταχύτητα</b>						9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 15:01]											
<b>T<sub>set</sub>=501°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	0	498	4.54	498	5.09	502	5.23	512	6.38	
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	6.38 (0)	498	11.35 (4.57)	498	11.50 (5.12)	502	12.04 (5.26)	512	13.18 (6.40)	

Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 15:16]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				525 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 15:19]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 17:00]										
$T_{set}=501^{\circ}C$	$T_{max}$ [°C]		$R_{on}$		$T_{min}$ [°C]		$R_{off}$		$T_{max}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	512	0	498	5.32	498	5.45	502	6.00	512	7.18
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	512	7.18 (0)	498	12.47 (5.29)	498	13.00 (5.42)	502	13.15 (5.57)	512	14.26 (7.08)
Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 17:17]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				526						
Ωρα εξόδου δοκιμών				17:19						
Ωρα πλυσίματος δοκιμών				18:05						



Πίνακας 43: Επαναφορά δοκιμών 53-54 και 71-72.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>550°C</u></b>																	
Αριθμός δοκιμών									53-54 & 71-72								
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 10:29]																	
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>									530								
<b>Ταχύτητα</b>									6-7								
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 10:29]																	
<b>T [°C]</b>	16	109	171	205	241	268	295	321	346	370	418	440	462	483	504	523	530
<b>t [min]</b>	0	11	22	30	41	50	60	70	80	90	110	120	130	140	150	160	164
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 15:50]																	
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>									529								
<b>Ταχύτητα</b>									9-10								
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 16:50]																	
<b>T<sub>set</sub>=529°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>								
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]							
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	0	526	4.19	526	4.30	530	4.46	539	5.54							
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	539	5.54 (0)	526	10.17 (4.23)	526	10.29 (4.35)	530	10.47 (4.53)	539	11.53 (5.59)							

Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:05]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				548 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:07]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 18:49]										
$T_{\text{set}}=529^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}$ [°C]		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}}$ [°C]		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	539	0	526	4.49	526	4.59	530	5.18	539	6.30
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	539	6.30 (0)	526	11.19 (4.49)	526	11.28 (4.58)	530	11.47 (5.17)	539	12.58 (6.28)
Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:05]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				550						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				19:07						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				20:10						

Πίνακας 44: Επαναφορά δοκιμών 55-56 και 73-74.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>575°C</u></b>													
Αριθμός δοκιμών						55-56 & 73-74							
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 10:33]													
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>						555							
<b>Ταχύτητα</b>						6-7							
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 10:33]													
<b>T [°C]</b>	167	255	314	346	374	402	428	453	477	501	522	543	555
<b>t [min]</b>	0	10	22	31	40	50	60	70	80	90	100	110	116
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 14:01]													
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>						554							
<b>Ταχύτητα</b>						9-10							
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 15:04]													
<b>T<sub>set</sub>=554°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>				
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]			
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	563	0	551	3.44	550	3.51	555	4.12	563	5.18			
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	563	5.18 (0)	551	9.04 (3.46)	550	9.12 (3.54)	555	9.32 (4.14)	563	10.36 (5.18)			

Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 15:17]										
$T_{\text{αλατιού}}$ [°C]					574 (Αποδεκτή)					
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 15:19]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 17:03]										
$T_{\text{set}}=554^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}$ [°C]		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}}$ [°C]		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	563	0	551	4.12	550	4.19	555	4.40	563	5.53
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	563	5.53 (0)	551	10.04 (4.11)	550	10.11 (4.18)	555	10.32 (4.39)	563	11.45 (5.52)
Μέτρηση $T_{\text{αλατιού}}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 17:17]										
$T_{\text{αλατιού}}$ [°C]					576					
Ωρα εξόδου δοκιμίων					17:18					
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων					18:16					

Πίνακας 45: Επαναφορά δοκιμών 57-58 και 75-76.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>630°C</u></b>																		
Αριθμός δοκιμών									57-58 & 75-76									
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 10:47]																		
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>									610									
<b>Ταχύτητα</b>									6-7									
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 10:47]																		
<b>T [°C]</b>	152	240	287	323	354	381	407	431	454	477	498	519	538	557	573	589	604	610
<b>t[min]</b>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	164
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 14:45]																		
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>									609									
<b>Ταχύτητα</b>									9-10									
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 16:00]																		
<b>T<sub>set</sub>=609°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>									
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]								
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	616	0	605	2.51	605	3.03	609	3.17	616	4.27								
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	616	4.27 (0)	605	7.19 (2.52)	605	7.32 (3.05)	609	7.45 (3.18)	616	8.54 (4.27)								
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 16:12]																		
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>									627 (Αποδεκτή)									

Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 16:15]

Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 17:58]

$T_{set}=609^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	617	0	605	3.29	605	3.42	609	3.55	617	4.50
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	617	4.50 (0)	605	8.18 (3.28)	605	8.30 (3.40)	609	8.43 (3.53)	617	9.35 (4.45)

Μέτρηση  $T_{αλατιού}$  πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 18:13]

$T_{αλατιού} [^{\circ}\text{C}]$	633
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>	18:15
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>	19:16



Πίνακας 46: Επαναφορά δοκιμών 77-78 και 95-96.

Επαναφορά δοκιμών στους <b>180°C</b>										
Αριθμός δοκιμών				77-78 & 95-96						
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:08]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>				140						
<b>Ταχύτητα</b>				9-10						
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:08]										
<b>T [°C]</b>	19	31	57	82	107	130	140			
<b>t [min]</b>	0	1	2	3	4	5	5,5			
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 18:18]										
<b>T<sub>set</sub>=140°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	160	0	138	40.02	138	40.20	142	40.43	159	44.28
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	159	44.28 (0)	138	1:24:30 (40.02)	138	1:24:48 (40.20)	142	1:25:10 (40.42)	159	1:29:06 (44.38)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 19:56]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>				182 (Αποδεκτή)						

Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 19:57]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 20:25]										
<b>T<sub>set</sub>=140°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	160	0	138	41.33	138	41.50	142	42.13	159	46.06
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	159	46.06 (0)	138	1:27:41 (41.35)	138	1:27:59 (41.53)	142	1:28:21 (42.15)	160	1:31:13 (45.07)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 21:57]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>							180			
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>							21:58			
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>							22:42			

Πίνακας 47: Επαναφορά δοκιμών 79-80 και 97-98.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>280°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					79-80 & 97-98					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:02]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					238					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:02]										
<b>T [°C]</b>	66	77	103	131	156	180	201	221	238	
<b>t [min]</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:00]										
<b>T<sub>set</sub>=238°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	254	0	235	18	235	18.16	239	18.36	254	21.26
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	254	21.26 (0)	235	39.31 (18.05)	235	39.47 (18.21)	239	40.07 (18.41)	254	42.56 (21.30)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:45]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					282 (Αποδεκτή)					

Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:46]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 18:39]										
$T_{set}=238^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	255	0	235	20.12	235	20.27	239	20.48	254	23.44
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	254	23.44 (0)	235	42.57 (19.13)	235	43.13 (19.29)	239	43.34 (19.50)	254	46.34 (22.50)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:45]										
$T_{αλατιού} [^{\circ}\text{C}]$						281				
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>						19:46				
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>						20:51				

Πίνακας 48: Επαναφορά δοκιμών 81-82 και 99-100.

Επαναφορά δοκιμών στους <b>350°C</b>													
Αριθμός δοκιμών							81-82 & 99-100						
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 11:51]													
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>							314						
<b>Ταχύτητα</b>							9-10						
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 11:51]													
<b>T [°C]</b>	90	101	147	158	183	206	226	246	264	280	295	310	314
<b>t [min]</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11.2
Τελική ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 16:28]													
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>							312						
<b>Ταχύτητα</b>							9-10						
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:21]													
<b>T<sub>set</sub>=312°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>				
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	326	0	309	11.50	309	12.04	313	12.24	326	14.42			
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	326	14.42 (0)	309	26.34 (11.52)	309	26.49 (12.07)	313	27.09 (12.27)	326	29.21 (14.39)			

Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:52]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				353 (Αποδεκτή)						
Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:53]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:18]										
$T_{\text{set}}=312^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}$ [°C]		$R_{\text{on}}$		$T_{\text{min}}$ [°C]		$R_{\text{off}}$		$T_{\text{max}}$ [°C]	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
1 <sup>ος</sup> Κύκλος	327	0	309	13.01	309	13.14	313	13.33	327	15.25
2 <sup>ος</sup> Κύκλος	327	15.25 (0)	309	28.27 (13.02)	309	28.40 (13.15)	313	29 (13.35)	327	30.53 (15.28)
Μέτρηση $T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:52]										
$T_{\alpha\lambda\alpha\tau\iota\acute{o}\upsilon}$ [°C]				353						
Ωρα εξόδου δοκιμίων				19:53						
Ωρα πλυσίματος δοκιμίων				20:50						



Πίνακας 49: Επαναφορά δοκιμών 83-84 και 101-102.

Επαναφορά δοκιμών στους <b>450°C</b>													
Αριθμός δοκιμών							83-84 & 101-102						
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 13:47]													
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>							419						
<b>Ταχύτητα</b>							9-10						
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 13:47]													
<b>T [°C]</b>	21	54	112	166	214	254	288	319	346	370	392	413	419
<b>t [min]</b>	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	22.5
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:06]													
<b>T<sub>set</sub>=419°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>				
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	0	416	5.25	416	5.43	420	6	431	7.36			
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	7.36 (0)	416	13.10 (5.34)	416	13.26 (5.50)	420	13.44 (6.08)	431	15.27 (7.51)			
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:23]													
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>							451 (Αποδεκτή)						

Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 17:24]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 19:03]										
$T_{set}=419^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	0	416	6.38	416	6.57	420	7.12	431	9.08
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	431	9.08 (0)	416	15.49 (6.41)	416	16.05 (6.57)	420	16.22 (7.14)	431	18.15 (9.07)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 19:23]										
$T_{αλατιού} [^{\circ}\text{C}]$					452					
<b>Ωρα εξόδου δοκιμών</b>					19:24					
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμών</b>					14:48 (Στις 18/7/18)					

Πίνακας 50: Επαναφορά δοκιμών 85-86 και 103-104.

Επαναφορά δοκιμών στους <b>500°C</b>										
Αριθμός δοκιμών					85-86 & 103-104					
Άνοιγμα φούρνου [Ωρα: 14:14]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					476					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου [Ωρα: 14:14]										
<b>T [°C]</b>	42	108	188	256	310	360	392	426	457	476
<b>t [min]</b>	0	3	6	9	12	15,5	18	21	24	26
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:33]										
<b>T<sub>set</sub>=476°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	0	473	4.27	473	4.46	477	5	487	6.26
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	6.26 (0)	473	10.52 (4.26)	473	11.11 (4.45)	477	11.25 (4.59)	487	12.50 (6.24)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 17:47]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					499 (Αποδεκτή)					

Τοποθέτηση δοκιμίων [Ωρα: 17:49]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:33]										
$T_{set}=476^{\circ}\text{C}$	$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{on}$		$T_{min} [^{\circ}\text{C}]$		$R_{off}$		$T_{max} [^{\circ}\text{C}]$	
	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]	T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	0	473	5.21	473	5.38	477	5.52	487	7.37
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	487	7.37 (0)	473	13.02 (5.25)	473	13.19 (5.42)	477	13.34 (5.57)	487	15.19 (7.42)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 19:48]										
$T_{αλατιού} [^{\circ}\text{C}]$					500					
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>					19:49					
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>					21:20					

Πίνακας 51: Επαναφορά δοκιμών 87-88 και 105-106.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>525°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					87-88 & 105-106					
Ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 19:51]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					501					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 21:43]										
<b>T<sub>set</sub>=501°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	0	498	5.30	498	5.43	502	6.01	512	7.22
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	7.22 (0)	498	12.52 (5.30)	498	13.05 (5.43)	502	13.23 (6.01)	512	14.37 (7.15)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 21:59]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					524 (Αποδεκτή)					
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 22:00]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 23:43]										
<b>T<sub>set</sub>=501°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	0	498	5.49	498	6.02	502	6.20	512	7.37

<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	512	7.37 (0)	498	13.19 (5.42)	498	13.32 (5.55)	502	13.49 (6.12)	512	15.08 (7.31)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 23:59]										
<b><math>T_{αλατιού}</math> [°C]</b>					524					
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>					00:00					
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>					12:20 (Στις 19/7/18)					

Πίνακας 52: Επαναφορά δοκιμών 91-92 και 109-110.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>575°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					91-92 & 109-110					
Ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 10:29]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					554					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 13:15]										
<b>T<sub>set</sub>=554°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	562	0	551	2.41	550	2.47	555	3.14	562	4.26
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	562	4.26 (0)	551	7.13 (2.47)	550	7.19 (2.53)	555	7.47 (3.21)	562	9 (4.34)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 13:26]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					576 (Αποδεκτή)					
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 13:27]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 15:05]										
<b>T<sub>set</sub>=554°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	563	0	551	3.50	551	4.08	555	4.22	563	5.32



<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	563	5.32 (0)	551	9.22 (3.50)	551	9.39 (4.07)	555	9.52 (4.20)	563	11.01 (5.29)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 15:26]										
<b><math>T_{αλατιού}</math> [°C]</b>					577					
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>					15:27					
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>					11:50 (Στις 11/9/18)					

Πίνακας 53: Επαναφορά δοκιμών 93-94 και 111-112.

<b>Επαναφορά δοκιμών στους <u>630°C</u></b>										
Αριθμός δοκιμών					93-94 & 111-112					
Ρύθμιση φούρνου [Ωρα: 17:31]										
<b>T<sub>set</sub> [°C]</b>					604					
<b>Ταχύτητα</b>					9-10					
Κύκλος φούρνου πριν την εισαγωγή των δοκιμών [Ωρα: 17:58]										
<b>T<sub>set</sub>=604°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	612	0	600	3.52	600	4.01	604	4.19	612	5.15
<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	612	5.15 (0)	600	9.04 (3.49)	600	9.13 (3.58)	604	9.31 (4.16)	612	10.21 (5.06)
Μέτρηση T <sub>αλατιού</sub> για τη παραπάνω ρύθμιση [Ωρα: 18:10]										
<b>T<sub>αλατιού</sub> [°C]</b>					629 (Αποδεκτή)					
Τοποθέτηση δοκιμών [Ωρα: 18:12]										
Κύκλος φούρνου πριν την έξοδο των δοκιμών [Ωρα: 19:43]										
<b>T<sub>set</sub>=604°C</b>	<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>on</sub></b>		<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>		<b>R<sub>off</sub></b>		<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	
	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
<b>1<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	612	0	600	3.57	600	4.04	604	4.23	612	5.26

<b>2<sup>ος</sup> Κύκλος</b>	612	5.26 (0)	600	9.18 (3.52)	600	9.32 (4.06)	604	9.45 (4.19)	612	10.41 (5.15)
Μέτρηση $T_{αλατιού}$ πριν την έξοδο των δοκιμίων [Ωρα: 20:12]										
<b><math>T_{αλατιού}</math> [°C]</b>					633					
<b>Ωρα εξόδου δοκιμίων</b>					20:14					
<b>Ωρα πλυσίματος δοκιμίων</b>					11:50 (Στις 11/9/18)					

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASM International. (1991). *ASM Handbook, Heat Treating* (4th ed.). Materials Park.
2. Abbaschian, R., Abbaschian, L., & Reed-Hill, R. (2010). *Physical metallurgy principles* (4th ed.). Stamford: Cengage Learning.
3. ASM Handbook Program. (2005). "*ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Vol. 1*".
4. Attaullah, A. (1999). Heat Treatment and Toughness Behavior of Tool Steels (D2 and H13) for Cutting blades.
5. Davis, J. (1996). *Carbon and alloy steels*. Materials Park, Ohio: ASM International.
6. 70MnCrMoV9-2-4-2 tempered steel. *Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering*, 29(1).
7. Krauss, G. (2016). *Steels*. Materials Park: ASM International.
8. Luo, Y., Wu, X., Wang, H., & Min, Y. (2009). A comparative study on non-quenched and quenched prehardened steel for large section plastic mould. *Journal Of Materials Processing Technology*, 209(14), 5437-5442. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.019
9. Marashi, J., Yakushina, E., Xirouchakis, P., Zante, R., & Foster, J. (2019). An evaluation of H13 tool steel deformation in hot forging conditions.
10. Prasad, C., Bhuyan, P., Kaithwas, C., Saha, R., & Mandal, S. (2018). Microstructure engineering by dispersing nano-spheroid cementite in ultrafine-grained ferrite and its implications on strength-ductility relationship in high carbon steel. *Materials & Design*, 139, 324-335. doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.019
11. Ramezani, M., Pasang, T., Chen, Z., Neitzert, T., & Au, D. (2015). Evaluation of carbon diffusion in heat treatment of H13 tool steel under different atmospheric conditions. *Journal Of Materials Research And Technology*, 4(2), 114-125. doi: 10.1016/j.jmrt.2014.10.014
12. Roberts, G., Krauss, G., & Kennedy, R. (2010). *Tool steels*. Materials Park, OH: ASM International.
13. Sandhi, D. (2014). A Comparative Study of the Effect of Thermal Treatments on the Mechanical behavior of Tool Steels. *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 4(3).
14. Tkalcec, I. (2004). Mechanical properties and microstructure of a high carbon steel.
15. Uddeholms AB. (2012). *Heat treatment of tool steel* (8th ed.).
16. Uddeholm AB. (2012). *UDDEHOLM OVAR ® 2 MICRოდIZED* (4th ed.).
17. W. R, P., C. Lins, J., R. P., S., Mendes, P., & Pereira, R. (2017). Microstructural evolution under tempering heat treatment in AISI H13 hot-work tool steel. *International Journal Of Engineering Research And Applications*, 07(04), 67-71. doi: 10.9790/9622-0704046771
18. Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., & Golozar, M. (2009). Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel. *Materials & Design*, 30(8), 3259-3264. doi: 10.1016/j.matdes.2008.11.016
19. Amini, K., Nategh, S., & Shafyei, A. (2010). Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel. *Materials & Design*, 31(10), 4666-4675. doi: 10.1016/j.matdes.2010.05.028

20. Bhawar, V., Khot, S., Kattire, P., Mehta, M., & Singh, R. (2017). Influence of Deep Cryogenic Treatment (DCT) on Thermo Mechanical Performance of AISI H13 Tool Steel. *Journal Of Materials Science And Chemical Engineering*, 05(01), 91-101. doi: 10.4236/msce.2017.51013
21. Bramfitt, B., & Benscoter, A. (2002). *Metallographer's guide*. Materials Park, Ohio: ASM International.
22. Das, D., Dutta, A., & Ray, K. (2010). Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science And Engineering: A*, 527(9), 2182-2193. doi: 10.1016/j.msea.2009.10.070
23. Das, D., Dutta, A., Toppo, V., & Ray, K. (2007). Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Carbide Precipitation and Tribological Behavior of D2 Steel. *Materials And Manufacturing Processes*, 22(4), 474-480. doi: 10.1080/10426910701235934
24. Jawahir, I., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., & Meyer, D. et al. (2019). Cryogenic manufacturing processes.
25. Kalsi, N., Sehgal, R., & Sharma, V. (2010). Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review. *Materials And Manufacturing Processes*, 25(10), 1077-1100. doi: 10.1080/10426911003720862
26. Katoch, S., Sehgal, R., & Singh, V. (2017). Evolution of mechanical properties and microstructure of differently cryogenically treated hot die steel AISI-H13. *International Journal Of Materials Research*, 108(3), 173-184. doi: 10.3139/146.111467
27. Koneshlou, M., Meshinchi Asl, K., & Khomamizadeh, F. (2011). Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel. *Cryogenics*, 51(1), 55-61. doi: 10.1016/j.cryogenics.2010.11.001
28. Maalekian, M. (2007). The Effects of Alloying Elements on Steels.
29. Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., & Stiasny, K. (2001). Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. *Journal Of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 350-355. doi: 10.1016/s0924-0136(01)00973-6
30. Patil, P., & Tated, R. (2012). Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of steels. A Review. *International Conference In Computational Intelligence (ICCI)*, 9, 10-29.
31. Pérez, M., & Belzunce, F. (2019). The effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of an AISI H13 steel.
32. Reitz, W., & Pendray, J. (2001). CRYOPROCESSING OF MATERIALS: A REVIEW OF CURRENT STATUS. *Materials And Manufacturing Processes*, 16(6), 829-840. doi: 10.1081/amp-100108702
33. Gill, S., Singh, J., Singh, R., & Singh, H. (2011). Effect of Cryogenic Treatment on AISI M2 High Speed Steel: Metallurgical and Mechanical Characterization. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 21(7), 1320-1326. doi: 10.1007/s11665-011-0032-z
34. Tsaroucha, A. (2018). Cryogenic Treatment of Uddeholm Ovar 2M tool steel.
35. Caldesi, E., Carlevaris, D., Dauriz, A., Lindhom, S., Ometto, A., Zampiccoli, M., & Pelizzari, M. Influence of RT soaking on the stability in 72NiCrMo4-2 tool

- steel. *Proceedings Of European Conference On Heat Treatment-Heat Treatment & Surface Engineering For Automotive*.
36. Cheng, L., Brackman, C., Korevaar, B., & Mittemeijer, E. (1988). Stages in tempering of a martensitic 1.13 per cent carbon steel. *Met Trans*.
  37. Oppenkowski, A., Weber, S., & Theisen, W. (2010). Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels. *Journal Of Materials Processing Technology*, 210(14), 1949-1955. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.007
  38. Preciado, M., & Pellizzari, M. (2014). Influence of deep cryogenic treatment on the thermal decomposition of Fe–C martensite. *Journal Of Materials Science*, 49(23), 8183-8191. doi: 10.1007/s10853-014-8527-2
  39. Tyshchenko, A., Theisen, W., Oppenkowski, A., Siebert, S., Razumov, O., & Skoblik, A. et al. (2010). Low-temperature martensitic transformation and deep cryogenic treatment of a tool steel. *Materials Science And Engineering: A*, 527(26), 7027-7039. doi: 10.1016/j.msea.2010.07.056
  40. Chrysoulakis, G., & Pantelis, D. (1996). *Epistimi kai technologia twn metallikwn ylikwn*. Athens: Papatotiriou.