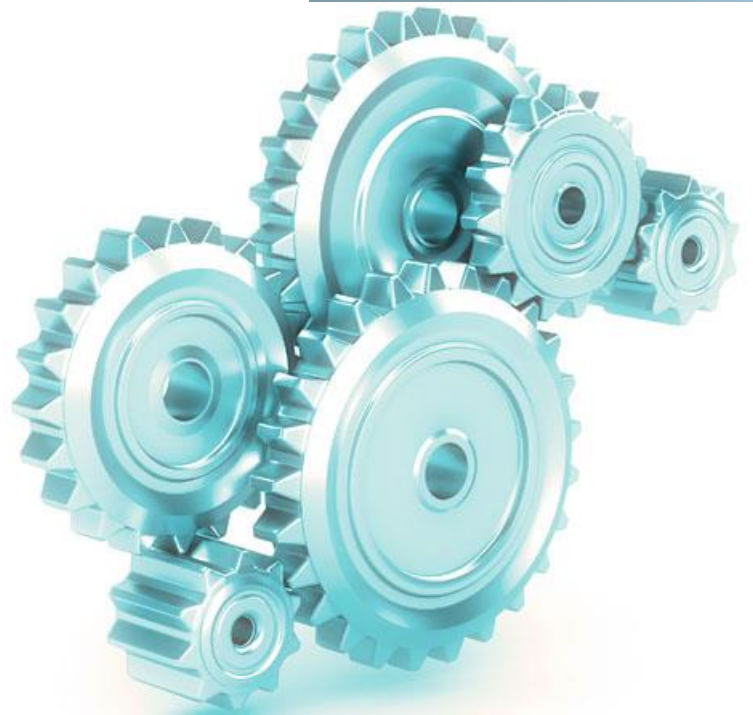


Διπλωματική Εργασία «Μελέτη μικροδομών κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων»



Υπεύθυνη Φοιτήτρια: Μουτζούρη Σοφία

A.M.: 46146535

ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. Κάρμεν Μέντρεα

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μελέτη μικροδομών κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Μέντρεα Κάρμεν	Αναπληρώτρια Καθηγήτρια	
2	Παπαγεωργίου Δημήτριος	Ακαδημαϊκός Υπότροφος, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.	
3	Καρέλλας Αγαθοκλής - Γεώργιος	Μόνιμο Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.ΔΙ.Π.)	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μουτζούρη Σοφία του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46146535 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την μικροδομή έξι κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων με σκοπό την διαπίστωση της επίδρασης και τυχόν οφέλους που έχει στην μικροδομή και σκληρότητά τους η υποβολή αυτών σε κρυογενικές κατεργασίες. Στόχος είναι η συλλογή στοιχείων που αφορούν τις τιμές μακροσκληρότητας και μικροσκληρότητας, καθώς και την εικόνα της αποκτηθείσας μικροδομής για την σύγκρισή τους με αντίστοιχα δεδομένα τα οποία υπάρχουν για τους ίδιους, συμβατικά κατεργασμένους εργαλειοχάλυβες .

Για τον σκοπό αυτό, ελήφθησαν έξι δοκίμια από διαφορετικούς εργαλειοχάλυβες από τα οποία προέκυψαν δύο σειρές από μικρότερα τεμάχια. Στα τεμάχια αυτά, μετά την τυποποιημένη προετοιμασία για μεταλλογραφικό έλεγχο, στην μεν πρώτη σειρά εκτελέστηκαν μετρήσεις μακροσκληρότητας, στην δε δεύτερη, μετρήσεις μικροσκληρότητας και οπτική μικροσκοπία.

Μετά την συλλογή των δεδομένων, οι τιμές μακροσκληρότητας και μικροσκληρότητας και οι εικόνες της αποκτηθείσας μικροδομής συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δεδομένα των έξι αυτών εργαλειοχαλύβων οι οποίοι δεν είχαν υποβληθεί σε κρυογενική κατεργασία.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ABSTRACT

The present thesis studies the microstructure of six cryogenically treated tool steels. It aims to ascertain the impact and the possible benefit that cryogenic treatment has on the microstructure. An attempt will be made to gather data for hardness, microhardness and pictures of the obtained microstructure in order to compare them to those from parts of the same materials that were conventionally heat treated.

Six specimens from different tool steels were received and were cut into two opposite pieces respectively. On the first six specimens, after being grinded and polished, hardness measurements were carried out on the opposite specimens, microhardness as well optical microscopy was carried out.

Finally, all gathered data of the cryogenic treatment were compared to those of the same tool steel after conventional heat treatment.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με βάση τον κανονισμό του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με εισήγηση και επίβλεψη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Σκοπός της παρούσης είναι αφ' ενός η εύρεση των τιμών μικροσκληρότητας και μακροσκληρότητας έξι κρυσταλλικών κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων και εφ' ετέρου η περιγραφή της μικροδομής τους μέσω οπτικής μικροσκοπίας. Επιχειρείται η κατασκευή ενός «χάρτη» υλικών, μέσω του οποίου θα παρέχεται μία ολοκληρωμένη εικόνα της σκληρότητας και της μικροδομής που αποκτά κάθε υλικό αφού αυτό υποστεί συγκεκριμένη κρυσταλλική κατεργασία.

Στην βιομηχανία, η σκληρότητα και η αποκτηθείσα μικροδομή είναι δύο βασικοί παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την επιλογή υλικού και τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων. Η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων καθορίζεται από αυτές τις δύο ιδιότητες, απόρροια των οποίων είναι και όλες οι υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες όπως η δυσθραυστότητα, η εφελκυστική αντοχή, η αντοχή σε κρούση και κόπωση κλπ. Η διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος ή εργαλείου θα επηρεάσει κατ' επέκταση σημαντικά τα κόστη και την παραγωγικότητα μίας επιχείρησης. Είναι επομένως σημαντική η βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων και των δυνατοτήτων των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται τα εργαλεία, στις απαιτήσεις σχεδιασμού των οποίων δεν μπορούν να ανταποκριθούν πλήρως οι συμβατικές θερμικές κατεργασίες με τις δυνατότητες που παρέχουν.

Επομένως, γεννάται η ανάγκη ανάπτυξης συμπληρωματικών των θερμικών κατεργασιών ώστε να υπάρξει βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών οι οποίες χωλαίνουν με την εφαρμογή μόνο συμβατικών θερμικών κατεργασιών. Έτσι, οι υπομηδενικές κατεργασίες, συχνότερα αναφερόμενες ως κρυσταλλικές, εξετάζονται ως συμπλήρωμα των θερμικών κατεργασιών.

Ωστόσο, ο σχεδιασμός και η διεξαγωγή των υπομηδενικών κατεργασιών προϋποθέτει καλή κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών και των τάσεων που αυτά έχουν, ως αποτέλεσμα της χημικής τους σύστασης. Στο πρώτο μέρος γίνεται εκτενής αναφορά σε όλες τις ιδιότητες των διαφόρων κατηγοριών εργαλειοχαλύβων οι οποίες οφείλονται στην χημική τους σύσταση, στις ιδιότητες που προσφέρουν τα διάφορα κραματοποιητικά στοιχεία σε αυτούς ως προσθήκες και οι τάσεις που έχουν τα στοιχεία αυτά για σχηματισμό συγκεκριμένων ενώσεων στις εκάστοτε μικροδομές στις οποίες αυτά ευρίσκονται.

Συνεπώς, οι υπομηδενικές κατεργασίες θα πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπ' όψιν όλους τους ανωτέρω παράγοντες και θα πρέπει να προσαρμόζονται στις τάσεις, δυνατότητες και ιδιότητες του κάθε υλικού με σκοπό την βελτίωση των όποιων ιδιοτήτων δύναται να βελτιωθούν. Αποδεικνύεται άλλωστε ότι κάθε υλικό έχει την δική του ξεχωριστή συμπεριφορά όταν υποβάλλεται σε υπομηδενικές κατεργασίες, ανάλογα με την κάθε θερμοκρασία, διάρκεια και θέση τους στον κύκλο της επιβελτίωσης.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας διενεργούνται μετρήσεις μακροσκληρότητας, μικροσκληρότητας και οπτική μικροσκοπία με διακριβωμένα και βαθμονομημένα όργανα βάσει των προβλεπόμενων προτύπων, για την απόκτηση των απαιτούμενων δεδομένων μέσω των οποίων δύναται να διαπιστωθεί η επιρροή των κρυσταλλικών κατεργασιών στην μικροδομή κάθε εξεταζόμενου εργαλειοχαλύβου. Η μελέτη αυτή αποτελεί τη βάση για περαιτέρω μελέτη των εργαλειοχαλύβων αυτών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμώς όλους τους ανθρώπους που συνεργάστηκαν για τον σχεδιασμό, την διεξαγωγή και περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας, χωρίς την συμβολή των οποίων αυτή θα ήταν αδύνατη. Ειδικότερα:

- Το εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για την διάθεση του εξοπλισμού του για την πραγματοποίηση της κοπής, εγκιβωτισμού, λείανσης, στίλβωσης, μετρήσεων σκληρότητας, χημικής προσβολής και οπτικής μικροσκοπίας της διπλωματικής μου εργασίας.
- Την κυρία Κάρμεν Μέντρεα, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca), καθηγήτρια των μαθημάτων ΕΠΤΜΥΛ, Θερμικών Κατεργασιών και Ανάλυσης Αστοχίας Μηχανολογικών Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΑΔΑ και εισηγήτρια της παρούσης διπλωματικής εργασίας, για τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια, τόσο μέσω των μαθημάτων και της ενασχολήσεώς μου με το εργαστήριο ΕΠΤΜΥΛ, όσο και κατά την διεξαγωγή της παρούσης.
- Τον επιβλέποντα της εργασίας μου κύριο Δημήτρη Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο Μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, επιστημονικό συνεργάτη των εργαστηρίων ΕΠΤΜΥΛ και Αντοχής Υλικών του ΠΑΔΑ στον οποίο οφείλω την ευκαιρία για την ενασχόλησή μου όλα αυτά τα χρόνια με το εργαστήριο ΕΠΤΜΥΛ, για τις πολύτιμες γνώσεις του και συμβουλές που μου παρείχε κατά τα μαθήματα, κατά την ενασχόλησή μου με το εργαστήριο ΕΠΤΜΥΛ και καθ' όλη την διάρκεια της διεξαγωγής και εκτέλεσης της παρούσης (σχεδιασμό, καθοδήγηση και εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών).
- Τον κύριο Γιώργο Καρέλλα, Μηχανολόγο Μηχανικό και ΕΔΙΠ του εργαστηρίου ΕΠΤΜΥΛ του ΠΑΔΑ για την συμβολή του στην διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών και την καθοδήγησή του όλα αυτά τα χρόνια στα μαθήματα και στο εργαστήριο ΕΠΤΜΥΛ.
- Τον συμφοιτητή μου Αρσένη Δραγάτη, Μηχανολόγο Μηχανικό ΠΑΔΑ και Μηχανικό Ποιοτικού Ελέγχου στην HALCOR S.A. για την πολύτιμη βοήθειά του στην διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας της μικροσκληρομέτρησης και τις συμβουλές του για την συγγραφή της παρούσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου: τον πατέρα μου Γιώργο στον οποίο οφείλω την ενασχόλησή μου με το πεδίο του Μηχανολόγου, την μητέρα μου Ελένη και την αδερφή μου Μαρία για όλα τα εφόδια και την συμπαράσταση που μου παρείχαν ώστε να βρίσκομαι αυτήν την στιγμή στην τριτοβάθμια εκπαίδευση και στην ευχάριστη θέση της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ	9
1.1	Ως προς την Χημική τους σύσταση.....	9
1.2	Ως προς τον προορισμό τους.....	9
1.3	Ως προς τις χρήσεις τους	9
1.3.1	Χάλυβες Κατασκευών	9
1.3.2	Ανοξείδωτοι Χάλυβες	9
1.3.3	Χάλυβες Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών.....	10
1.3.4	Εργαλειοχάλυβες.....	11
2.	ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ.....	20
2.1	Τύποι Καρβιδίων	21
2.1.1	Πρωτογενή καρβίδια	22
2.1.2	Ευτηκτικά καρβίδια.....	22
2.1.3	Δευτερογενή καρβίδια.....	24
2.1.4	Τύποι καρβιδίων για κάθε κατηγορία εργαλειοχαλύβων	25
2.2	Χαρακτηριστικά καρβιδίων.....	31
2.2.1	Χαρακτηριστικά πρωτογενών και ευτηκτικών καρβιδίων	31
2.2.2	Χαρακτηριστικά δευτερογενών καρβιδίων	32
3.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ	33
3.1	Ιδιότητες με βάση το προφίλ της κραμάτωσης.....	33
3.1.1	Uddeholm Calmax.....	38
3.1.2	Uddeholm Unimax	39
3.1.3	Uddeholm Nimax	40
3.1.4	Uddeholm Viking	41
3.1.5	Uddeholm Sverker 3.....	43
3.1.6	Uddeholm Orvar Supreme.....	44
3.2	Χρήσεις.....	45
3.2.1	Uddeholm Calmax.....	45
3.2.2	Uddeholm Unimax	45
3.2.3	Uddeholm Nimax	46
3.2.4	Uddeholm Viking	46
3.2.5	Uddeholm Sverker 3.....	47
3.2.6	Uddeholm Orvar Supreme.....	47



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

4.	ΥΠΟΜΗΔΕΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ	48
4.1	Είδη υπομηδενικών κατεργασιών.....	49
4.1.1	Ψυχρή κατεργασία.....	49
4.1.2	Ήπια κρυογενική κατεργασία.....	49
4.1.3	Βαθεία κρυογενική κατεργασία.....	50
4.2	Εκτιμώμενοι μηχανισμοί επίδρασης των υπομηδενικών κατεργασιών στους χάλυβες.....	50
4.2.1	Μετασχηματισμός παραμένοντος ωστενίτη σε μαρτενσίτη	51
4.2.2	Κατακρήμνιση καρβιδίων	52
4.3	Εφαρμογές των υπομηδενικών κατεργασιών	53
4.3.1	Ψυχρή κατεργασία και ήπια κρυογενική κατεργασία	53
4.3.2	Βαθεία κρυογενική κατεργασία.....	53
4.4	Το ερώτημα της σωστής θέσης των υπομηδενικών κατεργασιών στον κύκλο της επιβελτίωσης	54
5.	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	60
5.1	Κοπή	63
5.2	Εγκιβωτισμός.....	65
5.3	Λείανση και στίλβωση	65
6.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ.....	68
6.1	Βαθμονόμηση σκληρομέτρου Alpha Duromatic.....	68
6.2	Μετρήσεις Σκληρότητας Εξεταζόμενων Δοκιμίων.....	70
7.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ	72
7.1	Πρωτογενείς μετρήσεις	72
7.2	Επεξεργασία μετρήσεων.....	74
7.3	Διόρθωση.....	77
7.4	Μετατροπή των τιμών της κλίμακας Vickers σε Rockwell C.....	81
8.	ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ	85
8.1	Χημική προσβολή.....	85
8.2	Οπτική Μικροσκοπία	86
8.2.1	Uddeholm Calmax.....	86
8.2.2	Uddeholm Unimax	89
8.2.3	Uddeholm Nimax	92
8.2.4	Uddeholm Viking	95
8.2.5	Uddeholm Sverker 3.....	98



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

8.2.6	Uddeholm Orvar Supreme.....	101
	ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	105



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι χάλυβες ταξινομούνται σε πλήθος κατηγοριών ανάλογα με την χημική τους σύσταση, τον προορισμό τους και τις χρήσεις τους [1].

1.1 Ως προς την Χημική τους σύσταση

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε κοινούς ανθρακούχους χάλυβες και κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες. Οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες, οι οποίοι δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης πλην των συνήθων ακαθαρσιών, κατηγοριοποιούνται με βάση την περιεκτικότητά τους σε C σε υποευτηκτοειδείς (περιεκτικότητα <0,8% κατά βάρος), ευτηκτοειδείς (περιεκτικότητα 0,8% κατά βάρος) και υπερευτηκτοειδείς (0,8 έως 2% κατά βάρος) [1].

Οι δε κραματωμένοι, χωρίζονται με την σειρά τους -ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε στοιχεία κραμάτωσης ή προσθήκης- σε ελαφρώς (περιεκτικότητα <2%), μετρίως (περιεκτικότητα από 2 έως 10%) και ισχυρώς κραματωμένους (περιεκτικότητα >10%). Κραματοποιητικά στοιχεία των χαλύβων αποτελούν το νικέλιο (Ni), το μαγγάνιο (Mn), το χρώμιο (Cr), το πυρίτιο (Si) και το μολυβδαίνιο (Mo) τα οποία είναι κύριες προσθήκες, αλλά και το βολφράμιο (W), το βανάδιο (V), το αργίλιο (αλουμίνιο) (Al), το τιτάνιο (Ti), το κοβάλτιο (Co), ο μόλυβδος (Pb) και το νιόβιο (Nb) τα οποία είναι δευτερεύουσες προσθήκες. Με την επίδραση των κραματοποιητικών στοιχείων, προσδίδονται διαφορετικές ιδιότητες στους χάλυβες ανάλογα με την περιεκτικότητα στην οποία αυτά βρίσκονται στα κράματα. Μία κατηγορία κραματωμένων χαλύβων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ανοξείδωτοι χάλυβες [1].

1.2 Ως προς τον προορισμό τους

Ως προς τον προορισμό τους, διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες. Οι πρώτοι προκύπτουν από κατεργασίες όπως έλαση και διέλαση, ενώ οι δεύτεροι προκύπτουν από χύτευση [1].

1.3 Ως προς τις χρήσεις τους

Ως προς τις χρήσεις τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε χάλυβες κατασκευών, ανοξείδωτους χάλυβες, χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών και εργαλειοχάλυβες[1].

1.3.1 Χάλυβες Κατασκευών

Οι χάλυβες αυτοί έχουν μικρή περιεκτικότητα σε κραματοποιητικά στοιχεία, με τα συνηθέστερα να είναι το Cr και το Mn. Βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες κατασκευές όπως για παράδειγμα σε λέβητες, μεταλλικούς σκελετούς και διάφορα στοιχεία μηχανών [2].

1.3.2 Ανοξείδωτοι Χάλυβες

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες φέρουν ως κύριο κραματοποιητικό στοιχείο τους το Cr (>12% κ.β.), το οποίο είναι α-φερρογόνο στοιχείο. Η προσθήκη αυτή προσφέρει υψηλή αντοχή σε διάβρωση, καθότι το Cr προσδίδει επιφανειακή προστασία μέσω του σχηματισμού ενός στρώματος οξειδίου [1]. Διακρίνονται σε :

- **Ανοξείδωτους μαρτενσιτικούς χάλυβες.** Οι χάλυβες αυτής της κατηγορίας περιέχουν Cr σε ποσοστό μικρότερο του 17% και C σε ποσοστό έως 0,5%. Έχουν εφαρμογή σε αντλίες, σιδηρικά, όπλα, κοχλίες, ψαλίδια, ελατήρια, μαχαίρια, βαλβίδες και χειρουργικά εργαλεία.
- **Ανοξείδωτους φερριτικούς χάλυβες.** Η προσθήκη Mo σε ποσοστό 2%, επιτρέπει στους εν λόγω χάλυβες να χρησιμοποιούνται σε πολύ διαβρωτικά και όξινα περιβάλλοντα, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Ωστόσο, οι μηχανικές τους ιδιότητες εν γένει είναι υποδεέστερες των μαρτενσιτικών. Χρησιμοποιούνται σε πετροχημικές βιομηχανίες, βιομηχανίες τροφίμων, στην αρχιτεκτονική και είναι πυρίμαχοι. Χωρίζονται σε:
 - Χάλυβες που περιέχουν ~12% Cr και <0,008% C
 - Χάλυβες που περιέχουν 17% Cr και 0,1% C
 - Χάλυβες που περιέχουν 20-30% Cr
- **Ανοξείδωτους ωστενιτικούς χάλυβες.** Κύρια χαρακτηριστικά αυτών είναι η προσθήκη Ni, το οποίο αποτελεί γ-φερρογόνο στοιχείο, και η αδυναμία μαγνήτισής τους. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές των φερριτικών και έχουν εφαρμογή κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε βιομηχανίες χημικών και τροφίμων και στην αεροναυπηγική.
- **Ανοξείδωτους ωστενιτοφερριτικούς χάλυβες.** Αυτού του είδους οι χάλυβες προκύπτουν από την ελάττωση του ποσοστού Ni (6-9%) και την αύξηση του ποσοστού Cr (18-28%) παρουσιάζοντας πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Έχουν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από τους φερριτικούς και μεγαλύτερο όριο διαρροής από τους ωστενιτικούς και παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση λόγω κόπωσης. Έχουν εφαρμογή κυρίως σε συγκολλήσεις.
- **Ανοξείδωτους χάλυβες με σκλήρυνση λόγω κατακρήμνισης.** Παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ανοξείδωτους, με κύρια εφαρμογή τους την κατασκευή δομικών στοιχείων στα αεροσκάφη.

1.3.3 Χάλυβες Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών

Αυτού του είδους οι χάλυβες χωρίζονται σε [1], [2] :

- Μαλακούς μαγνήτες: έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και μικρές ενεργειακές απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων. Κύριες εφαρμογές βρίσκουν στους πυρήνες μετασχηματιστών. Περιέχουν Si σε ποσοστό 4-5%.
- Μόνιμους μαγνήτες: σε σχέση με τους μαλακούς μαγνήτες, παρουσιάζουν μεγάλο βρόχο υστέρησης και παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Περιέχουν C σε ποσοστό 0,8-1%, Cr σε ποσοστό 0,6-9%, W έως 6% και Co σε ποσοστό 3-15%.
- Μη μαγνητικούς χάλυβες

1.3.4 Εργαλειοχάλυβες

Εργαλειοχάλυβες ονομάζονται οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή/παραγωγή εργαλείων. Ανάλογα με τον οργανισμό τυποποίησής τους ή την εταιρεία παραγωγής τους κατηγοριοποιούνται με πολλούς τρόπους.

Σύμφωνα με την κατά AISI τυποποίησή τους, χωρίζονται σε 10 κατηγορίες [1],[3], [5]. Αυτές είναι οι:

- Εργαλειοχάλυβες οι οποίοι σκληραίνουν με βαφή σε νερό (**σειρά W**). Χρησιμοποιούνται σε εργαλεία χειρωνακτικών και ξυλουργικών εργασιών.
- Εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής σε αιφνιδιασμούς/κρούσεις (shock resistant) (**σειρά S**). Οι ποιότητες S1 - S7 διαφέρουν στην χημική σύσταση των κραματοποιητικών στοιχείων τους και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται αντοχή σε κρούσεις. Χρησιμοποιούνται σε ψαλίδια και έμβολα/σφύρες.
- Εργαλειοχάλυβες οι οποίοι σκληραίνουν με βαφή σε λάδι για εν ψυχρώ κατεργασία (**σειρά O**). Πρόκειται για ποιότητες ελαφρώς κραματομένες, οι οποίες βάζονται σε λάδι. Σε κομμάτια διαστάσεων πάνω από 50 mm, συνήθως απαντάται μικρότερη εσωτερική σκληρότητα. Χρησιμοποιούνται σε κοπτικά εργαλεία και καλούπια για εν ψυχρώ κατεργασίες.
- Εργαλειοχάλυβες μετρίως κραματομένοι, οι οποίοι σκληραίνουν με βαφή σε αέρα για εν ψυχρώ κατεργασία (**σειρά A**). Οι ποιότητες A2 - A10 καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από C και άλλα κραματοποιητικά στοιχεία, έχουν όλοι καλή εμβαπτότητα και μπορούν να σκληρυνθούν στον αέρα. Οι δύο χαμηλής περιεκτικότητας σε C ποιότητες A8 και A9 έχουν μικρότερη αντοχή σε φθορά, αλλά έχουν υψηλότερη δυσθραυστότητα σε σχέση με άλλους αυτής της σειράς. Η ποιότητα A7 με υψηλή περιεκτικότητα σε C και V, έχει πολύ υψηλή αντοχή σε φθορά, αλλά πολύ χαμηλότερη δυσθραυστότητα. Χρησιμοποιούνται σε μήτρες εξέλασης και μικρά ράουλα ελάστρων.
- Εργαλειοχάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε C και Cr για εν ψυχρώ κατεργασίες (**σειρά D**). Οι ποιότητες D2 - D7 έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε Cr και C και έχουν υψηλή αντοχή σε φθορά εκτριβής (abrasion). Οι εξ αυτών ποιότητες που περιέχουν Mo, μπορούν να σκληρυνθούν σε αέρα και έχουν υψηλή διαστασιακή σταθερότητα κατά τις θερμικές κατεργασίες. Χρησιμοποιούνται σε ράουλα ελάστρων, σφραγίδες και κάνες όπλων.
- Χάλυβες Cr, W ή Mo για εν θερμώ κατεργασία (**σειρά H**). Οι ποιότητες H10 - H19 έχουν ως κύριο κραματοποιητικό στοιχείο το Cr. Οι τέσσερις πρώτες ποιότητες οι οποίες περιέχουν και Mo, έχουν υψηλή δυσθραυστότητα και εμβαπτότητα, και είναι κατάλληλοι για εφαρμογές εν ψυχρώ όπου απαιτείται υψηλή δυσθραυστότητα μαζί με σχετικά υψηλή σκληρότητα. Οι ποιότητες H21- H26 έχουν ως κύριο κραματοποιητικό στοιχείο το W και έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά, αλλά έχουν χαμηλότερη δυσθραυστότητα σε σχέση με τις ποιότητες H10 - H19. Οι ποιότητες H41 - H43 είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε C τροποποιήσεις μολυβδαινιούχων ταχυχάλυβων και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις ποιότητες H21 - H26. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μήτρες διέλασης, καλούπια χύτευσης και μήτρες σφυρηλάτησης

- Βολφραμιούχοι ταχυχάλυβες (**σειρά T**). Περιέχουν υψηλά ποσοστά C, είναι υψηλά κραματωμένοι, έχουν καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε φθορά. Χρησιμοποιούνται σε εργαλεία διάφορων εργαλειομηχανών (τόρνους, φρέζες, τρυπάνια, αλεξούαρ)
- Μολυβδαινιούχοι ταχυχάλυβες (**σειρά M**). Η απόδοσή τους και οι χρήσεις τους είναι παρόμοιες με αυτές των βολφραμιούχων ταχυχάλυβων, με εξαίρεση την δυσθραυστότητα, η οποία είναι κατά τι υψηλότερη στην σειρά M. Χρησιμοποιούνται σε εργαλεία υψηλής ταχύτητας κοπής και άλλες εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μεγάλη αντοχή σε φθορά.
- Χυτοχάλυβες (**σειρά P**). Οι ποιότητες P2 - P6 είναι χάλυβες πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε C που πρέπει να ενανθρακώνονται μετά από μηχανουργική κατεργασία. Οι ποιότητες P20 και P21 συνήθως παραδίδονται χωρίς να έχει προηγηθεί σκλήρυνση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά από μηχανουργική κατεργασία. Χρησιμοποιούνται σε καλούπια έγχυσης πλαστικών.
- Ελαφρώς κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες ειδικών χρήσεων (**σειρά L**). Οι ποιότητες L2 - L6 είναι ελαφρώς κραματωμένοι χάλυβες με μεγάλες διακυμάνσεις στην περιεκτικότητά τους σε C. Οι χαμηλές σε C ποιότητες συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές (structural applications) όπου απαιτείται υψηλή δυσθραυστότητα, ενώ οι υψηλές σε C ποιότητες χρησιμοποιούνται σε χαμηλών επιδόσεων εργαλεία.
- Υψηλής περιεκτικότητας σε C εργαλειοχάλυβες ειδικών χρήσεων (**σειρά F**). Οι ποιότητες F1 και F2 έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε C με περιεκτικότητες W που διαφέρουν. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε σχετικά χαμηλών επιδόσεων υψηλής ακρίβειας κοπτικά εργαλεία.

Πίνακας 1.3.4.1: Κατηγοριοποίηση εργαλειοχάλυβων κατά AISI [1], [3], [5]

AISI	ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (% κ.β.)						Wr. Nr	Συγκέντρωση Προσθηκών (%)
	C	W	Mo	Cr	V	άλλα		
W	Ελαφρώς κραματωμένοι							0-0,70
W1	0,6-1,4	-	-	-	-	-	1.1525,1.1545,1.1625, 1.1654,1.1663,1.1673, 1.1744,1.1750,1.1820, 1.1830	0
W2	0,14-0,6	-	-	-	0,25	-	1.1645, 1.2206, 1.283	0,25
W3	1,00	-	-	-	0,50	-		0,50
W4	0,60-1,40	-	-	0,25	-	-		0,25
W5	1,10	-	-	0,50	-	-	1.2002,1.2004,1.2056	0,50
W6	1,00	-	-	0,25	0,25	-		0,50
W7	1,00	-	-	0,50	0,20	-		0,70
S	Ελαφρώς- Μετρίως κραματωμένοι							1,5-5,55
S1	0,50	2,50	-	1,50	-	-	1.2542, 1.2550	4,00
S2	0,50	-	0,50	-	-	1,00 Si	1.2103	1,50
S3	0,50	1,00	-	0,74	-	-		1,74
S4	0,55	-	-	-	-	2,00Si 0,80Mn		2,80

S5	0,55	-	0,40	-	-	0,8Mn 2,00Si	1.2823	3,20
S6	0,45	-	0,40	1,50	-	2,25Si 1,40Mn	-	5,55
S7	0,50	-	1,40	3,25	-	-	-	4,65
O	Ελαφρώς κραματωμένοι							1,50-2,05
O1	0,90	0,50	-	0,50	-	1,00Mn	1.2510	2,00
O2	0,90	-	-	-	-	1,60Mn	1.2842	1,60
O6	1,45	-	0,25	-	-	0,8Mn 1,00Si	1.2206	2,05
O7	1,20	-	-	0,75	0,75	-	1.2414, 1.2419, 1.2442, 1.2516, 1.2519	1,50
A	Μετρίως - Υψηλά κραματωμένοι							3,25-12,00
A2	1,00	-	1,00	5,00	-	-	1.2363	6,00
A3	1,25	-	1,00	5,00	1,00	-	-	7,00
A4	1,00	-	1,00	1,00	-	2,00Mn	-	4,00
A5	1,00	-	1,00	1,00	-	3,00Mn	-	5,00
A6	0,70	-	1,25	1,00	-	2,00Mn	-	3,25
A7	2,25	1,00	1,00	5,25	4,75	-	-	12,00
A8	0,55	1,25	1,25	5,00	-	-	1.2606	7,50
A9	0,50	-	1,40	5,00	1,00	1,50Ni	-	8,90
A10	1,35	-	1,50	-	-	1,80Mn 1,25Si 1,80Ni	-	6,35
D	Ισχυρώς κραματωμένοι							13,00-17,00
D1	1,00	-	1,00	12,00	-	-	-	13,00
D2	1,50	-	1,00	12,00	1,00	-	1.2201, 1.2379, 1.2601	14,00
D3	2,25	-	1,00	12,00	-	-	1.2080, 1.2436, 1.2884	13,00
D4	2,25	-	1,00	12,00	-	-	1.2436, 1.2884	13,00
D5	1,50	-	1,00	12,00	-	3,00Co	1.2880	16,00
D6	Έχει αντικατασταθεί από τον D3							
D7	2,35	-	1,00	12,00	4,00	-	1.2378	17,00
H	Μετρίως - Ισχυρώς κραματωμένοι							6,15-23,00
H10	0,40	2,50	3,25	0,40	-	-	1.2365, 1.2367	6,15
H11	0,35	-	1,50	5,00	0,40	-	1.2343, 1.7783, 1.7784	6,90
H12	0,35	1,50	1,50	5,00	0,40	-	1.2606	8,40
H13	0,35	-	1,50	5,00	1,00	-	1.2344	7,50
H14	0,40	5,00	-	5,00	-	-	1.2567	10,00
H15	0,40	-	5,00	5,00	-	-	-	10,00
H16	0,55	7,00	-	7,00	-	-	-	14,00
H19	0,40	4,25	-	4,25	2,00	4,25Co	1.2678	14,75
H20	0,35	9,00	-	2,00	-	-	-	11,00
H21	0,35	9,00	-	3,50	-	-	1.2581	12,50
H22	0,35	11,00	-	2,00	-	-	1.2581	13,00
H23	0,35	12,00	-	12,00	-	-	1.2625	24,00
H24	0,45	15,00	-	3,00	-	-	-	18,00
H25	0,25	15,00	-	4,00	-	-	-	19,00
H26	0,50	18,00	-	4,00	1,00	-	-	23,00
H41	0,65	1,50	8,00	4,00	1,00	-	-	14,50

H42	0,60	-	8,00	4,00	2,00	-	-	14,00
H43	0,55	-	8,00	4,00	2,00	-	-	14,00
T	Ισχυρώς κραματομένοι							23,00-32,00
T1	0,75	18,00	-	4,00	1,00	-	1.3355, 1.3558	23,00
T2	0,80	18,00	-	4,00	2,00	-	-	24,00
T3	1,05	18,00	-	4,00	3,00	-	-	25,00
T4	0,75	18,00	-	4,00	1,00	5,00Co	1.3255	28,00
T5	0,80	18,00	-	4,00	2,00	8,00Co	1.3265	32,00
T6	0,80	20,00	-	4,50	1,50	12,00Co	1.3257	38,00
T7	0,75	14,00	-	4,00	2,00	-	-	20,00
T8	0,75	14,00	-	4,00	2,00	5,00Co	-	25,00
T9	1,20	18,00	-	4,00	4,00	-	-	26,00
T15	1,50	12,00	-	4,00	5,00	5,00Co	1.3202	26,00
M	Ισχυρώς κραματομένοι							15,00-29,75
M1	0,85	1,50	8,50	4,00	1,00	-	1.3346	15,00
M2	0,85-1,0	6,00	5,00	4,00	2,00	-	1.3341, 1.3343, 1.3345, 1.3553, 1.3554, 1.3340, 1.3342	17,00
M3 (1)	1,05	6,00	5,00	4,00	2,40	-	-	17,40
M3 (2)	1,20	6,00	5,00	4,00	3,00	-	1.3344	18,00
M4	1,30	5,50	4,50	4,00	4,00	-	-	18,00
M6	0,80	4,50	5,00	4,00	1,50	12,00Co	-	27,00
M7	1,00	1,75	8,75	4,00	2,00	-	1.3348	16,50
M8	0,80	5,00	5,00	4,00	1,50	1,25Nb	-	16,75
M10	0,85-1,00	-	8,00	4,00	2,00	-	-	14,00
M15	1,50	6,50	3,50	4,00	5,00	5,00Co	-	24,00
M30	0,80	2,00	8,00	4,00	1,25	5,00Co	1.3249	16,25
M33	0,90	1,50	9,50	4,00	1,15	8,00Co	1.3249	24,15
M34	0,90	2,00	8,00	4,00	2,00	8,00Co	1.3249	24,00
M35							1.3243	
M36	0,80	6,00	5,00	4,00	2,00	8,00Co	1.3243	25,00
M41	1,10	6,75	3,75	4,25	2,00	5,00Co	1.3245, 1.3246	21,75
M42	1,10	1,50	9,50	3,75	1,15	8,00Co	1.3247	23,90
M43	1,20	2,75	8,00	3,75	1,60	8,25Co	-	24,35
M44	1,15	5,25	6,25	4,25	2,00	12,00Co	1.3207	29,75
M45	1,25	8,00	5,00	4,25	1,60	5,50Co	-	24,35
M46	1,25	2,00	8,25	4,00	3,20	8,25Co	1.3247	25,70
M47	1,10	1,50	9,50	3,75	1,25	5,00Co	1.3247	21,00
M50							1.2369, 1.3551	
M52							-	
P	Ελαφρώς - Μετρίως κραματομένοι							0,00-5,75
P1	0,10	-	-	-	-	-	-	0
P2	0,07	-	0,20	2,00	-	0,50Ni	-	2,70
P3	0,10	0,20	-	0,60	-	1,25Ni	1.5713	2,05
P4	0,07	-	0,75	5,00	-	-	1.2341	5,75
P5	0,10	-	-	2,25	-	-	-	2,25
P6	0,10	-	-	1,50	-	-	1.2735, 1.2745	1,50
P20	0,35	-	0,40	1,70	-	-	1.2311, 1.2328, 1.2330	2,10



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

P21	0,20	-	-	-	-	1,20Mn +4,00Ni	-	5,20
L	Ελαφρώς - Μετρίως κραματομένοι							1,20-2,50
L1	1,00	-	-	1,25	-	-	-	1,25
L2	0,50-1,10	-	-	1,00	0,20	-	1.2235, 1.2241, 1.2242, 1.2243	1,20
L3	1,00	-	-	1,50	0,20	-	-	1,70
L4	1,00	-	-	1,50	0,25	0,60Mn	-	2,35
L5	1,00	-	0,25	1,00	-	1,00Mn	-	2,25
L6	0,70	-	0,25	0,75	-	1,50Ni	1.2713, 1.2714	2,50
L7	1,00	-	0,40	1,40	-	0,35Mn	-	2,15
F	Ελαφρώς - Μετρίως κραματομένοι							1,25-4,25
F1	1,00	1,25	-	-	-	-	-	1,25
F2	1,25	3,50	-	-	-	-	-	3,50
F3	1,25	3,50	-	0,75	-	-	-	4,25

Πίνακας 1.3.4.2 [3]

Table 2-2 AISI classification and nominal compositions of major tool steels

AISI	UNS No.	Identifying elements, %								
		C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
Water-hardening tool steels										
W1	T72301	0.60–1.40(a)	...	...	...	...	...	...	...	...
W2	T72302	0.60–1.40(a)	...	...	...	0.25	...	...	...	...
W5	T72305	1.10	...	...	0.50	...	...	...	...	...
Shock-resisting tool steels										
S1	T41901	0.50	...	...	1.50	...	2.50	...	...	...
S2	T41902	0.50	...	1.00	...	...	...	0.50	...	...
S5	T41905	0.55	0.80	2.00	...	...	...	0.40	...	...
S6	T41906	0.45	1.40	2.25	1.50	...	...	0.40	...	...
S7	T41907	0.50	...	...	3.25	...	...	1.40	...	...
Oil-hardening cold-work tool steels										
O1	T31501	0.90	1.00	...	0.50	...	0.50	...	...	...
O2	T31502	0.90	1.60	...	...	...	...	...	...	...
O6(b)	T31506	1.45	0.80	1.00	...	...	...	0.25	...	...
O7	T31507	1.20	...	...	0.75	...	1.75	...	...	...
Air-hardening, medium-alloy cold-work tool steels										
A2	T30102	1.00	...	...	5.00	...	...	1.00	...	...
A3	T30103	1.25	...	...	5.00	1.00	...	1.00	...	...
A4	T30104	1.00	2.00	...	1.00	...	...	1.00	...	...
A6	T30106	0.70	2.00	...	1.00	...	...	1.25	...	...
A7	T30107	2.25	...	...	5.25	4.75	1.00(c)	1.00	...	...
A8	T30108	0.55	...	...	5.00	...	1.25	1.25	...	...
A9	T30109	0.50	...	...	5.00	1.00	...	1.40	...	1.50
A10(b)	T30110	1.35	1.80	1.25	...	...	...	1.50	...	1.80
High-carbon, high-chromium cold-work tool steels										
D2	T30402	1.50	...	...	12.00	1.00	...	1.00	...	...
D3	T30403	2.25	...	...	12.00	...	...	...	...	...
D4	T30404	2.25	...	...	12.00	...	...	1.00	...	...
D5	T30405	1.50	...	...	12.00	...	...	1.00	3.00	...
D7	T30407	2.35	...	...	12.00	4.00	...	1.00	...	...
Low-alloy special-purpose tool steels										
L2	T61202	0.50–1.10(a)	...	...	1.00	0.20	...	...	...	...
L6	T61206	0.70	...	...	0.75	...	...	0.25(c)	...	1.50
Mold steels										
P2	T51602	0.07	...	...	2.00	...	...	0.20	...	0.50
P3	T51603	0.10	...	...	0.60	...	...	...	...	1.25
P4	T51604	0.07	...	...	5.00	...	...	0.75	...	...
P5	T51605	0.10	...	...	2.25	...	...	...	...	...
P6	T51606	0.10	...	...	1.50	...	...	...	...	3.50
P20	T51620	0.35	...	...	1.70	...	...	0.40	...	...
P21	T51621	0.20	1.20 (A1)	...	...	...	...	...	...	4.00
Chromium hot-work tool steels										
H10	T20810	0.40	...	...	3.25	0.40	...	2.50	...	...
H11	T20811	0.35	...	...	5.00	0.40	...	1.50	...	...
H12	T20812	0.35	...	...	5.00	0.40	1.50	1.50	...	...
H13	T20813	0.35	...	...	5.00	1.00	...	1.50	...	...
H14	T20814	0.40	...	...	5.00	...	5.00	...	...	...
H19	T20819	0.40	...	...	4.25	2.00	4.25	...	4.25	...
Tungsten hot-work tool steels										
H21	T20821	0.35	...	...	3.50	...	9.00	...	...	...
H22	T20822	0.35	...	...	2.00	...	11.00	...	...	...
H23	T20823	0.30	...	...	12.00	...	12.00	...	...	...
H24	T20824	0.45	...	...	3.00	...	15.00	...	...	...

(continued)

(a) Available with different carbon contents. (b) Contains graphite. (c) Optional. Source: Ref 2

Πίνακας 1.3.4.3 [3]

Table 2-2 AISI classification and nominal compositions of major tool steels

AISI	UNS No.	Identifying elements, %								
		C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
Tungsten hot-work tool steels (continued)										
H25	T20825	0.25	...	...	4.00	...	15.00	...	...	...
H26	T20826	0.50	...	...	4.00	1.00	18.00	...	...	...
Molybdenum hot-work tool steels										
H42	T20842	0.60	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	...	...
Tungsten high-speed tool steels										
T1	T12001	0.75(a)	...	...	4.00	1.00	18.00	...	...	...
T2	T12002	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	...	...
T4	T12004	0.75	...	...	4.00	1.00	18.00	...	5.00	...
T5	T12005	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	8.00	...
T6	T12006	0.80	...	...	4.50	1.50	20.00	...	12.00	...
T8	T12008	0.75	...	...	4.00	2.00	14.00	...	5.00	...
T15	T12015	1.50	...	...	4.00	5.00	12.00	...	5.00	...
Molybdenum high-speed tool steels										
M1	T11301	0.80(a)	...	...	4.00	1.00	1.50	8.00	...	...
M2	T11302	0.85–1.00(a)	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	...	...
M3, class 1	T11313	1.05	...	...	4.00	2.40	6.00	5.00	...	...
M3, class 2	T11323	1.20	...	...	4.00	3.00	6.00	5.00	...	...
M4	T11304	1.30	...	...	4.00	4.00	5.50	4.50	...	...
M6	T11306	0.80	...	...	4.00	2.00	4.00	5.00	12.00	...
M7	T11307	1.00	...	...	4.00	2.00	1.75	8.75	...	...
M10	T11310	0.85–1.00(a)	...	...	4.00	2.00	...	8.00	...	...
M30	T11330	0.80	...	...	4.00	1.25	2.00	8.00	5.00	...
M33	T11333	0.90	...	...	4.00	1.15	1.50	9.50	8.00	...
M34	T11334	0.90	...	...	4.00	2.00	2.00	8.00	8.00	...
M36	T11336	0.80	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	8.00	...
Ultrahard high-speed tool steels										
M41	T11341	1.10	...	...	4.25	2.00	6.75	3.75	5.00	...
M42	T11342	1.10	...	...	3.75	1.15	1.50	9.50	8.00	...
M43	T11343	1.20	...	...	3.75	1.60	2.75	8.00	8.25	...
M44	T11344	1.15	...	...	4.25	2.00	5.25	6.25	12.00	...
M46	T11346	1.25	...	...	4.00	3.20	2.00	8.25	8.25	...
M47	T11347	1.10	...	...	3.75	1.25	1.50	9.50	5.00	...

(a) Available with different carbon contents. (b) Contains graphite. (c) Optional. Source: Ref 2

Πίνακας 1.3.4.4 [3]

Table 2-3 Cross-references of AISI tool steels designations to designations in other national systems

United States (AISI)	West Germany (DIN)(a)	Japan (JIS)(b)	Great Britain (B.S.)(c)	France (AFNOR)(d)	Sweden (SIS14)
Molybdenum high-speed steels (ASTM A 600)					
M1	1.3346	...	4659 BM1	A35-590 4441 Z85DCV08-04-02-01	2715
M2, reg C	1.3341, 1.3343, 1.3345, 1.3553, 1.3554	G4403 SKH51 (SKH9)	4659 BM2	A35-590 4301 Z85WDCV06-05-04-02	2722
M2, high C	1.3340, 1.3342	...	...	A35-590 4302 Z90WDCV06-05-04-02	...
M3, class 1	...	G4403 SKH52	...	...	...
M3, class 2	1.3344	G4403 SKH53	...	A35-590 4360 Z120 WDCV06-05-04-03	(USA M3 class 2)
M4	...	G4403 SKH54	4659 BM4	A35-590 4361 Z130 WDCV06-05-04-04	...
M7	1.3348	G4403 SKH58	...	A35-590 4442 Z100DCV09-04-02-02	2782
M10, reg C	...	...	...	...	...
M10, high C	...	...	...	...	...
M30	1.3249	...	4659 BM34	...	...
M33	1.3249	...	4659 BM34	...	...
M34	1.3249	...	4659 BM34	...	...
M35	1.3243	G4403 SKH55	...	A35-590 4371 Z85WDCV06-05-05-04-02	...
M36	1.3243	G4403 SKH55, G4403 SKH56	...	A35-590 4372 Z90WDCV06-05-05-04-02	...
M41	1.3245, 1.3246	G4403 SKH55	...	A35-590 4371 Z85WDCV06-05-05-04-04	2723
M42	1.3247	G4403 SKH59	4659 BM42	A35-590 4374 Z110WDCV07-05-04-04	2736
M43	...	...	...	A35-590 4475 Z110DKCV09-08-04-02	...
M44	1.3207	G4403 SKH57	4659 (USA M44)	A35-590 4475 Z110DKCV09-08-04-02-01	...
M46	1.3247	...	...	A35-590 4376 Z130KDCV12-07-06-04-03	...
M47	1.3247	...	...	...	...
Intermediate high-speed steels					
M50	1.2369, 1.3551	...	...	A35-590 3551 Y80DCV42.16	(USA M50)
M52	...	...	...	...	...
Tungsten high-speed steels (ASTM A 600)					
T1	1.3355, 1.3558	G4403 SKH2	4659 BT1	A35-590 4201 Z80WCV18-04-01	...
T2	...	...	4659 BT2, 4659 BT20	4203 18-0-2	...
T4	1.3255	G4403 SKH3	4659 BT4	A35-590 4271 Z80WCV18-05-04-01	...
T5	1.3265	G4403 SKH4	4659 BT5	A35-590 4275 Z80WCV18-10-04-02	(USA T5)
T6	1.3257	G4403 SKH4B	4659 BT6	...	...
T8	...	...	...	...	...
T15	1.3202	G4403 SKH10	4659 BT15	A35-590 4171 Z160WVC12-05-05-04	(USA T15)
Chromium hot-work steels (ASTM A 681)					
H10	1.2365, 1.2367	G4404 SKD7	4659 BH10	A35-590 3451 Z32DCV28	...
H11	1.2343, 1.7783, 1.7784	G4404 SKD6	4659 BH11	A35-590 3431 FZ38CDV5	...

(continued)

(a) Deutsche Industrie Normen (German Industrial Standards). (b) Japanese Industrial Standard. (c) British Standard. (d) l'Association Française de Normalisation (French Standards Association). Source: Ref 3, 4

Table 2-3 (continued)

United States (AISI)	West Germany (DIN)(a)	Japan (JIS)(b)	Great Britain (B.S.)(c)	France (AFNOR)(d)	Sweden (SIS14)
Chromium hot-work steels (ASTM A 681) (continued)					
H12	1.2606	G4404 SKD62	4659 BH12	A35-590 3432 Z35CWDV5	...
H13	1.2344	G4404 SKD61	4659 BH13, 4659 H13	A35-590 3433 Z40CDV5	2242
H14	1.2567	G4404 SKD4	...	3541 Z40WCV5	...
H19	1.2678	G4404 SKD8	4659 BH19	...	...
Tungsten hot-work steels (ASTM A 681)					
H21	1.2581	G4404 SKD5	4659 BH21, 4659 H21A	A35-590 3543 Z30WCV9	2730
H22	1.2581	G4404 SKD5	...	...	...
H23	1.2625	...	...	...	...
H24	...	...	...	...	...
H25	...	...	...	...	...
H26	...	...	4659 BH26	...	...
Molybdenum hot-work steels (ASTM A 681)					
H42	...	...	...	3548 Z65WDCV6.05	...
Air-hardening, medium-alloy cold-work steels (ASTM A 681)					
A2	1.2363	G4404 SKD12	4659 BA2	A35-590 2231 Z100CDV5	2260
A3	...	...	...	...	...
A4	...	...	...	...	...
A5	...	...	...	...	...
A6	...	...	4659 BA6	...	...
A7	...	...	...	...	...
A8	1.2606	G4404 SKD62	...	3432 Z38CDV5	...
A9	...	...	...	...	...
A10	...	...	...	...	...
High-carbon, high-chromium cold-work steels (ASTM A 681)					
D2	1.2201, 1.2379, 1.2601	G4404 SKD11	4659 (USA D2), 4659 BD2	A35-590 2235 Z160CDV12	2310
D3	1.2080, 1.2436, 1.2884	G4404 SKD1, G4404 SKD2	4659 BD2A	...	...
D4	1.2436, 1.2884	G4404 SKD2	4659 BD3	A35-590 2233 Z200C12	...
D5	1.2880	...	4659 (USA D4)	A35-590 2234 Z200CD12	2312
D7	1.2378	...	...	A35-590 2236 Z160CKDV12.03	...
Oil-hardening cold-work steels (ASTM A 681)					
O1	1.2510	G4404 SKS21, G4404 SKS3, G4404 SKS93 G4404 SKS94, G4404 SKS95	4659 BO1	A35-590 2212 90 MWCV5	2140

(continued)

(a) Deutsche Industrie Normen (German Industrial Standards). (b) Japanese Industrial Standard. (c) British Standard. (d) l'Association Française de Normalisation (French Standards Association). Source: Ref 3, 4

Table 2-3 (continued)

United States (AISI)	West Germany (DIN)(a)	Japan (JIS)(b)	Great Britain (B.S.)(c)	France (AFNOR)(d)	Sweden (SIS)(4)
Oil-hardening cold-work steels (ASTM A 681) (continued)					
O2	1.2842	...	4659 (USA O2) 4659 BO2	A35-590 2211 90MV8	...
O6	1.2206	...	...	A35-590 2132 130C3	...
O7	1.2414, 1.2419, 1.2442, 1.2516, 1.2519	G4404 SKS2	...	A35-590 2141 105WC13	...
Shock-resisting steels (ASTM A 681)					
S1	1.2542, 1.2550	G4404 SKS41	4659 BS1	A35-590 2341 55WC20	2710
S2	1.2103	...	4659 BS2	A35-590 2324 Y45SCD6	...
S5	1.2823	...	4659 BS5	...	...
S6	...	...	...	...	...
S7	...	...	...	...	...
Low-alloy special-purpose steels (ASTM A 681)					
L2	1.2235, 1.2241, 1.2242, 1.2243, 1.2713, 1.2714	G4404 SKT3, G4410 SKC11 G4404 SKS51, G4404 SKT4	...	A35-590 3335 55CNDV4 A35-590 3381 55NCDV7	...
Low-carbon mold steels (ASTM A 681)					
P2	...	...	...	...	...
P3	1.5713	...	...	2881 Y10NC6	...
P4	1.2341	...	...	...	(USA P4)
P5	...	...	...	...	...
P6	1.2735, 1.2745	G4410 SKC31	...	2882 10NC12	...
P20	1.2311, 1.2328, 1.2330	...	4659 (USA P20)	A35-590 2333 35CMD7	(USA P20)
P21	...	...	...	...	...
Water-hardening steels (ASTM A 686)					
W1	1.1525, 1.1545, 1.1625, 1.1654, 1.1663, 1.1673, 1.1744, 1.1750, 1.1820, 1.1830	G4401 SK1, G4401 SK2, G4401 SK3 G4401 SK4, G4401 SK5, G4401 SK6 G4401 SK7, G4401 SK7, G4410 SKC3	4659 (USA W1), 4659 BW1A 4659 BW1B 4659 B, W1C	A35-590 1102 Y(1) 105, A35-590 1103 Y(1) 90 A35-590 1104 Y(1) 80, A35-590 1105 Y(1) 70 A35-590 1200 Y(2) 140, A35-590 1201 Y(2) 120 A35-596 Y75, A35-596 Y90	...
W2	1.1645, 1.2206, 1.283	G4404 SKS43 G4404 SKS44	4659 BW2	A35-590 1161 Y120V, A35-590 1162 Y105V A35-590 1163 Y90V, A35-590 1164 Y75V A35-590 1230 Y(2) 140C, A35-590 2130 Y100C2 A35-590 1232 Y105C	(USA W2A) (USA W2B) (USA W2C)
W5	1.2002, 1.2004, 1.2056	...	...	...	...

(a) Deutsche Industrie Normen (German Industrial Standards). (b) Japanese Industrial Standard. (c) British Standard. (d) Association Française de Normalisation (French Standards Association). Source: Ref 3, 4

Κατά την εταιρεία Uddeholm [4], η κατηγοριοποίηση των εργαλειοχαλύβων γίνεται σε:

- Εργαλειοχάλυβες για χρήση σε κατεργασίες εν θερμώ, δηλαδή σε θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 200 °C. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι η δυσθραυστότητα.
- Εργαλειοχάλυβες για χρήση σε κατεργασίες εν ψυχρώ, δηλαδή σε θερμοκρασίες λειτουργίας κάτω των 200°C, αλλά κατ'εξάιρεση και σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Εργαλειοχάλυβες για χρήση σε καλούπια πλαστικών, σε θερμοκρασίες λειτουργίας από 100-350°C.
- Εργαλειοχάλυβες ειδικών εφαρμογών, οι οποίοι είναι υψηλής καθαρότητας και στενών ανοχών στις προδιαγραφές τους. Έχουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις εξαρτημάτων και εργαλείων με πολύ εξεζητημένες απαιτήσεις.
- Εργαλειοχάλυβες κονιομεταλλουργίας. Διαφέρουν από τους υπόλοιπους κυρίως στον τρόπο παραγωγής τους, καθώς προκύπτουν από σκόνη πάχους μερικών μμ εξαιρετικά καθαρή η οποία συμπιέζεται από όλες τις πλευρές σε μεγάλες θερμοκρασίες, αλλά και στις μηχανικές, θερμικές και φυσικές τους ιδιότητες, οι οποίες παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιομορφία σε όλο το μήκος του εξαρτήματος/εργαλείου σε αντίθεση με αυτές των συμβατικών χαλύβων που παρουσιάζουν διακυμάνσεις.

Οι χάλυβες οι οποίοι θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία είναι οι Uddeholm Calmax, Unimax, Nimax, Chipper-Viking, Sverker 3(AISI D3) και Orvar Supreme (AISI H13) Uddeholm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

Η μικροδομή ενός συνήθους εργαλειοχάλυβα λόγω της χημικής του σύστασης, μετά την υποβολή του σε θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, θα αποτελείται από μαρτενσίτη, πιθανώς ένα μικρό ποσοστό παραμένοντος ωστενίτη, πρωτογενή και ευτηκτικά καρβίδια. Σε λίγες περιπτώσεις, μπορεί να υπάρχει και ποσοστό μπαινίτη. Οι εργαλειοχάλυβες επειδή ποτέ δεν χρησιμοποιούνται έχοντας αυτήν την μικροδομή - η οποία συνεπάγεται υψηλή σκληρότητα μεν, αλλά χαμηλή δυσθραυστότητα δε, καθώς ο μαρτενσίτης είναι άκρως ψαθυρός - υποβάλλονται πάντα σε επαναφορά. Η μικροδομή που προκύπτει τελικώς, αποτελείται από μήτρες επαναφερμένου μαρτενσίτη (και σε λίγες περιπτώσεις μπαινίτη) στις οποίες περιέχεται διάσπαρτος Fe και κατακρημνισμένα καρβίδια, τα οποία ονομάζονται δευτερογενή. Αυτά τα καρβίδια σχηματίζονται από άτομα C τα οποία εξέρχονται από το υπέρκορο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη ή του μπαινίτη - ο οποίος με την εφαρμογή θερμοκρασίας είναι επιρρεπής σε μετασχηματισμό του σε άλλες φάσεις καθώς είναι μετασταθής - και σχηματίζουν ενώσεις με άλλα στοιχεία που υπάρχουν στο κράμα (π.χ. Cr, V, W) [3], [6].

Όσο περισσότεροι C και ισχυρά καρβιδιογόνα κραματοποιητικά στοιχεία υπάρχουν στο στερεό διάλυμα, τα οποία βρίσκονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη προερχόμενα από αυτό του ωστενίτη, τόσο μεγαλύτερη δυνατότητα υπάρχει να σχηματιστούν δευτερογενή καρβίδια κατά την επαναφορά και κατά συνέπεια να επιτευχθούν μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας και μεγαλύτερη αντίσταση στην φθορά[3],[6].

Η σημασία της ύπαρξης των καρβιδίων είναι μεγάλη, καθώς σε αυτά οφείλονται οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων όπως η σκληρότητα, η αντοχή σε φθορά εκτριβής και φθορά πρόσφυσης.

Τα αδιάλυτα πρωτογενή καρβίδια είναι απαραίτητα για την αντίσταση ενός εργαλειοχάλυβα στην φθορά εκτριβής. Η αντίσταση στην φθορά εκτριβής εξαρτάται από το ποσοστό ύπαρξης καρβιδίων, από το μέγεθός τους και από την κατανομή τους στην μικροδομή [6].

Οι επιφάνειες επαφής των χαλύβδινων εξαρτημάτων συνήθως υποβάλλονται σε τριβή με κάποιο υλικό που περιέχει κεραμικά σωματίδια. Τα κεραμικά σωματίδια έχουν τη δυνατότητα κατά την τριβή να αφαιρούν υλικό από τις επιφάνειες επαφής καθώς έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από αυτήν της δομής του επαναφερμένου μαρτενσίτη (ο οποίος επί της ουσίας αποτελείται από καρβίδια μέσα σε φερριτική μήτρα), αλλά έχουν και την δυνατότητα να διεισδύουν στις επιφάνειες επαφής και να αφαιρούν και με αυτόν τον τρόπο υλικό. Αποτέλεσμα της αφαίρεσης υλικού είναι η μείωση της διάρκειας ζωής του εργαλείου. Η παρουσία των καρβιδίων αυξάνει την σκληρότητα του υλικού και αποτρέπει την διείσδυση σκληρότερων από τον επαναφερμένο μαρτενσίτη ξένων σωματιδίων στο υλικό ως αποτέλεσμα της υψηλής τους σκληρότητας και του παραπλησίου μεγέθους με αυτά τα σωματίδια [6].

Η φθορά εκτριβής εξαρτάται από την παρουσία των σκληρότερων από τα καρβίδια, τα οποία έχουν μεγάλο μέγεθος, βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες και έχουν υψηλή σκληρότητα [6].

Εκτός της φθοράς εκτριβής, οι επιφάνειες επαφής των χαλύβδινων εργαλείων υφίστανται και φθορά πρόσφυσης. Ο ρόλος των καρβιδίων εδώ λόγω της μη μεταλλικής φύσης τους είναι να

μειώσουν το ποσοστό την επιφάνεια που υφίσταται δεσμούς μετάλλου - μετάλλου κατά την επαφή με τη δεύτερη επιφάνεια, οι οποίοι δημιουργούν τη φθορά πρόσφυσης. Η ομοιογένεια στην κατανομή τους αυξάνει περισσότερο την αντίσταση στη φθορά πρόσφυσης [6].

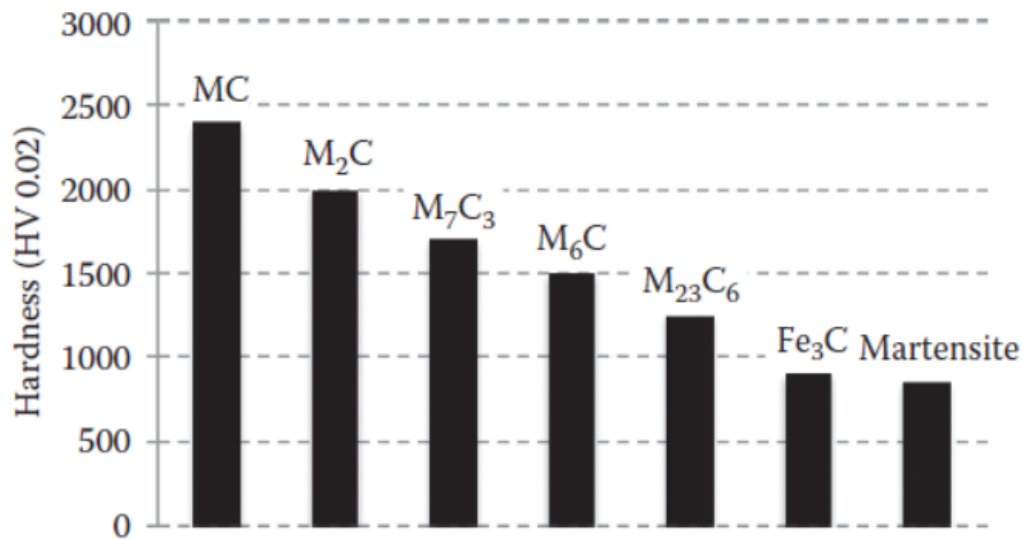
Η φθορά πρόσφυσης εξαρτάται μεν από την ποσότητα των σκληροτέρων από τα καρβίδια, αλλά χρειάζονται και μικρά, καλά κατανεμημένα καρβίδια δε [6].

Όσον αφορά την δυσθραυστότητα, τα καρβίδια, όπως και όλες οι άλλες μη μεταλλικές ενώσεις έχουν τον ρόλο των σημείων έναρξης ρωγμών και εν συνεχεία μειώνουν την δυσθραυστότητα. Επομένως, για να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο πρέπει τα καρβίδια να έχουν καλή ομοιογένεια και να είναι λεπτά [6].

2.1 Τύποι Καρβιδίων

Όπως προαναφέρθηκε, οι τύποι των καρβιδίων που σχηματίζονται στην μικροδομή των εργαλειοχαλύβων είναι τα πρωτογενή καρβίδια, τα ευτηκτικά καρβίδια και τα δευτερογενή καρβίδια. Τα μεν δύο πρώτα προκύπτουν κατά την στερεοποίηση του διαλύματος κατά την κατασκευή του είτε απευθείας από την υγρή φάση είτε από τις μήτρες του ωστενίτη κατά τον ευτηκτικό μετασχηματισμό, τα δε τρίτα προκύπτουν κατά την επαναφορά με κατακρήμνιση από τις μήτρες του μαρτενσίτη. Το μέγεθος, το σχήμα, οι ιδιότητες και η κατανομή τους διαφέρουν σε κάθε εργαλειοχάλυβα και καθένα από αυτά χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει άλλες ανάγκες [6].

Τα καρβίδια στην πράξη είναι της μορφής $M_x C_y$, όπου M είναι ένα μείγμα Fe και κραματοποιητικών στοιχείων (πχ. Cr) και όχι κάποιο καθαρό καρβίδιο. Ωστόσο καθένα από αυτά είναι πλούσιο σε ένα συγκεκριμένο κραματοποιητικό στοιχείο και η κρυσταλλική του δομή αναφέρεται σε αυτήν του καθαρού καρβιδίου. Το καρβίδιο MC είναι πλούσιο σε Nb ή V , το M_2C και το M_6C σε W ή Mo , το $M_{23}C_6$ και το M_7C_3 σε Cr και το M_3C (Fe_3C) σε Fe [6]. Στην εικόνα 2.1.1 φαίνονται κάποιες τυπικές τιμές σκληρότητας των και συγκρίνεται με την σκληρότητα του μαρτενσίτη.



Εικόνα 2.1.1: Τυπικές τιμές σκληρότητας αδιάλυτων καρβιδίων σε σχέση με τον μαρτενσίτη[6]

2.1.1 Πρωτογενή καρβίδια

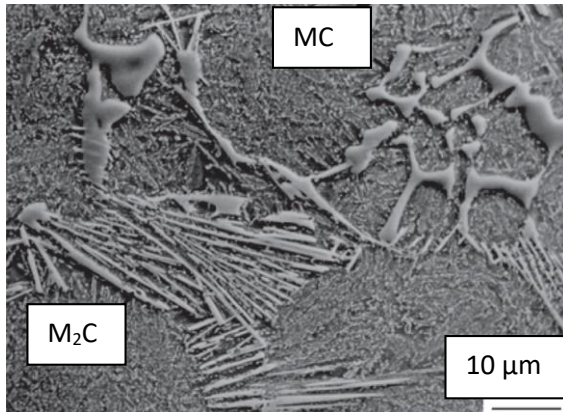
Κατά την στερεοποίηση των εργαλειοχαλύβων, με την αρχή του σχηματισμού της πρώτης φάσης του Fe α (φερρίτης), εξέρχεται από αυτόν η περίσσεια ατόμων C και κραματοποιητικών στοιχείων και διασπείρονται στην υγρή φάση του διαλύματος. Κάτω από την θερμοκρασία 1280 °C, ξεκινάει ο σχηματισμός των καρβιδίων. Κάποια από αυτά σχηματίζονται απευθείας από το υγρό και ονομάζονται **πρωτογενή καρβίδια**, και προέρχονται συνήθως από τα πιο ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία, το V και το Nb. Το σχήμα τους έχει συνήθως αιχμηρές επιφάνειες ή είναι κυβοειδούς τύπου. Δεν αποτελούν την πλειοψηφία των καρβιδίων στο κράμα [6].

2.1.2 Ευτηκτικά καρβίδια

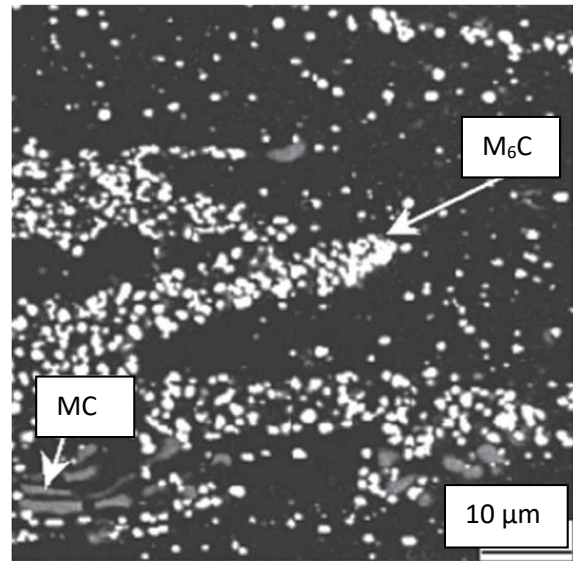
Επίσης κατά την διαδικασία της στερεοποίησης, μόλις η θερμοκρασία φτάσει τους 1240 °C, το στερεό διάλυμα διέρχεται πλέον από την περιοχή που οι φάσεις του είναι ωστενίτης και σεμεντίτης. Στην περιοχή αυτή κατά τον ευτηκτικό μετασχηματισμό σχηματίζονται επίσης κάποια καρβίδια τα οποία ονομάζονται **ευτηκτικά καρβίδια**. Είναι συνήθως πλούσια σε Cr και είναι της μορφής M₃C₇. Το ποσοστό ύπαρξης πρωτογενών και ευτηκτικών καρβιδίων, όπως επίσης και το μέγεθός τους εξαρτάται από το μεσοδιάστημα της στερεοποίησης (solidification interval) ΔT_{MC} (εικόνα 3.1.2.2) και την ίδια την χημική σύσταση του διαλύματος [6].

Στην εικόνα 2.1.2.1 α φαίνεται η μικροδομή ενός ταχυχάλυβα ποιότητας M2 που περιέχει ευτηκτικά καρβίδια της μορφής M₂C και MC.

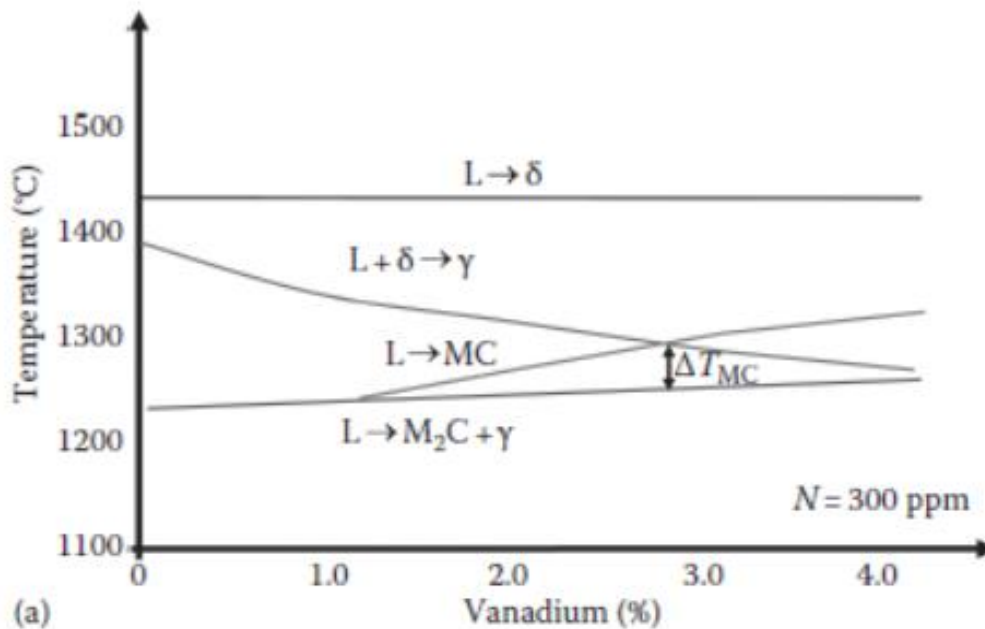
Τα καρβίδια M₂C που προκύπτουν κατά τον ευτηκτικό μετασχηματισμό, κατά την εν θερμώ έλαση μεταπίπτουν σε άλλους τύπους καρβιδίων, συνήθως MC και M₆C που είναι σφαιροειδούς μορφής (εικόνα 2.1.2.1 β) [6].



Εικόνα 2.1.2.1 α: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα M2 στη μορφή του μετά την χύτευση (as-cast) [6]



Εικόνα 2.1.2.1.β: Μικροδομή εργαλειοχάλυβα M2 με τα καρβίδια M_2C να έχουν μεταπέσει σε MC και M_6C [6]



Εικόνα 2.1.2.2: Περιοχές σχηματισμού καρβιδίων [6].

2.1.3 Δευτερογενή καρβίδια

Κατά την επαναφορά σε θερμοκρασίες άνω των 400 °C, από τις μήτρες του επαναφερόμενου μαρτενσίτη ή του τυχόν παραμένουστος ωστενίτη κατακρημνίζονται επίσης καρβίδια, τα οποία ονομάζονται **δευτερογενή καρβίδια**. Είναι υπεύθυνα για την δευτερογενή σκλήρυνση του υλικού, από την οποία προκύπτει και η δυνατότητα διατήρησης της σκληρότητάς του κατά την έκθεση του υλικού σε θερμοκρασίες άνω των 500 °C (αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά ή resistance to tempering back). Σε μικρότερες θερμοκρασίες, η παρουσία τους είναι αμελητέα και δεν έχει κάποια ουσιαστική συμμετοχή στην σκληρότητα. Τέτοια λεπτά καρβίδια τα οποία ευνοούν την σκληρότητα και την δυσθραυστότητα σχηματίζουν σε αυτές τις θερμοκρασίες κυρίως το V, το Mo και το W. Λιγότερο συμμετέχει και το Cr, του οποίου τα καρβίδια κατακρημνίζονται σε μικρότερες θερμοκρασίες και δεν βοηθούν σε τόσο μεγάλο βαθμό την δευτερογενή σκλήρυνση [6].

Αναλυτικότερα, σε θερμοκρασίες από 50 έως 100 °C, η κατακρήμνιση του C από το μαρτενσιτικό πλέγμα ξεκινάει και δημιουργεί μεταβατικά καρβίδια όπως το ε (Fe_{2.4}C). Αυτό συμβαίνει επειδή το κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη είναι υπερκορεσμένο σε C. Η συγκέντρωση του C μέσα στο μαρτενσιτικό πλέγμα ξεπερνάει την διαλυτότητά του στην θέση ισορροπίας, οπότε μεταβαίνει σε άλλες φάσεις. Ωστόσο, η διαλυτότητα σε C της θέσης ισορροπίας εξαρτάται από τη φάση. Δηλαδή, η διαλυτότητα σε C της μαρτενσιτικής μήτρας θα είναι μεγαλύτερη όταν εκείνος είναι σε ισορροπία μέσω μίας μετασταθούς φάσης όπως το καρβίδιο ε [7].

Η επαναφορά σε θερμοκρασίες από 250 - 400°C ευνοεί τον σχηματισμό σεμεντίτη, με τα σωματίδιά του που βρίσκονται στα όρια του κομματιού να μεγαλώνουν εις βάρος αυτών που βρίσκονται στο εσωτερικό (συγκέντρωση του σεμεντίτη στα άκρα του κομματιού). Αυτή η κατακρήμνιση είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο της ψαθυροποίησης. Το φαινόμενο αυτό αποφεύγεται με την προσθήκη Si, το οποίο είναι ένα αδιάλυτο στοιχείο στον σεμεντίτη. Αυτό επιτρέπει στον σεμεντίτη να δημιουργηθεί μόνο σε θερμοκρασίες στις οποίες διαχέεται το Si, και έτσι επιβραδύνεται ο σχηματισμός του [7].

Σε θερμοκρασίες από 400 έως 600°C ευνοείται ο σχηματισμός λεπτών καρβιδίων με κατακρήμνιση, διεσπαρμένα ομοιογενώς, τα οποία είναι και υπεύθυνα για την δευτερογενή σκλήρυνση του υλικού [7].

Σε ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασίες, συμβαίνει σφαιροποίηση του σεμεντίτη και των υπολοίπων καρβιδίων, καθώς συνενώνονται, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλα καρβίδια τα οποία μειώνουν την τιμή της σκληρότητας. Μετά από αυτήν την θερμοκρασία, γίνεται εντατική ανακατανομή του C στις μήτρες του μαρτενσίτη. Τον ρόλο αυτής της διαδικασίας έχει αναλάβει πλέον η ανακρυστάλλωση, η οποία εκτελείται μεταξύ των 600 και 700 °C [7].

2.1.4 Τύποι καρβιδίων για κάθε κατηγορία εργαλειοχαλύβων

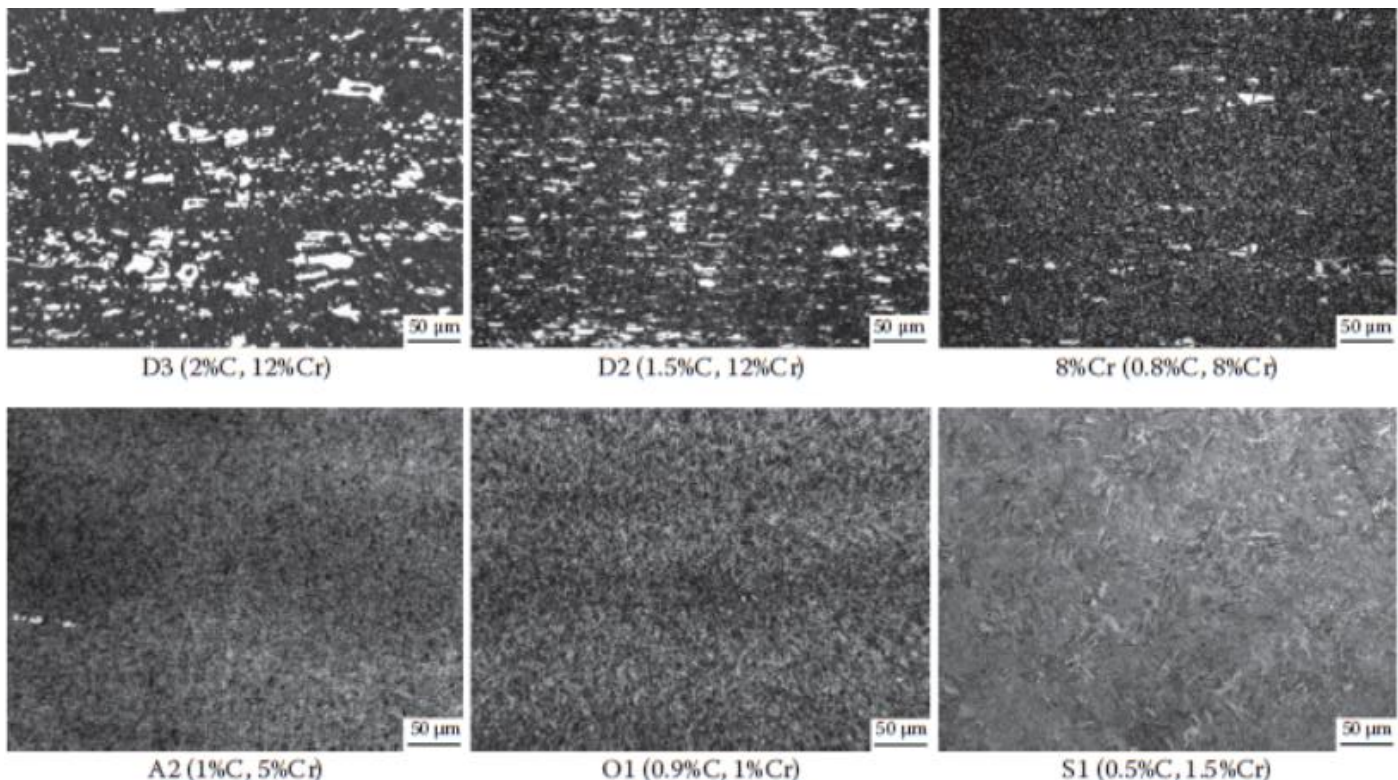
2.1.4.1 Ο ρόλος των καρβιδίων στην μικροδομή των τεσσάρων κυρίων κατηγοριών

Εργαλειοχάλυβες για εν θερμώ εφαρμογές: Σε αυτούς τους εργαλειοχάλυβες υπάρχει παρουσία κυρίως λεπτών δευτερογενών καρβιδίων, με κατακρημνίσματα ομοιογενώς κατανεμημένα και ευσταθή που σχηματίζονται με το V, το Mo, το W και λιγότερο με το Cr. Ο ρόλος τους είναι να αναστέλλουν την κινητικότητα των ατελειών των εργαλειοχαλύβων και είναι υπεύθυνα κυρίως για την υψηλή αντοχή και σκληρότητά τους, την αντοχή τους σε θερμικά φορτία και την ικανότητά τους να διατηρούν τις τιμές της σκληρότητάς τους όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (αντίσταση σε πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά (resistance to tempering back)) [6].

Τα καρβίδια του V και του Mo μπορεί επίσης να κατακρημνιστούν στα όρια των κόκκων του ωστενίτη πριν αυτός μετασηματιστεί σε μαρτενσίτη ή μπαινίτη. Τα κατακρημνίσματα αυτά είναι ανάλογα της ταχύτητας βαφής, και επομένως όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα, τόσο περισσότερα κατακρημνίσματα θα υπάρχουν. Ωστόσο, στην θέση αυτή είναι υπεύθυνα για τη μείωση της δυσθραυστότητας του εξαρτήματος καθώς αποτελούν σημείο έναρξης ρωγμών[6].

Εργαλειοχάλυβες για εν ψυχρώ εφαρμογές: Σε αυτούς τους εργαλειοχάλυβες υπάρχουν κυρίως πρωτογενή καρβίδια του Cr. Άλλα κραματοποιητικά στοιχεία που προστίθενται για δημιουργία καρβιδίων είναι το V, το Nb, το Mo και το W. Τα καρβίδια αυτά είναι σκληρά καρβίδια της μορφής MC ή M_7C_3 και δεν δημιουργούν δευτερογενή σκλήρυνση κατά την επαναφορά. Είναι υπεύθυνα για την υψηλή αντοχή σε φθορά εκτριβής και φθορά πρόσφυσης. Τα αδιάλυτα καρβίδια, όπως αυτά του Cr, του V και του Nb είναι υπεύθυνα για την υψηλή σκληρότητα. Βελτίωση της ομοιογένειας της διασποράς των καρβιδίων έχει θετικά αποτελέσματα και στην αντίσταση σε φθορά πρόσφυσης, καθώς η αύξηση της δυσθραυστότητας που προσφέρουν αποτρέπει την δημιουργία μικρορωγμών ως αποτέλεσμα της πρόσφυσης [6].

Στην εικόνα 2.1.3.1.1 φαίνεται η τυπική μικροδομή έξι ευρέως χρησιμοποιούμενων εργαλειοχαλύβων για εφαρμογές εν ψυχρώ.



Εικόνα 2.1.4.1.1: Τυπική μικροδομή έξι εργαλειοχαλύβων για εν ψυχρώ εφαρμογές [6]

Εργαλειοχάλυβες για καλούπια πλαστικών: Οι συγκεκριμένοι εργαλειοχάλυβες επειδή έχουν απαιτήσεις κυρίως για καλή ποιότητα επιφανείας και σχετικά μικρότερη σκληρότητα από τους εν θερμό και εν ψυχρώ, είναι συνήθως ελαφρώς κραματωμένοι. Για την διασφάλιση μιας καλής ποιότητας επιφανείας πρέπει η μικροδομή να είναι όσο πιο καθαρή γίνεται από εγκλείσματα μη μεταλλικών ενώσεων, συμπεριλαμβανομένων και των καρβιδίων. Επειδή κατά τη λείανση και τη στίλβωση, τα καρβίδια που είναι μη μεταλλικές ενώσεις κάνουν μικροτρύπες, αυτό καθιστά την ποιότητα επιφανείας υποδεέστερη και χρειάζονται μόνο για να συμμετέχουν στην σκληρότητα, η οποία είναι χρήσιμη για να μην διεισδύουν στην επιφάνεια οι κόκκοι των λειαντικών μέσων[6].

Το επικρατέστερο καρβίδιο στην μικροδομή τους είναι το καρβίδιο του Fe (σεμεντίτης) σε βελονοειδείς μήτρες διάσπαρτο μέσα στο μπαινίτη, ενώ η υπόλοιπη μικροδομή τους αποτελείται από περλίτη. Το καρβίδιο του σιδήρου που βρίσκεται στον περλίτη θα σχηματίσει πλακοειδή σεμεντίτη, με την υπόλοιπη μικροδομή να αποτελείται από φερρίτη, ο οποίος έχει πολύ μικρή σκληρότητα[6].

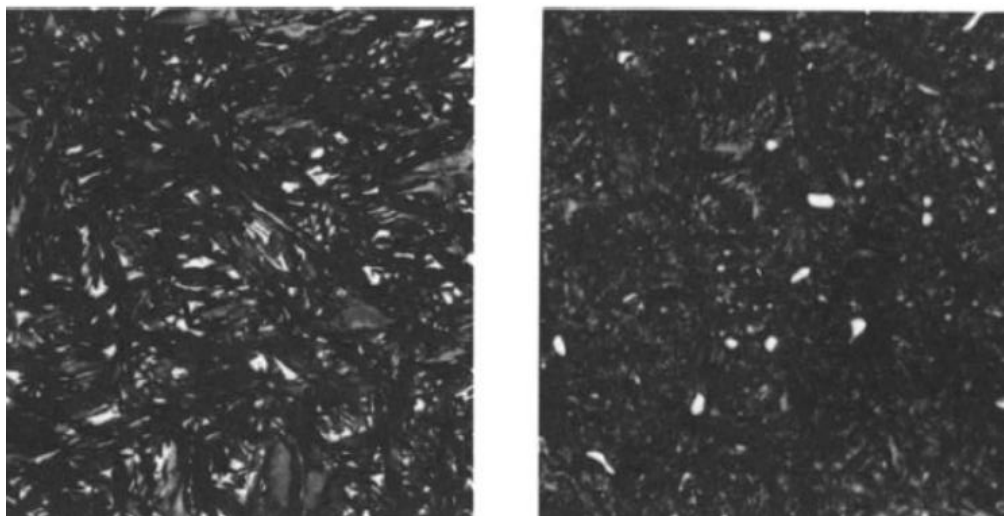
Ταχυχάλυβες: Οι ταχυχάλυβες φέρουν ως κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το V, το Mo και το W. Επειδή έχουν ταυτόχρονα και υψηλή περιεκτικότητα σε C, κατά την επαναφορά ευνοείται ο σχηματισμός πολλών δευτερογενών λεπτών καρβιδίων τα οποία ευθύνονται για τις πολύ υψηλές τιμές σκληρότητας των ταχυχάλυβων οι οποίες φτάσουν τιμές που κυμαίνονται πάνω από 68 HRC. Σε κάποιες από τις ποιότητές τους, η προσθήκη Co ευνοεί ακόμα περισσότερο τον σχηματισμό καρβιδίων με τα παραπάνω χημικά στοιχεία. Σε ορισμένες

κοβαλιούχες ποιότητες οι οποίες κατασκευάζονται με κονιομεταλλουργία, είναι δυνατή και η παρουσία εξαιρετικά λεπτών καρβιδίων τα οποία ευνοούν ακόμα περισσότερο τον σχηματισμό καρβιδίων τόσο κατά την σκλήρυνση όσο και κατά την επαναφορά [6].

Τα καρβίδια που σχηματίζονται είναι όμοια με αυτά των εργαλειοχαλύβων για εφαρμογές εν ψυχρώ, πλην αυτών του Cr καθώς η χημική σύσταση των ταχυχαλύβων δεν είναι πλούσια σε Cr. Όταν το Mo και το W είναι σε τιμές πάνω από την διαλυτότητά τους στον ωστενίτη, θα σχηματίσουν στην μικροδομή αδιάλυτα καρβίδια. Σε ποιότητες υψηλής περιεκτικότητας σε W, τα καρβίδια αυτά θα προκύψουν από ευτηκτικές αντιδράσεις. Σε ποιότητες υψηλής περιεκτικότητας σε Mo, από τις ευτηκτικές αντιδράσεις κατά την στερεοποίηση προκύπτουν καρβίδια του Mo σε σχήμα «φτέρης» τα οποία όμως είναι μετασταθή και κατά την εν θερμώ έλαση ή σφυρηλάτηση μεταπίπτουν σε άλλου σχήματος καρβίδια με πιο σφαιρικό σχήμα, τα οποία συντελούν στην βελτίωση της δυσθραυστότητας και της λειαντικότητας[6].

2.1.4.2 Η μικροδομή της κάθε σειράς εργαλειοχαλύβων

Η κάθε κατηγορία εργαλειοχαλύβων, η οποία υποβάλλεται σε θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης, σχηματίζει την δική της ξεχωριστή μικροδομή κατάλληλη για τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται. Οι εργαλειοχάλυβες που σκληραίνουν μέσω της βαφής σε νερό (σειρά W), οι οποίοι είναι ελαφρώς κραματωμένοι, σχηματίζουν μικροδομή η οποία αποτελείται αποκλειστικά από μαρτενσίτη και καρβίδια του Fe [3].

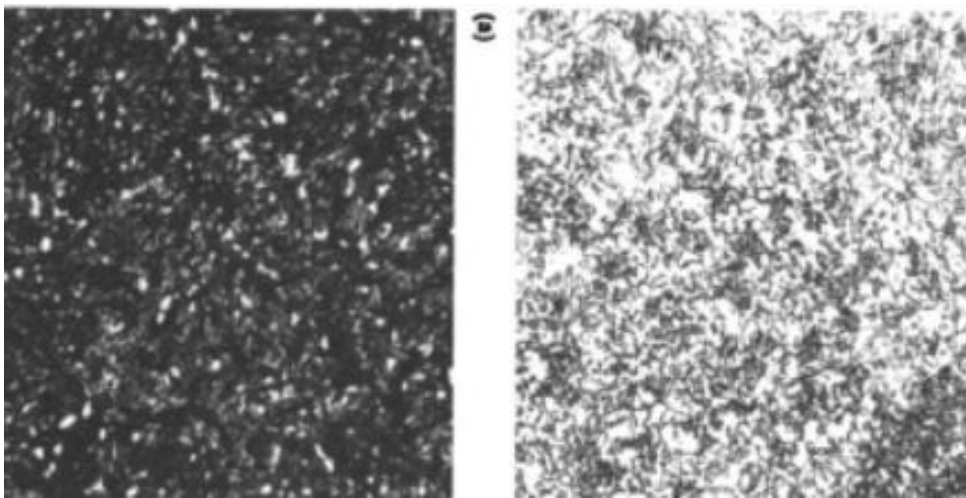


Εικόνα 2.1.4.2.1: Τυπική μικροδομή εργαλειοχάλυβα της σειράς W (W1) [3].

Οι εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής σε αιφνιδιασμούς/κρούσεις (shock resistant) (σειρά S), οι οποίοι έχουν ποιότητες που είναι από ελαφρώς έως μετρίως κραματωμένες, σχηματίζουν, μετά από τις θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης, μικροδομή η οποία αποτελείται από λιγότερο

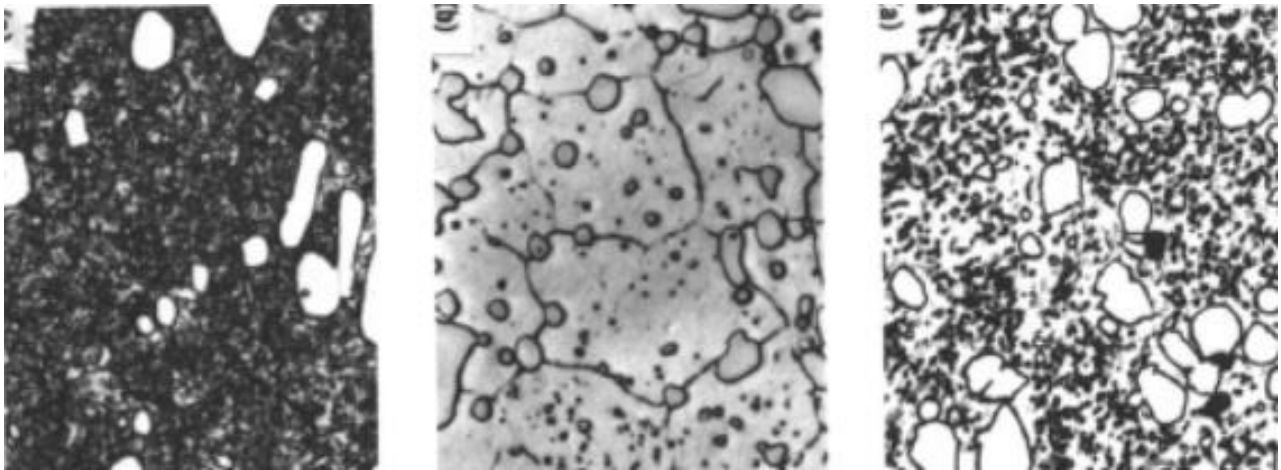
μαρτενσίτη σε σχέση με αυτούς της σειράς W, και περισσότερα διάσπαρτα καρβίδια τα οποία σχηματίζονται όχι μόνο με τον Fe, αλλά και με τα υπόλοιπα κραματοποιητικά στοιχεία, καθώς η συγκέντρωση C στις μήτρες του μαρτενσίτη είναι μέτρια, με αποτέλεσμα να ευνοείται η κατακρήμνιση καρβιδίων [3].

Οι εργαλειοχάλυβες οι οποίοι σκληραίνουν με βαφή σε λάδι για εν ψυχρώ κατεργασία (σειρά O), οι οποίοι είναι ελαφρώς κραματομένοι, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης C και της σχετικά μικρής συγκέντρωσης κραματοποιητικών στοιχείων, σχηματίζουν μετά από Θ.Κ.Σ. μικροδομή η οποία αποτελείται από μαρτενσίτη με υψηλή συγκέντρωση C στο κρυσταλλικό του πλέγμα και διάσπαρτα λεπτά καρβίδια. Η ποιότητα O7 περιέχει στην μικροδομή της και γραφίτη [3].



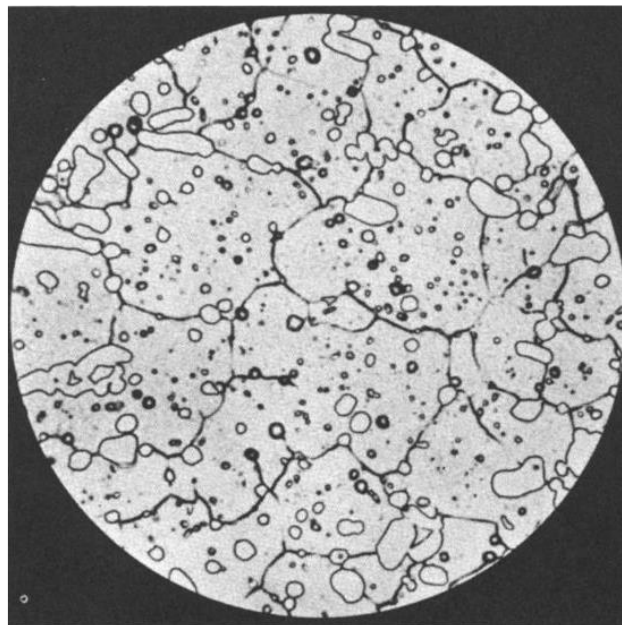
Εικόνα 2.1.4.2.2: Τυπική μικροδομή εργαλειοχάλυβων της σειράς O (αριστερά O2, δεξιά O1) [3].

Οι μετρίως κραματομένοι εργαλειοχάλυβες, οι οποίοι σκληραίνουν με βαφή σε αέρα για εν ψυχρώ κατεργασία (σειρά A), συνήθως σχηματίζουν μετά από τις Θ.Κ.Σ. μικροδομή η οποία αποτελείται από μαρτενσίτη με υψηλή συγκέντρωση C στο πλέγμα του και διάσπαρτα λεπτά καρβίδια. Λόγω της μέτριας κραμάτωσής τους, η εμβαπτότητα που έχουν είναι τόσο καλή που μπορεί να σχηματιστεί ακόμα μαρτενσίτης και σε ψύξη στον αέρα. Η ποιότητα A10 περιέχει στην μικροδομή της επίσης γραφίτη [3].



Εικόνα 2.1.4.2.3: Τυπική μικροδομή εργαλειοχάλυβα της σειράς A (A7) [3].

Οι εργαλειοχάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε C και Cr για εν ψυχρώ κατεργασίες (σειρά D), οι οποίοι είναι ισχυρώς κραματωμένοι, σχηματίζουν μετά από Θ.Κ.Σ. μικροδομή αποτελούμενη από υψηλής συγκέντρωσης C μαρτενσίτη και καρβίδια, τα οποία είτε προκύπτουν κατά την στερεοποίηση (από την διαδικασία παραγωγής του χάλυβα) και συνυπάρχουν με τον ωστενίτη κατά την εν θερμώ λειτουργία και την ωστενιτοποίηση, είτε κατακρημνίζονται στα όρια των κόκκων κατά την διαδικασία της επαναφοράς [3].



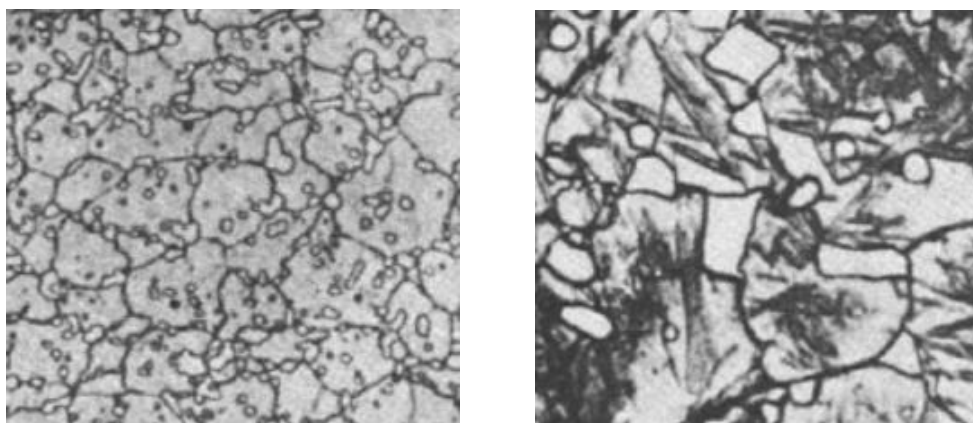
Εικόνα 2.1.4.2.4: Τυπική μικροδομή εργαλειοχάλυβα της σειράς D [3].

Οι ελαφρώς κραματωμένοι εργαλειοχάλυβες ειδικών χρήσεων (σειρά L), οι οποίοι έχουν ποιότητες που είναι από ελαφρώς έως μετρίως κραματωμένες, σχηματίζουν μικροδομή η οποία επίσης αποτελείται από μαρτενσίτη (φτωχότερο σε C) και καρβίδια [3].

Οι φτωχοί σε C χυτοχάλυβες της σειράς P, οι οποίοι έχουν ποιότητες που είναι από ελαφρώς έως μετρίως κραματωμένες, σχηματίζουν μικροδομή η οποία δεν αποτελείται από μαρτενσίτη, καθώς χρειάζονται μικρότερη σκληρότητα και καλύτερη ποιότητα επιφανείας, αλλά από λιγότερο σκληρές φάσεις όπως ο μπαινίτης, περλίτης και ο φερρίτης με παρουσία καρβιδίων [3].

Οι πλούσιοι σε Cr εργαλειοχάλυβες για εφαρμογές εν θερμώ (σειρά H) που έχουν ποιότητες από μετρίως έως ισχυρώς κραματωμένες, έχουν μικροδομή που αποτελείται από μαρτενσίτη και λεπτά καρβίδια Cr και V καθώς απαιτείται σε αυτούς δυσθραυστότητα και σκληρότητα. Οι πλούσιοι σε W εργαλειοχάλυβες της αντίστοιχης σειράς έχουν παρόμοια μικροδομή με τους χρωμιούχους, αλλά περιέχουν πολύ περισσότερα ευσταθή καρβίδια και έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω της παρουσίας του W. Ωστόσο, λόγω της παρουσίας περισσότερων καρβιδίων έχουν μικρότερη δυσθραυστότητα σε σχέση με τους χρωμιούχους. Οι μολυβδαινιούχοι εργαλειοχάλυβες αυτής της σειράς έχουν παρόμοια αντίσταση στην πτώση σκληρότητας της μικροδομής με τους αντίστοιχους βολφραμιούχους. Η μεγάλη ποσότητα καρβιδίων που έχουν στην μικροδομή τους προσφέρει ακόμα πιο ευσταθή μικροδομή κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας [3].

Οι βολφραμιούχοι ταχυχάλυβες (σειρά T) σχηματίζουν μικροδομή που περιέχει μαρτενσίτη και μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, κυρίως του W σε ποσοστό 18% και περισσότερο. Είναι πλούσιοι σε άνθρακα. Οι ταχυχάλυβες αυτής της σειράς δεν υφίστανται πτώση σκληρότητας της μικροδομής τους ακόμα και σε θερμοκρασίες όπου το εργαλείο γίνεται κόκκινο. Ως αποτέλεσμα, η μικροδομή αυτή προσφέρει υψηλή σκληρότητα και υψηλή αντοχή σε φθορά [3].



Εικόνα 2.1.4.2.5: Τυπική μικροδομή ταχυχάλυβα της σειράς T (T1) [3]

Οι μολυβδαινιούχοι ταχυχάλυβες (σειρά Μ) σχηματίζουν επίσης μικροδομή από μαρτενσίτη και καρβίδια, ομοίως με τους βολφραμιούχους. Επιπλέον, σε αυτούς προστίθεται Co, το οποίο ευνοεί ακόμα περισσότερο τον σχηματισμό καρβιδίων και αυξάνεται συνεπώς η σκληρότητα και η δυσθραυστότητα. Ωστόσο είναι πιο επιρρεπείς σε εξανθράκωση κατά την θερμική τους κατεργασία. Οι ποιότητες M41 έως M47 είναι ικανές να πετύχουν τιμές σκληρότητας 70 HRC. Η ικανότητά τους αυτή οφείλεται στο υψηλό ποσοστό άνθρακα, στο μεγάλο ποσοστό πρωτογενών καρβιδίων και λεπτών δευτερογενών καρβιδίων, αλλά και στην προσθήκη Co που ενισχύει τα παραπάνω. Ωστόσο, επειδή αυτές οι τιμές σκληρότητας συνεπάγονται χαμηλή δυσθραυστότητα, συνήθως δεν επιδιώκονται [3].

Οι υπό μελέτη εργαλειοχάλυβες Uddeholm Calmax, Unimax, Nimax, Viking, Sverker 3 και Orvar Supreme εμπίπτουν στις κατηγορίες S,P,D και H.

2.2 Χαρακτηριστικά καρβιδίων

Οι διάφοροι τύποι των καρβιδίων έχουν διαφορετικό μέγεθος και σχήμα, και η παρουσία τους στην μικροδομή επιτελεί διαφορετικό ρόλο στις τελικές ιδιότητες του υλικού.

2.2.1 Χαρακτηριστικά πρωτογενών και ευτηκτικών καρβιδίων

Τα πρωτογενή αδιάλυτα καρβίδια έχουν μέγεθος της τάξης του 1-100 μm και ο ρόλος τους είναι να αυξάνουν την σκληρότητα του υλικού, και μέσω της υψηλής σκληρότητάς τους να αποτρέπουν την διεύδυση σκληρότερων του επαναφερμένου μαρτενσίτη σωματιδίων στην επιφάνεια του υλικού και κατά συνέπεια να αποτρέπουν την χάραξή των. Επίσης, μειώνει και την δυνατότητα αφαίρεσης υλικού μέσω τριβής από την επιφάνεια όταν το εργαλείο έρχεται σε επαφή με κάποιο άλλο[6].

Οι κύριοι τύποι πρωτογενών αδιάλυτων καρβιδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.1.1 και είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 2.2.1.1: Τυπικά στοιχεία φάσεων καρβιδίων [6]

Φάση	Πλούσιο σε	Καρβίδιο αναφοράς	Σκληρότητα (καρβιδίου αναφοράς) (HV)	Κρυσταλλογραφικό σύστημα (καρβιδίου αναφοράς)
MC	Nb	NbC	2300	Κυβικό εδρωκεντρωμένο
MC	V	V ₄ C ₃	2000	Κυβικό
M ₂ C	Mo	Mo ₂ C	1800	Εξαγωνικό
M ₆ C	Mo/W	Fe ₃ Mo ₃ C	1500	Κυβικό
M ₇ C ₃	Cr	Cr ₇ C ₃	1600	Εξαγωνικό
M ₃ C	Fe	Fe ₃ C	1100	Ορθορομβικό



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τα καρβίδια τα οποία σχηματίζονται κατά την στερεοποίηση μετά την χύτευση, για δεδομένη χημική σύσταση, θα διατηρήσουν τον τύπο τους και την ευτηκτική μορφολογία (δενδριτική). Το μέγεθός τους εξαρτάται από τον ρυθμό της στερεοποίησης. Αυξανόμενου του ρυθμού, τα καρβίδια θα είναι λεπτότερα [6].

Τα ευτηκτικά καρβίδια τα οποία σχηματίζονται σε εργαλειοχάλυβες που προκύπτουν από κονιομεταλλουργία, είναι πολύ λεπτά, έχουν σφαιρικό μέγεθος και είναι ομοιογενώς καταναμημένα στο υλικό [6].

Μετά την στερεοποίηση, το υλικό υποβάλλεται σε έλαση εν θερμώ. Η κατανομή των καρβιδίων που έχουν αποκτήσει από τον ευτηκτικό μετασχηματισμό διαρρηγνύεται συνεχώς και αυτά μεταπίπτουν σε άλλα, μικρότερα, σφαιροειδούς μορφής καρβίδια. Η κυψελοειδούς μορφής κατανομή τους μετατρέπεται πλέον σε γραμμικής μορφής κατανομή [6].

2.2.2 Χαρακτηριστικά δευτερογενών καρβιδίων

Τα δευτερογενή καρβίδια που προκύπτουν με κατακρήμνιση είναι λεπτά και έχουν μέγεθος τάξεως νανοκλίμακας. Ο ρόλος τους είναι καθυστερούν την κινητικότητα των διαταραχών της δομής και επομένως να αυξάνουν την αντοχή του [6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

Οι υπό μελέτη εργαλειοχάλυβες έχουν ο καθένας τα δικά του χαρακτηριστικά τα οποία προσδίδονται σε αυτόν με βάση τα κραματοποιητικά στοιχεία που περιέχει η χημική του σύσταση.

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση και κατηγορίες των υπό μελέτη εργαλειοχάλυβων [8 - 13]

Εμπορική ονομασία εργαλειοχάλυβα	Τυποποίηση κατά AISI	W.-Nr.	Τυπική Χημική Σύσταση (%)								Κατηγορία	Σειρά Αναφοράς
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	W		
Uddeholm Calmax		1.2358	0,6	0,35	0,8	4,5	0,5	0,2			Κρούσης	S
Uddeholm Unimax	-	-	0,5	0,2	0,5	5,0	2,3	0,5			Πλαστικών	P
Uddeholm Nimax	-	-	0,1	0,3	2,5	3,0	0,3		1,0		Πλαστικών	P
Uddeholm Viking	-	(1.2631)	0,5	1,0	0,5	8,0	1,5	0,5			Κρούσης	S
Uddeholm Sverker 3	D3,D6	1.2436	2,05	0,3	0,8	12,7				1,1	Κατεργασία εν ψυχρώ	D
Uddeholm Orvar Supreme	H13	1.2344	0,39	1,0	0,4	5,2	1,4	0,9			Κατεργασία εν θερμώ	H

3.1 Ιδιότητες με βάση το προφίλ της κραμάτωσης

Τα διάφορα στοιχεία κραμάτωσης μεταβάλλουν το καθένα κάποιες ιδιότητες του κράματος στο οποίο προστίθενται. Χωρίζονται σε γαμμαφερρογόνα, αλφαφερρογόνα, καρβιδιογόνα, γραφιτιζόντα και στοιχεία που έχουν επίδραση στον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό. Οι ιδιότητες τις οποίες μεταβάλλουν μπορεί να είναι φυσικές, μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές [1].

- **Γαμμαφερρογόνα στοιχεία:** Διευρύνουν την περιοχή σταθερότητας του ωστενίτη. Στις θερμικές κατεργασίες, μετατοπίζουν τις καμπύλες TTT προς τα δεξιά ανάλογα με τα ποσοστά που γίνεται η προσθήκη. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το Mn, το Ni και το Co [1].
- **Αλφαφερρογόνα στοιχεία:** Συρρικνώνουν την περιοχή σταθερότητας του ωστενίτη και διευρύνουν αυτήν του φερρίτη. Κατά τις θερμικές κατεργασίες, μετατοπίζουν επίσης τις καμπύλες TTT προς τα δεξιά χωρίς ωστόσο να επιδρούν ιδιαίτερα στην μορφή των. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το Cr, το Si, το Mo, το W, το V το Al, το Ti και το Nb [1].
- **Καρβιδιογόνα στοιχεία:** Έχουν την τάση να δημιουργούν καρβίδια (ενώσεις με C). Τέτοια - πλην του Fe - είναι το Mn, το Cr, το Mo, το W, το V, το Nb και το Ti. Ανάλογα

με την συγκέντρωση στην οποία βρίσκεται το καθένα μέσα στο κράμα, καρβίδια θα σχηματίσει πρώτα αυτό που έχει την πιο ισχυρή τάση να σχηματίζει καρβίδια. Για παράδειγμα, εάν μέσα στο κράμα υπάρχουν Cr και V, πρώτα το V θα σχηματίσει καρβίδια λόγω της ισχυρότερης τάσης του, και το Cr για να σχηματίσει δικά του πρέπει να βρίσκεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση από το V [1].

Πίνακας 2.1.1 Καρβιδιογόνα στοιχεία κατά φθίνουσα σειρά της τάσης τους να σχηματίζουν καρβίδια σε σχέση με τον σίδηρο [1]

ΠΡΟΣΘΗΚΗ
Τιτάνιο (Ti)
Νιόβιο (Nb)
Βανάδιο (V)
Βολφράμιο (W)
Μολυβδαίνιο (Mo)
Χρόμιο (Cr)
Μαγγάνιο (Mn)
Κοβάλτιο (Co) - Σίδηρος (Fe)

- **Γραφιτίζοντα στοιχεία:** Εμποδίζουν τον σχηματισμό καρβιδίων και την διάσπαση του καρβιδίου του Fe (σεμεντίτη). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το Si, το Ni και το Al [1].
- **Στοιχεία που επιδρούν στον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό:** Μεταβάλλουν την θερμοκρασία και τη σύσταση του ευτηκτοειδούς σημείου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το Ti, το Mo, το Si, το W, το Cr, το Mn, το Ni [1].

Πίνακας 3.1.2 Επίδραση των κραματοποιητικών στοιχείων στην δομή των χαλύβων [1]

Στοιχείο	Πυρίτιο (Si)	Μαγγάνιο (Mn)	Χρόμιο (Cr)	Μολυβδαίνιο (Mo)	Βανάδιο (V)	Νικέλιο (Ni)	Βολφράμιο (W)	Τιτάνιο (Ti)	Νιόβιο (Nb)	Κοβάλτιο (Co)	Αργίλιο (Al)
Γαμμαφερρογόνο		√				√				√	
Αλφαφερρογόνο	√		√	√	√		√	√	√		√
Καρβιδιογόνο		√	√	√	√		√	√	√		
Γραφιτίζον	√					√					√
Με επίδραση στον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό	√	√	√	√		√	√	√			

Πλην των ανωτέρω κυρίων ιδιοτήτων, η προσθήκη των κραματοποιητικών στοιχείων δίνει πλήθος επιπλέον ιδιοτήτων [1]. Συγκεκριμένα:

- **Πυρίτιο (Si):** Η προσθήκη του Si σε έναν χάλυβα, μέσω της δημιουργίας καρβιδίων αυξάνει την αντοχή σε επαναφορά καθώς η σκληρότητα διατηρείται ευκολότερα από το στερεό διάλυμα. Επίσης, οι φερριτικοί χάλυβες μπορούν να σχηματίσουν ευκολότερα μεγάλους κόκκους, πράγμα το οποίο τους καθιστά κατάλληλους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Ακόμα, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή σε διάβρωση.
- **Μαγγάνιο (Mn):** Η προσθήκη Mn επιδρά σημαντικά στην ελάττωση των θερμοκρασιών έναρξης και πέρατος του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.
- **Χρόμιο (Cr):** Η προσθήκη Cr βοηθάει κατά πολύ στην προστασία από διάβρωση και έχει μικρή επιρροή στην αύξηση της αντοχής σε επαναφορά λόγω των καρβιδίων που σχηματίζει. Σε περιπτώσεις που η συγκέντρωση άνθρακα στο κράμα είναι κάτω από 0,03%, το Cr δεν σχηματίζει καρβίδια. Επίσης, σε περιπτώσεις που υπάρχει μέσα στο κράμμα Ti ή Nb, λόγω της ισχυρότερης τάσης τους σε σχέση με το Cr να σχηματίζουν καρβίδια, παρεμποδίζουν τον σχηματισμό καρβιδίων του Cr [14].
- **Μολυβδαίνιο (Mo):** Η προσθήκη Mo βελτιώνει την εμβαπτότητα, και εξ αιτίας των καρβιδίων που δημιουργεί, αυξάνει την αντοχή σε επαναφορά καθώς διατηρείται ευκολότερα η σκληρότητα που προκύπτει από την δευτερογενή σκλήρυνση. Κατά την επαναφορά, προκύπτουν καρβίδια τα οποία οδηγούν σε δευτερογενή σκλήρυνση. Επίσης, αυξάνει την δυσθραυστότητα καθώς εμποδίζει την γήρανση, αυξάνει την αντοχή σε φθορά και διάβρωση και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες.
- **Βανάδιο (V):** Η προσθήκη V συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση της εμβαπτότητας, στην αύξηση της αντοχής σε επαναφορά λόγω του σχηματισμού των καρβιδίων με αποτέλεσμα την μέγιστη διατήρηση της σκληρότητας που προκύπτει από την δευτερογενή σκλήρυνση. Κατά την επαναφορά, προκύπτουν καρβίδια τα οποία

οδηγούν σε δευτερογενή σκλήρυνση. Προστίθεται επίσης για την βελτίωση της αντοχής σε μηχανική φθορά.

- **Νικέλιο (Ni):** Η προσθήκη Ni έχει σημαντική επίδραση στην αύξηση της εμβαιπτότητας, εμποδίζει την ανακρυστάλλωση, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση.
- **Βολφράμιο (W):** Η προσθήκη W επιδρά σημαντικά στην αύξηση της εμβαιπτότητας, και στην αύξηση της αντοχής σε επαναφορά λόγω της ισχυρής τάσης να σχηματίζει καρβίδια, με αποτέλεσμα να διατηρεί την σκληρότητα που προκύπτει από δευτερογενή σκλήρυνση. Κατά την επαναφορά, προκύπτουν καρβίδια τα οποία οδηγούν σε δευτερογενή σκλήρυνση. Τα καρβίδια του βολφραμίου αυξάνουν επίσης την αντοχή σε φθορά εκτριβής [14]. Ακόμα, αποτελεί βασικό στοιχείο προσθήκης στους ταχυχάλυβες.
- **Τιτάνιο (Ti):** Η προσθήκη Ti αυξάνει σημαντικά την εμβαιπτότητα και εμποδίζει την γήρανση των μαλακών χάλυβων.
- **Κοβάλτιο (Co):** Η προσθήκη Co διευκολύνει την διατήρηση της σκληρότητας από το στερεό διάλυμα και αποτελεί το μοναδικό στοιχείο που έχει την δυνατότητα να μετατοπίζει αριστερά τις καμπύλες TTT. Εντούτοις, έχει αρνητική επίδραση στην εμβαιπτότητα.
- **Αργίλιο (Al):** Η προσθήκη Al παρεμποδίζει την μεγέθυνση του κόκκου.

Τα στοιχεία κραμάτωσης επηρεάζουν σημαντικά και τις θερμικές κατεργασίες στις οποίες υποβάλλονται οι εργαλειοχάλυβες. Εν γένει, τα στοιχεία αυτά ελαττώνουν την ταχύτητα των μετασχηματισμών που υφίσταται η μικροδομή των εργαλειοχάλυβων κατά την διεξαγωγή των θερμικών κατεργασιών (μετατοπίζουν δεξιά τις καμπύλες TTT και CCT). Προκύπτει επομένως ένα σημαντικό κέρδος, η μείωση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής. Δεδομένου ότι αποκτάται επιπλέον χρόνος για την διαδικασία της απομάκρυνσης του εξαρτήματος από τον θάλαμο της ωστενιτοποίησης έως την τοποθέτησή του στο ψυκτικό μέσο για την βαφή του, μειώνεται κατά συνέπεια η πιθανότητα της απόκτησης μίας ανεπιθύμητης μικροδομής σε περίπτωση καθυστέρησης της εμβάπτισης του εξαρτήματος στο ψυκτικό μέσο λόγω ατυχήματος/σφάλματος, και κατ' επέκτασιν κάποιας οικονομικής ζημίας [1].

Ορισμένες προσθήκες επιφέρουν μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες των κραμμάτων στα οποία προστίθενται. Συγκεκριμένα, το Cr, το Ni, το W και το Mo έχουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας από αυτό του σιδήρου και των κοινών ανθρακούχων χάλυβων, με αποτέλεσμα η προσθήκη τους να βελτιώνει το μέτρο ελαστικότητας του κράματος συνολικά [14]. Το Ni, το Ti και το Mo είναι στοιχεία τα οποία έχουν μεγαλύτερο όριο αντοχής σε εφελκυσμό, και κατά συνέπεια η προσθήκη τους βελτιώνει το όριο αντοχής σε εφελκυσμό του κράματος. Ακόμα, το Al, το Ni και το Mo είναι υλικά ολκιμότερα του χάλυβα, και κατά συνέπεια η προσθήκη τους σε αυτόν συντελεί στην βελτίωση της ολκιμότητάς του [15].

Κάποιες άλλες προσθήκες, επιφέρουν αντίστοιχα μεταβολές στις θερμικές ιδιότητες των κραμάτων. Το Al, το W και το Si είναι στοιχεία των οποίων οι τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερες από αυτήν ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα 1020, και επομένως η προσθήκη τους σε αυτόν αυξάνει την θερμική του αγωγιμότητα [14].

Πίνακας 3.1.3: Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων μετάλλων και χάλυβα σε κατάσταση ανόπτησης [15].

Υλικό	Όριο διαρροής (MPa)	Όριο αντοχής σε Εφελκυσμό (MPa)	Ολκιμότητα (% επί της επιμήκυνσης)
Αργίλιο (Al)	35	90	40
Σίδηρος (Fe)	130	262	45
Νικέλιο (Ni)	138	480	40
Τιτάνιο (Ti)	450	520	25
Μολυβδαίνιο (Mo)	565	655	35
Χάλυβας 1020	180	380	25

Πίνακας 3.1.4 Τυπικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου για επιλεγμένα υλικά [14].

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα k (W/mK)
Αργίλιο (Al)	238
Σίδηρος (Fe)	79
Νικέλιο (Ni)	90
Τιτάνιο (Ti)	22
Βολφράμιο (W)	171
Πυρίτιο (Si)	150
Χάλυβας 1020	100

3.1.1 Uddeholm Calmax

Ο συγκεκριμένος εργαλειοχάλυβας έχει ως κύρια στοιχεία κραμάτωσης το Cr, το Mo και το V, στοιχεία τα οποία είναι αλφαφερρογόνα και καρβιδιογόνα. Συνεπώς, οι παραπάνω προσθήκες προσδίδουν στο υλικό υψηλή δυσθραυστότητα, υψηλή αντοχή σε φθορά, υψηλή αντίσταση σε εκλέπιση, διαστασιακή σταθερότητα, καλή συγκολλησιμότητα, εξαιρετική γυαλιστικότητα και δυνατότητα επίτευξης υψηλών τιμών σκληρότητας μέσω καταλλήλων κύκλων Θ.Κ.Σ.[8]. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το V και το Cr.

Πίνακας 3.1.1.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Calmax [8].

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Ποκνότητα (kg/m ³)	7770	7720	7650
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	194000	188000	178000
Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C	έως 100 °C, 11.7×10 ⁻⁶	έως 200 °C, 12.0×10 ⁻⁶	έως 400 °C, 13.0×10 ⁻⁶
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)		27	32
Ειδική θερμότητα (J/kg °C)	455	525	608

Πίνακας 3.1.1.2: Όρια αντοχής σε θλίψη του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Calmax[8].

Σκληρότητα (HRC)	R _{cm} (N/mm ²)	R _{c0,2} (N/mm ²)
56	2300	1900
58	2500	2000
60	2700	2100

Πίνακας 3.1.1.3: Μέγιστες τιμές σκληρότητας μετά την βαφή με χρόνο παραμονής 30 min του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Calmax [8].

Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (°C)	Σκληρότητα πριν την επαναφορά (HRC)
950	62
960	63
970	64

3.1.2 Uddeholm Unimax

Το υλικό αυτό έχει ως κύρια στοιχεία κραμάτωσης επίσης το Cr, το Mo και το V, στοιχεία τα οποία είναι αλφαφερρογόνα και καρβιδιογόνα. Επομένως, προσδίδεται στον υλικό μεγάλη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα, υψηλή αντοχή σε φθορά, διαστασιακή σταθερότητα, αντίσταση στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά, αντοχή εν θερμώ, υψηλή αντοχή σε θερμική κόπωση, εξαιρετική γυαλιστικότητα και δυνατότητα επίτευξης μεγάλων τιμών σκληρότητας. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το Cr και το V.

Πίνακας 3.1.2.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Unimax [9]

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Πυκνότητα (kg/m ³)	7790		
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	213000	192000	180000
Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C		11.5×10 ⁻⁶	12.3×10 ⁻⁶
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)		25	28
Ειδική θερμότητα (J/kg °C)	460		

Πίνακας 3.1.2.2: Μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Unimax [9]

Σκληρότητα (HRC)	54	56	58
Όριο διαρροής $R_{p0.2}$ (MPa)	1720	1780	1800
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό R_m (MPa)	2050	2150	2280
Επιμήκυνση A_5 (%)	9	8	8
Μείωση διατομής Z (%)	40	32	28

Πίνακας 3.1.2.3: Μέγιστες τιμές σκληρότητας μετά την βαφή με χρόνο παραμονής 30 min του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Unimax [9]

Θερμοκρασία οστενιτοποίησης (°C)	Σκληρότητα πριν την επαναφορά (HRC)
1000	61
1025	63

3.1.3 Uddeholm Nimax

Το υλικό αυτό, είναι ένας εργαλειοχάλυβας χαμηλός σε άνθρακα με κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το Mn, το Ni και το Cr. Το Mn και το Ni είναι γαμμαφερρογόνα στοιχεία ενώ το Cr είναι αλφαφερρογόνο. Το Mn και το Cr είναι και καρβιδιογόνα. Συνήθως παραδίδεται σε τιμές σκληρότητας γύρω στα 40 HRC, και δεν προβλέπεται η υποβολή του σε κάποια Θ.Κ.Σ., καθώς δεν προκύπτει κάποιο όφελος στην αύξηση της σκληρότητάς του μέσω αυτής. Οι τιμές της σκληρότητας έχουν την δυνατότητα ελάττωσής τους μέσω επαναφοράς, ωστόσο με αρνητικό αντίκτυπο στην δυσθραυστότητα παρόλη την μείωση της σκληρότητας [10].

Χαρακτηρίζεται από καλή κατεργασιμότητα, καλή συγκολλησιμότητα, καλή λειαντικότητα και δημιουργία καλουπιού αποτύπωσης αναγλύφων, αντίσταση στις διεισδύσεις, υψηλή αντοχή στην θραύση και ομοιογένεια ιδιοτήτων σε κομμάτια μεγάλων διαστάσεων [10]. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το Cr.

Πίνακας 3.1.3.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Nimax[10].

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C
Πυκνότητα (kg/m ³)	7900	
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	205000	

Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C		12.4×10^{-6}
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)		28
Ειδική θερμότητα (J/kg °C)	460	

Πίνακας 3.1.3.2: Μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Nimax[10]

Σκληρότητα (HB)	370
Όριο διαρροής $R_{p0.2}$ (MPa)	785
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό R_m (MPa)	1265
Επιμήκυνση A_5 (%)	11
Μείωση διατομής Z (%)	47
Όριο αντοχής σε θλίψη $R_{c0.2}$ (MPa)	1000

3.1.4 Uddeholm Viking

Ο εργαλειοχάλυβας Viking έχει ως κύριο στοιχείο κραμάτωσης το Cr, στοιχείο το οποίο είναι αλφαφερρογόνο και καρβιδιογόνο. Η μικροδομή του μετά από βαφή και διπλή επαναφορά αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια και περίπου 1% παραμένοντα οστενίτη. Λόγω των καρβιδίων που σχηματίζει το Cr, δίνεται στο κομμάτι υψηλή αντίσταση στην εκλέπιση, καλή εμβαιπτότητα και αντοχή σε διάβρωση [11]. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το Cr και το V.

Πίνακας 3.1.4.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Viking [11]

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Ποκνότητα (kg/m ³)	7750	7700	7650
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	190000	185000	170000
Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C		11.6×10 ⁻⁶	11.3×10 ⁻⁶
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)	26.1	27.1	28.6
Ειδική θερμότητα (J/kg °C)	460		

Πίνακας 3.1.4.2: Μηχανικές ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Viking [11]

	Σκληρότητα (HRC)		
	58	55	50
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό R _m (MPa)	1960	1860	1620
Όριο διαρροής R _{p0,2} (MPa)	1715	1620	1470
Όριο αντοχής σε θλίψη R _m (MPa)	2745	2450	2060
Όριο διαρροής R _{p0,2} (MPa)	2110	2060	1715
Επιμήκυνση A ₅ (%)	6	7	8
Μείωση διατομής Z (%)	15	28	35

Πίνακας 3.1.4.3: Μέγιστες τιμές σκληρότητας μετά την βαφή του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Viking [11]

Θερμοκρασία οστενιτοποίησης (°C)	Χρόνος παραμονής (min)	Σκληρότητα πριν την επαναφορά (HRC)
980	40	57
1010	30	60
1050	20	60

3.1.5 Uddeholm Sverker 3

Ο Sverker 3 (AISI D3) είναι υψηλής περιεκτικότητας σε C και έχει ως κύρια στοιχεία κραμάτωσης το Cr και το W, τα οποία είναι αλφαφερρογόνα και καρβιδιογόνα. Έχει υψηλή αντοχή σε φθορά, υψηλή αντοχή σε θραύση, υψηλή επιφανειακή σκληρότητα, σταθερότητα κατά την σκλήρυνση και αντίσταση σε πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά [12]. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το Cr και το W.

Πίνακας 3.1.5.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Sverker 3 [12].

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Πυκνότητα (kg/m ³)	7700	7650	7600
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	194000	189000	173000
Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C		11.0×10 ⁻⁶	10.8×10 ⁻⁶
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)	20.5	21.5	23.0
Ειδική θερμότητα (J/kg °C)	460		

Πίνακας 3.1.5.2: Αντοχή σε θλίψη του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Sverker 3 [12]

Σκληρότητα (HRC)	Όριο διαρροής σε θλίψη $R_{c0,2}$ (MPa)
62	2200
60	2100
55	1850
50	1600

Πίνακας 3.1.5.3: Μέγιστες τιμές σκληρότητας μετά την βαφή του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Sverker 3[12]

Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (°C)	Χρόνος Παραμονής (min)	Σκληρότητα πριν την επαναφορά (HRC)
920	60	65
960	30	66
1000	15	66

3.1.6 Uddeholm Orvar Supreme

Ο Orvar Supreme (AISI H13) έχει κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το Cr, το Mo και το V, και κατά συνέπεια έχει μεγάλη αντίσταση σε θερμική κόπωση και θερμικό σοκ, μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα, καλή κατεργασιμότητα και λειαντικότητα, βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες διαμέσου της σκλήρυνσης και σταθερότητα κατά την σκλήρυνση [13]. Σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των προσθηκών, καρβίδια θα σχηματιστούν από το Cr και το V.

Πίνακας 3.1.6.1: Φυσικές ιδιότητες εργαλειοχάλυβα Uddeholm Orvar Supreme [13].

Θερμοκρασία	20 °C	200 °C	400 °C
Ποκνότητα (kg/m ³)	7800	7700	7600
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm ²)	210000	180000	140000
Συντελεστής θερμικής διαστολής ανά °C από τους 20 °C		12.6×10^{-6}	13.2×10^{-6}
Θερμική αγωγιμότητα (W/m °C)	25	29	30

Πίνακας 3.1.6.2: Όρια αντοχής σε εφελκυσμό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Orvar Supreme [13].

Σκληρότητα (HRC)	R_m (N/mm ²)	$R_{c0,2}$ (N/mm ²)
52	1820	1520
45	1420	1280

Πίνακας 3.1.6.3: Μέγιστες τιμές σκληρότητας μετά την βαφή του εργαλειοχάλυβα Uddeholm Orvar Supreme [13].

Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (°C)	Χρόνος Παραμονής (min)	Σκληρότητα πριν την επαναφορά (HRC)
1025	30	53±2
1050	15	54±2

3.2 Χρήσεις

3.2.1 Uddeholm Calmax

Δεδομένης της χημικής σύστασης του υλικού, επιλέγεται για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε φθορά και υψηλή δυσθραυστότητα όπως εφαρμογές εν ψυχρώ και καλούπια πλαστικών. Αναλυτικότερα, η επιλογή του συνίσταται σε [8]:

- εργαλεία για απότμηση και διαμόρφωση
- εργαλεία βαρέως τύπου για απότμηση και διαμόρφωση
- εργαλεία για βαθεία κοίλανση
- εργαλεία για κερματοποίηση
- καλούπια για διέλαση εν ψυχρώ τα οποία έχουν περίπλοκη γεωμετρία
- ράουλα
- λεπίδες διατμητικής κοπής
- εργαλεία δημιουργίας πρωτοτύπων
- υψηλών επιδόσεων καλούπια πλαστικών
- καλούπια ενισχυμένων πλαστικών
- καλούπια πλαστικών με συμπίεση

3.2.2 Uddeholm Unimax

Ο συγκεκριμένος εργαλειοχάλυβας επιλέγεται για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ολκιμότητα και σκληρότητα, εφαρμογές που αναπόφευκτα θα υπάρξει μεγάλη φθορά στο εξάρτημα και επομένως χρειάζεται καλή αντοχή σε φθορά, εφαρμογές στις οποίες χρειάζεται να υπάρχει καλή θερμική διάχυση, εφαρμογές στις οποίες απαιτείται δυσθραυστότητα, εφαρμογές στις οποίες απαιτείται καλή ποιότητα επιφανείας και εφαρμογές στις οποίες το εξάρτημα πρέπει να

ανθίσταται σε διείσδυση ξένου σώματος στο εσωτερικό του. Συγκεκριμένα, βρίσκει εφαρμογές σε [9]:

- καλούπια πλαστικών υψηλών επιδόσεων
- καλούπια ενισχυμένων πλαστικών
- καλούπια πλαστικών με συμπίεση
- εργαλεία βαρέως τύπου για απότμηση
- ψυχρή σφυρηλάτηση
- κατασκευή σπειρωμάτων
- κατεργασίες εν θερμώ
- κατεργασίες εν ψυχρώ

3.2.3 Uddeholm Nimax

Ο εργαλειοχάλυβας Uddeholm Nimax συνήθως επιλέγεται για εφαρμογές που χρειάζονται υψηλή σκληρότητα και δυσθραυστότητα και μεγάλη αντίσταση σε διείσδυση ξένου σώματος στο εσωτερικό του. Είναι εν γένει χάλυβας πλαστικών, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εξαρτήματα συγκράτησης. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών του είναι [10]:

- καλούπια χύτευσης πλαστικών
 - διαφόρων ειδών συσκευασίες
 - μεγάλα εσωτερικά μέρη αυτοκινήτων
 - αντανακλαστήρες
 - λαβές και πάνελ οικιακών συσκευών
- εξαρτήματα συγκράτησης για εξαρτήματα σφυρηλάτησης και καλούπια χύτευσης
- εξαρτήματα συγκράτησης για κοπτικά εργαλεία
- υποδοχείς ακροφυσίων έγχυσης
- δομικά στοιχεία

3.2.4 Uddeholm Viking

Ο Viking είναι ένας εργαλειοχάλυβας που εμπίπτει κυρίως στην κατηγορία των εργαλειοχάλυβων κρούσης (shock resistant), οι οποίοι ωστόσο είναι πολλαπλών χρήσεων. Επιλέγεται για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη δυσθραυστότητα και αντοχή σε φθορά εκτριβής. Απαντάται κυρίως σε [11]:

- εργαλεία για απότμηση και διάτρηση υλικών πάχους έως και 25 mm
- απότμηση ακριβείας
- λεπίδες διατμητικής κοπής
- εργαλεία για βαθεία κοίλανση
- εργαλεία για σφυρηλάτηση εν ψυχρώ
- εναλασσόμενα καλούπια
- ράουλα
- καλούπια για διέλαση εν ψυχρώ τα οποία έχουν περίπλοκη γεωμετρία
- εργαλεία για ολκή σωλήνων

3.2.5 Uddeholm Sverker 3

Ο Sverker 3 είναι ένας εργαλειοχάλυβας ο οποίος συνιστάται για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή σε φθορά, όπως εργαλεία για κοπή και απότμηση, εργαλεία πρεσσών υψηλών επιδόσεων, εργαλεία διαμόρφωσης, και καλούπια για κεραμικά και πλαστικά εκτριβής. Εμπίπτει στην κατηγορία των εργαλειοχαλύβων για κατεργασία εν ψυχρώ. Οι κύριες εφαρμογές του βρίσκονται σε [12]:

- εργαλεία για απότμηση, κρούση, κοπή, διάτμηση, περίκοψη, συγκράτηση
- κοντά, ψαλίδια εν ψυχρώ για λεπτά υλικά, μαχαίρια τεμαχισμού για πλαστικά απορρίματα
- κυκλικά ψαλίδια για λεπτά μεταλλικά φύλλα
- Απότμηση απόληξης, περίκοψη, εργαλεία για σφυρηλάτηση
- κοπτικά, γλείφανα και προοδευτικής φθοράς εργαλεία για φρεζάρισμα σε ξύλο
- εργαλεία για κάμψη, βαθεία κοίλανση
- εργαλεία για διαμόρφωση σωλήνων
- μήτρες ολκής εν ψυχρώ και καλούπια αποκοπής
- καλούπια συμπίεσης για εξαρτήματα κονιομεταλλουργίας
- περιστρεφόμενα καλούπια για τύπωση εν ψυχρώ (cold hobbing)
- καλούπια για μορφοποίηση κεραμικών, τούβλων, πλακιδίων, λειαντικών τροχών, πλαστικών εκτριβής
- καλούπια για μορφοποίηση μετρητικών διατάξεων, μετρητικών οργάνων, τροχιών κύλισης, εργαλείων τύπωσης διασταυρούμενων αυλακίων, ακροφυσίων αμμοβολής
- καλούπια για διαμόρφωση σύνθλιψης σφυρών
- συμπαγή μέρη εργαλείων για κάμψη σωλήνων

3.2.6 Uddeholm Orvar Supreme

Ο Orvar Supreme συνιστάται για χρήση σε εργαλεία και εξαρτήματα που υποβάλλονται σε μεγάλη μηχανική και θερμική κόπωση και που χρειάζονται μεγάλη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα, για παράδειγμα σε καλούπια για χύτευση άλλων καλουπιών, εργαλεία σφυρηλάτησης και εργαλεία διέλασης. Αναλυτικότερα χρησιμοποιείται σε [13]:

- Εργαλεία χύτευσης καλουπιών
 - Καλούπια
 - Εσωτερικά αποσπώμενα εξαρτήματα
 - Είσοδοι χυτευόμενου υλικού
 - Ακροφύσια
 - Εξολκείς (εναζωτωμένοι)
 - Συμπαγή έμβολα, κύλινδροι έγχυσης (συνήθως εναζωτωμένοι)
- Εργαλεία διέλασης
 - Μήτρες
 - Στηρίγματα
 - Εξαρτήματα συγκράτησης καλουπιών
 - Εξαρτήματα διέλασης
 - Μίσχοι
- Εργαλεία πρεσσαρίσματος εν θερμώ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4. ΥΠΟΜΗΔΕΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

Για να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις καταπονήσεις τις οποίες πρόκειται να υποστούν τα διάφορα εργαλεία όπως καλούπια, κοπτικά εργαλεία, μηχανολογικά εξαρτήματα, πρέπει να υποβληθούν σε μια σειρά από θερμικές κατεργασίες, δηλαδή κατεργασίες μετασχηματισμού της μικροδομής του υλικού. Σχεδιάζοντας την βέλτιστη θερμική κατεργασία για το εκάστοτε υλικό, οι μηχανικές του ιδιότητες δύναται να βελτιωθούν σημαντικά. Η πιο διαδεδομένη θερμική κατεργασία στους εργαλειοχάλυβες, είναι η διαδικασία σκλήρυνσής τους, η οποία περιλαμβάνει ωστενιτοποίηση (παραμονή σε επιλεγμένη θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρόνο), ψύξη (π.χ. σε λάδι, τήγματα αλάτων, αέρα), η οποία ονομάζεται βαφή. Μέσω της διαδικασίας αυτής, επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, μια σκληρή φάση εκτός ισορροπίας με τετραγωνικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα υπερκορεσμένο σε άνθρακα. Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλη σκληρότητα και μικρή δυσθραυστότητα. Τη βαφή ακολουθεί η διαδικασία της επαναφοράς, η επαναθέρμανση δηλαδή του υλικού σε θερμοκρασίες κατώτερης της κάτω κρίσιμης, όπου λαμβάνεται μικροδομή επαναφερμένου μαρτενσίτη, με βελτιωμένη δυσθραυστότητα αλλά μικρότερη σκληρότητα σε σχέση με τον μαρτενσίτη μετά την βαφή. Ανάλογα με τα στοιχεία κραμάτωσης του εργαλειοχάλυβα, κατά την επαναφορά, σχηματίζονται καρβίδια κατά την απομάκρυνση των ατόμων C από το υπέρκορο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη. Με αυτόν τον τρόπο, απομακρύνονται οι μικρο-τάσεις από το πλέγμα, μειώνοντας τον κίνδυνο θραύσης. Ταυτόχρονα μειώνεται η σκληρότητα της μικροδομής [16].

Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη ξεκινάει σε μία θερμοκρασία διαφορετική για κάθε χάλυβα που ονομάζεται αρχή του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s) και περατώνεται σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία που ονομάζεται πέρας του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_f). Ένα ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη είναι αναπόφευκτο κατά την διαδικασία της βαφής για περιεκτικότητες C μεγαλύτερες του 0,45% ή κραματωμένους χάλυβες. Η παρουσία μεγαλύτερων ποσοστών μαρτενσίτη και καρβιδίων αυξάνουν την σκληρότητα και μεταβάλλουν τις θερμοκρασίες έναρξης και πέρατος του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Οι θερμοκρασίες αυτές δύναται να είναι χαμηλότερες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, επομένως ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί μερικώς σε μαρτενσίτη και η υπόλοιπη δομή θα είναι παραμένουτος ωστενίτης. Επίσης, οι θερμοκρασίες αυτές χαμηλώνουν όσο αυξάνεται και το μέγεθος κόκκου του υλικού, και επομένως μεγάλες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλα ποσοστά παραμένουτος ωστενίτη [16]. Η συγκεκριμένη φάση, ευρισκόμενη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι μετασταθής [17], με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπής στον μετασχηματισμό της σε μαρτενσίτη με την εφαρμογή μηχανικού έργου, αλλά και μέσω του αθερμικού μετασχηματισμού κατά την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του εξαρτήματος/εργαλείου/καλουπιού. Ένας τέτοιος μετασχηματισμός, σε συνδυασμό με την απουσία επερχόμενης επαναφοράς κατά τη λειτουργία, οδηγεί σε ρηγματώσεις και σε αστοχία του τεμαχίου. Η ανάγκη εξάλειψης αυτής της πιθανότητας, οδήγησε στην προσπάθεια πλήρους απομάκρυνσης του υπολειπόμενου ωστενίτη κατά τη θερμική ακολουθία της επιβελτίωσης (βαφή και επαναφορά) με την τοποθέτηση του εξαρτήματος σε υπομηδενική θερμοκρασία για κάποιο χρονικό διάστημα.

Με τον όρο κρυογενική κατεργασία ορίζεται ειδική θερμική κατεργασία κατά την οποία ένα αντικείμενο παραμένει σε υπομηδενική θερμοκρασία με σκοπό την παρέμβαση στην μικροδομή του ώστε να βελτιωθούν οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες.

4.1 Είδη υπομηδενικών κατεργασιών

Οι υπομηδενικές κατεργασίες χωρίζονται εν γένει σε τρεις μεγάλες κατηγορίες σε σχέση με τη θερμοκρασία διεξαγωγής τους. Αυτές είναι η ψυχρή κατεργασία (cold treatment), η ήπια κρυογενική κατεργασία (shallow cryogenic treatment) και η βαθεία κρυογενική κατεργασία (deep cryogenic treatment). Καθεμία από αυτές αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής.

4.1.1 Ψυχρή κατεργασία

Η ΨΚ αποτελεί ένα επιπλέον βήμα στην θερμική κατεργασία για τη σκλήρυνση του εργαλειοχάλυβα (βαφή). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μέχρι -84°C , με συνέπεια την δυνατότητα ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και συνεπώς παρατηρείται αύξηση σκληρότητας, λόγω της αύξησης του ποσοστού του μαρτενσίτη. Η ψύξη μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Άμεση ψύξη του εξαρτήματος με τη χρήση ξηρού πάγου, είτε έμμεσα με την ψύξη αέρα ή αλκοόλης τα οποία χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά μέσα σε ψυκτικούς θαλάμους [16].

Μέσω της ΨΚ, βελτιώνεται και η αντοχή σε τριβή, η οποία σχετίζεται με την αυξημένη σκληρότητα. Ακόμα, έχει αποδειχτεί πως επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ΨΚ μπορούν να βελτιώσουν την διαστασιακή σταθερότητα, η οποία οφείλεται στον πλήρη μετασχηματισμό του παραμένοντος ωστενίτη σε μαρτενσίτη, κατά τον αθερμικό μετασχηματισμό. Στις περισσότερες εφαρμογές, ο πλήρης μετασχηματισμός του παραμένοντος ωστενίτη δεν αποτελεί πρόβλημα, σε εφαρμογές με πολύ μικρές ανοχές, ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να προκαλέσει διαστασιακές μεταβολές που οφείλονται στις διαφορές του κρυσταλλογραφικού μεγέθους των φάσεων [16].

Η συνήθης διάρκεια παραμονής στην κατάλληλη θερμοκρασία είναι περίπου 1 ώρα ανά 25mm διατομής του υλικού [16]. Στη συνέχεια, τα εξαρτήματα απομακρύνονται από τον ψυκτικό θάλαμο, και αφήνονται να επιστρέψουν στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για την μείωση του χρόνου επιστροφής στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ανεμιστήρα ώστε να αυξάνεται η κυκλοφορία του αέρα γύρω από το εξάρτημα με σκοπό την υποβοήθηση της μετάδοσης θερμότητας [16].

4.1.2 Ήπια κρυογενική κατεργασία

Η ΗΚΚ αποτελεί επίσης ένα συμπληρωματικό στάδιο στην συμβατική θερμική κατεργασία της βαφής, όμοια με την ψυχρή κατεργασία. Πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες από -84°C έως -135°C . Εφαρμόζεται σε υλικά των οποίων η θερμοκρασία πέρατος του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_f) βρίσκεται χαμηλότερα από τις θερμοκρασίες που πραγματοποιείται η ΨΚ, ώστε να υπάρξει η δυνατότητα μετασχηματισμού του παραμένοντος ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Επίσης, σε υλικά στα οποία η ΨΚ αρκεί για την ολοκλήρωση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, η έκθεση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ευνοεί όλο και περισσότερο την κινητικότητα των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα, λόγω σημειακών ατελειών, με αποτέλεσμα

τη μεγαλύτερη ομοιογένεια του υλικού [19]. Πραγματοποιείται με τα ίδια μέσα που πραγματοποιείται και η ΨΚ καθώς επίσης και με την χρήση υγρού N₂.

4.1.3 Βαθεία κρυογενική κατεργασία

Η ΒΚΚ πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες από -135°C έως -196°C με κύκλο που συνήθως περιλαμβάνει ψύξη μέχρι την επιλεγμένη θερμοκρασία παραμονής με ελεγχόμενο ρυθμό, παραμονή στην επιλεγμένη θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρόνο και επαναθέρμανση στην θερμοκρασία περιβάλλοντος με επίσης ελεγχόμενο ρυθμό [18,20]. Χρήση ψυκτικών μέσων όπως το υγρό He με θερμοκρασία εφαρμογής τους -269°C είναι περιορισμένη [21].

Συγκεκριμένα, η ΒΚΚ, εκτός της επίδρασης του μετασχηματισμού του παραμένουστος ωστενίτη σε μαρτενσίτη με συνέπεια την αύξηση της σκληρότητας, έχει και επίδραση στον ίδιο τον μαρτενσίτη, διότι προκαλεί κρυσταλλογραφικές αλλαγές στην μικροδομή, οι οποίες κατά την επαναθέρμανση καταλήγουν στην καλύτερη κατανομή της κατακρήμνισης των καρβιδίων κατά την επαναφορά. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής στην τριβή [22,23]. Αυξανόμενου του χρόνου παραμονής στην κρυογενική θερμοκρασία, επηρεάζεται σημαντικά η κατακρήμνιση των καρβιδίων, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η παραμονή σε αυτήν [16,23]. Πραγματοποιείται με τα ίδια μέσα που πραγματοποιούνται οι ΨΚ και ΗΚΚ.

4.2 Εκτιμώμενοι μηχανισμοί επίδρασης των υπομηδενικών κατεργασιών στους χάλυβες

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι κρυογενικές κατεργασίες δύναται να βελτιώσουν της μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Behera et al. [24], προσφέρουν:

- Μετασχηματισμό σχεδόν ολόκληρου του ποσοστού της σκληρής φάσης του παραμένουστος ωστενίτη στην σκληρή φάση του μαρτενσίτη
- Αύξηση της αντίστασης στην φθορά εκτριβής
- Αύξηση της εφελκυστικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και της διαστασιακής σταθερότητας
- Μείωση των παραμένουστων τάσεων
- Σχηματισμός πυκνότερης μοριακής δομής
- Μείωση της ψαθυρότητας
- Σχηματισμός μικροκαρβιδίων τα οποία ενισχύουν τις δομές μεγαλύτερων καρβιδίων [25]
- Αύξηση της διάρκειας ζωής
- Δυνατότητα χρήσης σε εργαλειοχάλυβες με επικάλυψη ή μη [26]
- Βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού [27]
- Μείωση του χρόνου αντικατάστασης των εργαλείων

Όσον αφορά την μικροδομή, η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να αποδοθεί σε δύο κύρια φαινόμενα, τον πλήρη μετασχηματισμό του παραμένουστος ωστενίτη σε μαρτενσίτη και την ομοιογενή κατακρήμνιση καρβιδίων [19].

4.2.1 Μετασχηματισμός παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη

Δεδομένης της ύπαρξης εργαλειοχαλύβων των οποίων η θερμοκρασία πέρατος του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού βρίσκεται χαμηλότερα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η έκθεση των υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες συνεπάγεται τον μετασχηματισμό του παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ωστόσο πλήρης μετασχηματισμός του σημειώνεται πολύ σπάνια εάν όχι ποτέ [28].

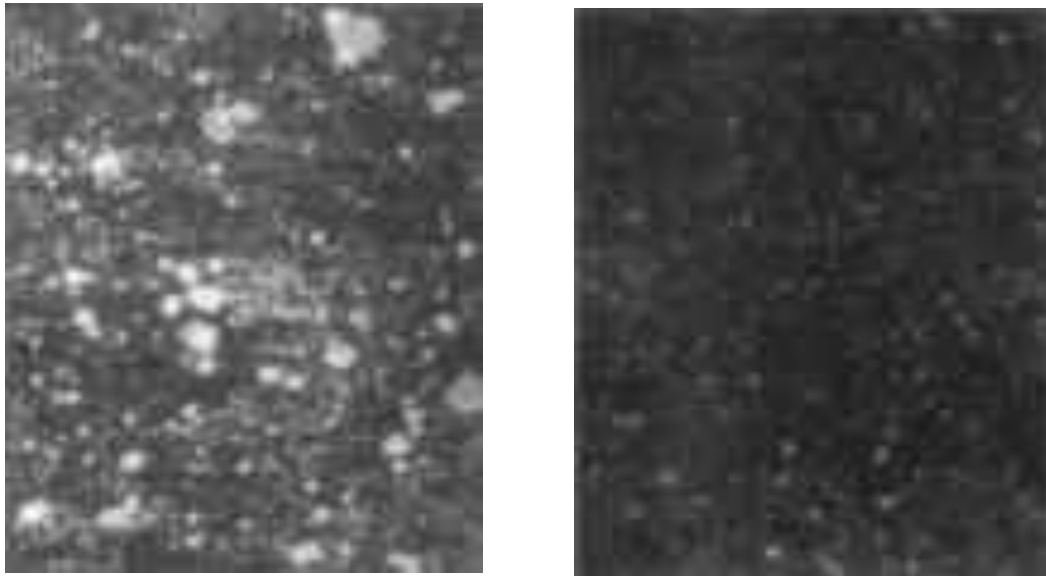
Ο μαρτενσίτης ως γνωστόν, αποτελεί μία ιδιαίτερα σκληρή και ψαθυρή φάση, και επομένως μεγαλύτερα ποσοστά μαρτενσίτη στην κρυσταλλική δομή συνεπάγονται μεγαλύτερη σκληρότητα του υλικού.

Ο παραμένουτος ωστενίτης λόγω της μετασταθούς φάσης στην οποία ευρίσκεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, είναι επιρρεπής στον μετασχηματισμό του με την πάροδο του χρόνου. Για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια, ο ενδεχόμενος μετασχηματισμός του ωστενίτη από τυχόν πρόσδοση ενέργειας οδηγεί σε διαστασιακές μεταβολές λόγω της διαφοράς του κρυσταλλογραφικού μεγέθους των φάσεων. Με την αύξηση των ποσοστών μαρτενσίτη στο κρυσταλλικό πλέγμα του χάλυβα, διασφαλίζεται και μεγαλύτερη διαστασιακή σταθερότητα [16].

Η παρουσία μεγαλύτερων ποσοστών μαρτενσίτη κατά τις κρυογενικές κατεργασίες έχει επαληθευτεί με την χρήση μη καταστροφικού ελέγχου, την περίθλαση ακτίνων X [28]. Μία άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του υπολειπόμενου ωστενίτη είναι μέσω του υπολογισμού της σταθεράς μαγνήτισης του υλικού σε σχέση με το σύνολο της μάζας του.

4.2.2 Κατακρήμνιση καρβιδίων

Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού οφείλεται επίσης και στην κατακρήμνιση των καρβιδίων, η οποία αυξάνεται όσο το υλικό εκτίθεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, μέχρι συγκεκριμένο χρονικό διάστημα έκθεσης σε υπομηδενικές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4.2.2.1: Μικροδομή χαλύβδινου δείγματος χωρίς κρυογενική κατεργασία (αριστερά) και μετά από βαθεία κρυογενική κατεργασία (δεξιά)[29]

Σημειώνεται μείωση των μικρο-τάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη λόγω της μετάβασης ατόμων C από το υπέρκορο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη σε ενώσεις με τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία του υλικού σχηματίζοντας καρβίδια. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η πιθανότητα θραύσης λόγω εσωτερικών τάσεων [16,19,28].

Η αυξημένη σκληρότητα η οποία οφείλεται εν μέρει στην παρουσία των καρβιδίων, τα οποία αποτελούν επίσης σκληρές φάσεις, συνδέεται στενά με την αύξηση της αντοχής του υλικού σε φθορά/τριβή.

Στις μελέτες [29,30] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων τριβής και σκληρότητας δώδεκα εργαλειοχαλύβων οι οποίοι υποβλήθηκαν σε ΗΚΚ και ΒΚΚ. Οι εργαλειοχάλυβες οι οποίοι υποβλήθηκαν σε ΒΚΚ έδειξαν αύξηση της αντοχής στην φθορά λόγω τριβής.

4.3 Εφαρμογές των υπομηδενικών κατεργασιών

4.3.1 Ψυχρή κατεργασία και ήπια κρυογενική κατεργασία

Εφαρμογές της ψυχρής κατεργασίας και ήπιας κρυογενικής κατεργασίας συναντώνται:

- Στους ανθρακούχους χάλυβες υψηλού ποσοστού σε C. Το γεγονός αυτό, αυξάνει το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη ακόμα και κάτω από τις M_s και M_f . Για υψηλά κραματωμένους ανθρακούχους χάλυβες, τα επίπεδα αυτά του παραμένουτος ωστενίτη μπορεί να αποβούν επιζήμια για τη λειτουργία του εξαρτήματος και θα πρέπει να περιοριστούν μέσω της ψυχρής κατεργασίας [16].
- Στα εξαρτήματα ακριβείας τα οποία χρειάζονται σταθεροποίηση της μικροδομής τους και ανακούφιση από τις εσωτερικές τάσεις, ώστε να εξασφαλιστεί διαστασιακή σταθερότητα. Σε αυτά τα εξαρτήματα πραγματοποιούνται πολλαπλοί κύκλοι ΨΚ [16].
- Σε έδρανα κύλισης και οδοντωτούς τροχούς όπου απαιτούνται αντοχή στη φθορά καθώς και αντοχή σε κόπωση. Προδιαγράφεται συγκεκριμένο ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη, ο οποίος ελέγχεται μέσω ΨΚ [16].

4.3.2 Βαθεία κρυογενική κατεργασία

Οι εφαρμογές της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας συναντώνται:

- Σε εργαλειοχάλυβες που δουλεύουν εν ψυχρώ: Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαλεία τα οποία λειτουργούν σε θερμοκρασίες κάτω των 200°C για εργασίες όπως κεφαλοποίηση, απότμηση και περίκλιση. Οι σειρές W και D κατά AISI ερευνήθηκαν από τους Collins και Dormer. Βρέθηκε ότι η ΨΚ μείωσε την σκληρότητα του D2 κατά 40%, πρωτίστως, λόγω του μετασχηματισμού του παραμένουτος ωστενίτη. Ωστόσο, οι κρυογενείς κατεργασίες σε θερμοκρασίες κάτω των -100°C έδωσαν ξεκάθαρη βελτίωση της σκληρότητας αν και ο λόγος αυτής της μείωσης δεν ήταν σαφής.
- Σε ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες: Χρησιμοποιώντας τις σειρές 300 και 400 κατά AISI ανοξείδωτων χαλύβων για κατασκευές σε αντλίες λαδιού, βρέθηκε ότι παρουσίασαν εξαιρετική αντοχή σε τριβή και τη διάβρωση [34]. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ελάττωση της αντιδιαβρωτικής ικανότητας του υλικού μετά την κρυογενική κατεργασία στον χάλυβα τύπου 301. Επίσης, ο μαρτενσίτης που μετασχηματίστηκε είναι ευαίσθητος σε ρωγμάτωση λόγω εργοδιάβρωσης [35].
- Σε χάλυβες για λειτουργία εν θερμώ: Οι χάλυβες αυτοί προορίζονται για λειτουργία σε θερμοκρασίες άνω των 200°C . Τυπικά, χρησιμοποιούν τους χάλυβες αυτούς για να κατασκευάσουν εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται για σφυρηλάτηση, καλούπια για χύτευση και καλούπια για διέλαση αλουμινίου. Ο χάλυβας H13 έδειξε σε μια μελέτη αύξηση κατά 50% του χρόνου ζωής ενός καλουπιού [36].
- Στους ταχυχάλυβες: Οι ταχυχάλυβες χρησιμοποιούνται για κοπές και περιλαμβάνουν την κατηγορία M. Βελτιώθηκε η αντοχή σε τριβή για μια μεγάλη ομάδα εξαρτημάτων, συμπεριλαμβανομένων κοπτικών εργαλείων και δραπάνων [37].
- Σε εξαρτήματα οχημάτων και αεροπλάνων (ελατήρια βαλβίδων, στροφείς φρένων) [19].
- Χρήση των κρυογενικών κατεργασιών ως μετρήσεις για μη καταστροφικές διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας: Τα μεταλλικά υλικά δύνανται να αλλάξουν σχήμα

και όγκο κατά την χρήση λόγω των δονήσεων και και των θερμοκρασιακών κύκλων, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν την κρυσταλλική δομή. Στο 2011 ASM Heat Treating Conference στο Cincinnati, μια εταιρεία που επισκεύαζε κινητήρες αεροσκαφών, η Victor Aviation από την Palo Alto CA, παρουσίασε μία μέθοδο όπου κατά την συντήρηση του κινητήρα, χρησιμοποιώντας BKK, θα μπορούσε να βρεί εξαρτήματα τα οποία είχαν μεγάλες διαστασιακές μεταβολές και στην συνέχεια να τα αφαιρέσει από την εκ νέου συναρμολογημένη μηχανή [19].

- Ιατρικός τομέας: χειρουργικά εργαλεία όπως χειρουργικά ψαλίδια και νυστέρια έχουν οφέλη από τις κρυογενικές κατεργασίες καθώς αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους και βελτιώνεται η ακρίβειά τους [38].
- Ιατρικές συσκευές: Η BKK μπορεί να βελτιώσει την διάρκεια ζωής συσκευών των οποίων τα υλικά υφίστανται σταδιακή αλλοίωση λόγω χημικών και βιολογικών παραγόντων. Τέτοιες συσκευές συχνά υφίστανται διάβρωση εντός ή εκτός του ανθρωπίνου σώματος λόγω των ρευστών του, και επομένως πρέπει να είναι λειτουργικές. Η BKK δημιουργεί ένα επίπεδο νιτριδίων στις επιφάνειες αυτών των συσκευών το οποίο μπορεί να παρέχει βελτιωμένη αντοχή την διάβρωση [38].

4.4 Το ερώτημα της σωστής θέσης των υπομηδενικών κατεργασιών στον κύκλο της επιβελτίωσης

Σχετικά με το ερώτημα για το αν η υπομηδενική κατεργασία πρέπει να προηγείται της επαναφοράς ή να ακολουθεί την επαναφορά, οι απόψεις δίστανται, και οι μελέτες πάνω σε διάφορα υλικά έχουν δείξει πολλά διαφορετικά αποτελέσματα.

Οι έρευνες έχουν δείξει πως για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερος μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, οι κρυογενικές κατεργασίες θα πρέπει να πραγματοποιούνται αμέσως μετά την βαφή και πριν την επαναφορά. Σύμφωνα με αυτές, η επαναφορά σταθεροποιεί τον παραμένοντα ωστενίτη και δυσχεραίνει τον μετασχηματισμό του, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μικρότερων ποσοστών μαρτενσίτη από το βέλτιστο δυνατό [16,28].

Ωστόσο, σε ορισμένα κράματα, μετά τη βαφή, δεν μπορεί να καθυστερήσει η επαναφορά, διότι ο μαρτενσίτης είναι ασταθής και υπερκορεσμένος σε άνθρακα, γεγονός που τον καθιστά ψαθυρό και αυξάνεται το ενδεχόμενο σχηματισμού ρωγμής. Σε δεδομένα βιομηχανίας, κάτι τέτοιο δε θα ήταν αποδεκτό καθώς θα καταστρέφονταν πολλά εξαρτήματα. Έτσι, όλα αυτά τα κράματα που έχουν υψηλό ενδεχόμενο να σπάσουν υφίστανται μια επαναφορά στους 100°C ώστε να αποφευχθεί η ρωγμάτωση [31]. Στην συνέχεια, ακολουθούν οι κύκλοι των υπομηδενικών κατεργασιών και των επαναφορών [16].

Στις μελέτες [32,33], έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντοχής σε τριβή του εργαλειοχάλυβα AISI M2 μετά από τέσσερις συνδυασμούς κατεργασιών:

- Βαφή και διπλή επαναφορά
- Βαφή, διπλή επαναφορά και BKK
- Βαφή, BKK και επαναφορά
- Βαφή, BKK και διπλή επαναφορά

Μετά από βαφή, διπλή επαναφορά και ΒΚΚ, σημειώθηκε μείωση κατά 51% του ρυθμού της φθοράς σε σχέση με την απλή βαφή και επαναφορά. Μετά από βαφή, ΒΚΚ και επαναφορά σημειώθηκε 40% μείωση του ρυθμού φθοράς, και τέλος μετά από βαφή, ΒΚΚ και διπλή επαναφορά, μείωση 35%. Οι ερευνητές σε αυτές τις μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν μεγαλύτερα οφέλη όταν η κρυογενική κατεργασία πραγματοποιείται μετά την επαναφορά.

Σε μελέτη που συντάχθηκε [39] για την εξέταση της επίδρασης των υπομηδενικών κατεργασιών σε εργαλειοχάλυβες, οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η θέση και η διάρκειά τους στον κύκλο της επιβελτίωσης πρέπει να σχεδιάζεται ξεχωριστά για το κάθε υλικό και με γνώμονα τις δυνατότητες επίδρασης που έχουν στο καθένα από αυτά μέσω των διαφόρων συνδυασμών εκτέλεσής τους.

Ανάλογα με το ποσοστό της περιεκτικότητάς του σε C και κραματοποιητικά στοιχεία, οι υπομηδενικές κατεργασίες μπορούν να έχουν πολύ διαφορετική επίδραση σε κάθε υλικό. Βελτιώνουν στο καθένα άλλες ιδιότητες μέσω διαφορετικών μηχανισμών, μπορούν να αντιστρέψουν το αποτέλεσμα της επίδρασής τους στην μικροδομή του υλικού με την πάροδο του χρόνου παραμονής στις υπομηδενικές θερμοκρασίες, ενώ εφαρμογή μίας πανομοιότυπης υπομηδενικής κατεργασίας σε δύο διαφορετικά κραματομένα υλικά, μπορεί επίσης να φέρει στο πρώτο αντίθετα αποτελέσματα απ' το δεύτερο. Παραδείγματος χάρη, η Βαθεία Κρυογενική Κατεργασία σε θερμοκρασία -196°C , στους εργαλειοχάλυβες D2 και H13 έχει θετική συνδρομή στην μείωση του ρυθμού φθοράς, ενώ στον O1 όχι. Στον D2 έχει σημαντική επίδραση στην κατακρήμνιση καρβιδίων, αλλά στον O1 μόνο αν έχει προηγηθεί ωστενιτοποίηση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία [39].

Επίσης, διαφοροποιείται σημαντικά και ο χρόνος παραμονής του κάθε υλικού στις υπομηδενικές θερμοκρασίες, καθώς το ίδιο υλικό προερχόμενο από διαφορετική θερμοκρασία ωστενιτοποίησης συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα ο εργαλειοχάλυβας D2 στην πρώτη ώρα παραμονής του σε θερμοκρασία -196°C παρουσιάζει σημαντική μείωση της δυσθραυστότητας προερχόμενος από θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης 980°C και 1010°C , ενώ προερχόμενος από θερμοκρασία ωστενιτοποίησης 960°C η μείωσή της είναι πολύ μικρότερη. Παρατηρείται ακόμα ότι με την πάροδο του χρόνου, για θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης 960 και 980°C η δυσθραυστότητα μειώνεται περαιτέρω αλλά με μικρότερο ρυθμό, ωστόσο για θερμοκρασία ωστενιτοποίησης 1010°C αυξάνεται κατακόρυφα [39].

Σε άλλη μελέτη που συντάχθηκε και αφορούσε τον εργαλειοχάλυβα W9 [40], διεξήχθη ένας κύκλος συμβατικής θερμικής κατεργασίας, τέσσερις κύκλοι με υπομηδενική κατεργασία η οποία προηγείται της επαναφοράς και τέσσερις κύκλοι στους οποίους η υπομηδενική κατεργασία έπεται της επαναφοράς ώστε να συγκριθεί η επίδραση των υπομηδενικών κατεργασιών στο υλικό.

Sample code	Various kinds of heat treatment cycle
CONT	Quenching (1503 K)+triple tempering (833 K)
CT	Quenching (1503 K)+subzero (193 K)+tempering(833 K)
SCT	Quenching (1503 K)+subzero (153 K)+tempering(833 K)
DCT1	Quenching (1503 K)+subzero (113 K)+tempering(833 K)
DCT2	Quenching (1503 K)+subzero (77 K)+tempering(833 K)
CT-1	Quenching (1503 K)+triple tempering (833 K)+ subzero (193 K)
SCT-1	Quenching (1503 K)+triple tempering (833 K)+subzero (153 K)
DCT1-1	Quenching (1503 K)+triple tempering (833 K)+subzero (113 K)
DCT2-1	Quenching (1503 K)+triple tempering (833 K)+subzero (77 K)

Εικόνα 4.4.1 Οι διάφοροι κύκλοι θερμικών και υπομηδενικών κατεργασιών που ακολουθήθηκαν [40]

Οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα [40]:

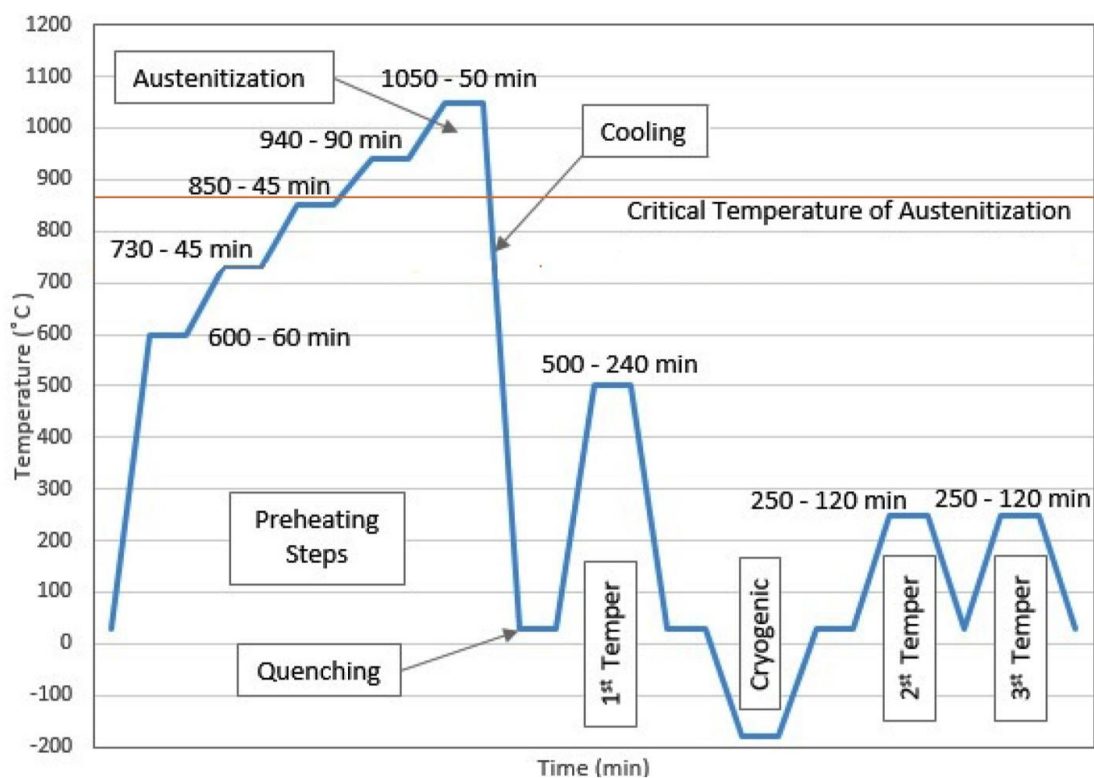
- Όλοι οι κύκλοι επιβελτίωσης που περιείχαν σε οποιοδήποτε σημείο υπομηδενική κατεργασία είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας στο υλικό σε σχέση με την συμβατική θερμική κατεργασία.
- Όλοι οι κύκλοι επιβελτίωσης που περιείχαν υπομηδενική κατεργασία αύξησαν την αντοχή του υλικού σε φθορά σε σχέση με την συμβατική θερμική κατεργασία, ωστόσο η επιρροή της ήπιας και βαθείας κρυογενικής κατεργασίας στην βελτίωση της αντοχής σε φθορά ήταν σημαντικά μεγαλύτερη.
- Μεγαλύτερη αντοχή σε φθορά παρουσιάστηκε στους κύκλους στους οποίους η υπομηδενική κατεργασία προηγήθηκε της επαναφοράς.

Σε άλλη μελέτη που αφορούσε τον εργαλειοχάλυβα D6 [41], διεξήχθη ένας κύκλος συμβατικής θερμικής κατεργασίας (ωστενιτοποίηση, βαφή και επαναφορά), δύο κύκλοι βαθείας κρυογενικής κατεργασίας (ωστενιτοποίηση, βαφή, επαναφορά και βαθεία κρυογενική κατεργασία) και δύο κύκλοι βαθείας κρυογενικής κατεργασίας με επαναφορά (ωστενιτοποίηση, βαφή, επαναφορά, βαθεία κρυογενική κατεργασία και διπλή επαναφορά).

Different heat treatments and sample codes.

Sample condition	Code	Cryo	Tempering
Conventional Heat Treatment	CHT	X	500 °C, 240 min.
Deep Cryogenic Treatment 2 hs	DCT2	-180 °C, 2 h	500 °C, 240 min
Deep Cryogenic Treatment 24 hs	DCT24	-180 °C, 24 h	500 °C, 240 min
Deep Cryogenic Treatment 2 hs and double tempering	DCT22T	-180 °C, 2 h	500 °C, 240 min and 2 × 250 °C 120 min
Deep Cryogenic Treatment 24 hs and double tempering	DCT242T	-180 °C, 24 h	500 °C, 240 min and 2 × 250 °C 120 min

Εικόνα 4.4.2: Κύκλοι θερμικών και κρυογενικών κατεργασιών που ακολουθήθηκαν [41]



Εικόνα 4.4.3: Κύκλοι θερμικών και κρυογενικών κατεργασιών που ακολουθήθηκαν (σηματικά) [41]

Οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα [41]:

- Ο παραμένον ωστενίτης μειώθηκε στο ελάχιστο στις περιπτώσεις που είχαν βαθεία κρυογενική κατεργασία ακολουθούμενη από διπλή επαναφορά.
- Η σκληρότητα και η δυσθραυστότητα αυξήθηκαν σημαντικά μετά από τους κύκλους που περιείχαν βαθεία κρυογενική κατεργασία, χωρίς επίπτωση στην αντοχή σε φθορά.

- Για τις περιπτώσεις που η βαθεία κρυογενική κατεργασία διεξήχθη για χρονικό διάστημα 24 ωρών, ο μεγαλύτερος μετασχηματισμός του παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη συνέβη πριν την υποβολή των δοκιμίων σε διπλή επαναφορά.
- Για τις περιπτώσεις που η βαθεία κρυογενική κατεργασία διεξήχθη για χρονικό διάστημα 2 ωρών, η υποβολή των δοκιμίων σε διπλή επαναφορά ήταν αρκετή ώστε να επιτευχθεί ικανό ποσοστό κατακρήμνισης καρβιδίων.

Σε τρίτη μελέτη που αφορούσε τους εργαλειοχάλυβες M2 και H13 [33], διεξήχθη ένας κύκλος συμβατικής θερμικής κατεργασίας (βαφή - διπλή επαναφορά), ένας κύκλος με βαφή - διπλή επαναφορά - βαθεία κρυογενική κατεργασία, ένας κύκλος με βαφή-κρυογενική κατεργασία – επαναφορά, και τέλος ένας κύκλος με βαφή-κρυογενική κατεργασία-διπλή επαναφορά.

Investigated specimens

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

Εικόνα 4.4.5: Κύκλοι θερμικών και κρυογενικών κατεργασιών που ακολουθήθηκαν για τα δοκίμια των εργαλειοχάλυβων M2 και H13 [33]

Οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα [33]:

- Η βαθεία κρυογενική κατεργασία επέφερε βελτίωση της σκληρότητας στον εργαλειοχάλυβα M2 και αύξηση της αντοχής του σε φθορά και τριβή. Τα αποτελέσματα ήταν βέλτιστα όταν η βαθεία κρυογενική κατεργασία διεξήχθη μετά την διπλή επαναφορά.
- Για τον εργαλειοχάλυβα H13, όταν η βαθεία κρυογενική κατεργασία διεξαχθεί αμέσως μετά την βαφή, επιφέρει βελτίωση στην δυσθραυστότητα αλλά δεν έχει επίδραση στην σκληρότητα. Η βαθεία κρυογενική κατεργασία δύναται να μειώσει σημαντικά τον ρυθμό φθοράς για τον συγκεκριμένο εργαλειοχάλυβα.
- Η αντοχή σε φθορά για τον εργαλειοχάλυβα M2 αποδίδεται στην αυξημένη σκληρότητα που επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής της βαθείας κρυογενικής κατεργασίας, ενώ στον H13 η αντοχή σε φθορά αποδίδεται στην αύξηση της δυσθραυστότητας.

Στην ίδια μελέτη, για δύο διαφορετικούς εργαλειοχάλυβες (έναν μολυβδαινιούχο ταχυχάλυβα και έναν εργαλειοχάλυβα για εν θερμώ εφαρμογές που έχουν διαφορετικά στοιχεία κραμάτωσης σε άλλες περιεκτικότητες), τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με διαφορετική θέση της υπομηδενικής κατεργασίας μέσα στον κύκλο της επιβελτίωσης και ενεργοποίησαν διαφορετικούς μηχανισμούς στον καθένα [33].



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

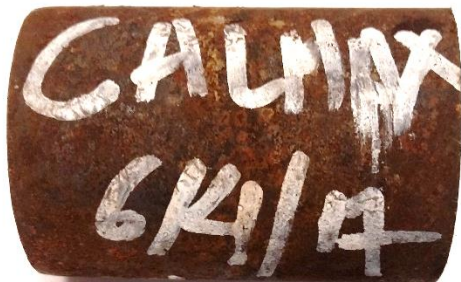
Στην παρούσα εργασία, θα εξεταστούν δοκίμια από έξι διαφορετικούς εργαλειοχάλυβες, τον Uddeholm Calmax, Uddeholm Unimax, Uddeholm Nimax, Uddeholm Viking, Uddeholm Sverker 3 και Uddeholm Orvar Supreme.

Αρχικά, ελήφθη ένα δοκίμιο από κάθε χάλυβα αντίστοιχα, και υπεβλήθησαν στο παρακάτω πρόγραμμα θερμικών και κρυογενικών κατεργασιών.

Πίνακας 5.1: Πρόγραμμα θερμικών και κρυογενικών κατεργασιών

Calmax	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C για μισή ώρα • Ωστενιτοποίηση στους 980°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή σε αυτό για 20 λεπτά, και στην συνέχεια απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C και παραμονή για 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C για μία ώρα, παραμονή 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες στην θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C]. Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Πρώτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 3 ωρών, δεύτερη επαναφορά στους 250°C διάρκειας 2 ωρών. Τρίτη και τέταρτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 2 ωρών.
Unimax	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C για μισή ώρα και δεύτερη προθέρμανση στους 830°C για άλλη μισή ώρα • Ωστενιτοποίηση στους 1030°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή σε αυτό για 20 λεπτά, και στην συνέχεια ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C και παραμονή για 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C για μία ώρα, παραμονή 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες στην θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C]. Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Πρώτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 3 ωρών. Δεύτερη επαναφορά στους 490°C διάρκειας 2 ωρών. Τρίτη επαναφορά στους 490°C διάρκειας 2 ωρών και τέταρτη 450°C διάρκειας 2 ωρών.
Nimax	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C • Ωστενιτοποίηση στους 900°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή για 20 λεπτά και στην συνέχεια απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C και παραμονή 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C σε μία ώρα και παραμονή σε αυτήν 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες στην θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C] Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Τρεις επαναφορές στους 180°C διάρκειας 2 ωρών η καθεμία.

Viking	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C για μισή ώρα και δεύτερη προθέρμανση στους 830°C για μισή ώρα • Ωστενιτοποίηση στους 1010°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή σε αυτό για 20 λεπτά, και στην συνέχεια απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C για 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C σε μία ώρα, παραμονή 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C] Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Πρώτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 3 ωρών. Δεύτερη επαναφορά στους 490°C διάρκειας 2 ωρών. Τρίτη και τέταρτη επαναφορά στους 530°C διάρκειας 2 ωρών η καθεμία.
Sverker 3	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C για μισή ώρα και δεύτερη προθέρμανση στους 830 °C για μισή ώρα • Ωστενιτοποίηση στους 990°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή σε αυτό για 20 λεπτά και στην συνέχεια απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C για 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C σε μία ώρα, παραμονή για 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C] Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Πρώτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 3 ωρών. Δεύτερη, τρίτη και τέταρτη επαναφορά στους 180°C για 2 ώρες η καθεμία.
Orvar Supreme	<ul style="list-style-type: none"> • Προθέρμανση στους 630°C για μισή ώρα και δεύτερη προθέρμανση στους 830°C για μισή ώρα • Ωστενιτοποίηση στους 1030°C για μισή ώρα • Απόψυξη σε λουτρό αλάτων στους 180°C και παραμονή σε αυτό για 20 λεπτά και στην συνέχεια απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος • Επαναθέρμανση στους 100°C για 1 ώρα • Μετάβαση στους -120°C σε μία ώρα, παραμονή 3 ώρες και επιστροφή σε 16 ώρες μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος [-17°C] Η υπομηδενική θερμοκρασία εξασφαλίζεται με υγρό άζωτο. • Πρώτη επαναφορά στους 180°C διάρκειας 3 ωρών. Δεύτερη επαναφορά στους 550°C διάρκειας 2 ωρών. Τρίτη επαναφορά στους 600°C διάρκειας 2 ωρών και τέταρτη στους 550°C διάρκειας 2 ωρών.



Εικόνα 5.1: Αρχικό Δοκίμιο Calmax



Εικόνα 5.2: Αρχικό Δοκίμιο Unimax



Εικόνα 5.3: Αρχικό Δοκίμιο Nimax



Εικόνα 5.4: Αρχικό Δοκίμιο Viking



Εικόνα 5.5: Αρχικό Δοκίμιο Sverker 3



Εικόνα 5.6 Αρχικό Δοκίμιο Orvar Supreme

Στην συνέχεια, ακολούθησε κοπή, και προέκυψαν δύο μικρότερα δοκίμια από το κάθε ένα.

5.1 Κοπή

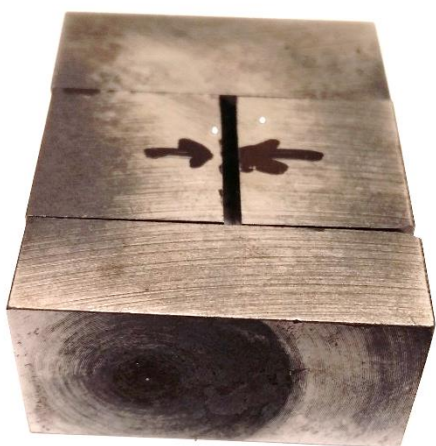
Το καθένα από τα έξι δοκίμια κόπηκε στο μηχάνημα Struers Labotom - 3 ρυθμισμένο στις 3820 rpm με ταχύτητα κοπής 50 m/s, με κοπτικό δίσκο 50 A 25. Από το καθένα προέκυψαν δύο μικρότερα δοκίμια, εκ των οποίων η πρώτη σειρά προορίζεται για μετρήσεις μακροσκληρότητας, ενώ η δεύτερη για μετρήσεις μικροσκληρότητας και μελέτη μικροδομής.



Εικόνα 5.1.1 β: Δοκίμια Calmax μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.2 β: Δοκίμια Unimax μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.3 α: Δοκίμια Nimax μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.3 β: Δοκίμια Nimax μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.4 α: Δοκίμα Viking μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.4 β: Δοκίμα Viking μετά την κοπή



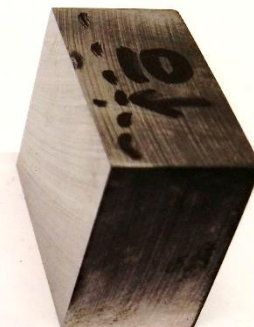
Εικόνα 5.1.5 α: Δοκίμα Sverker 3 μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.5 β: Δοκίμα Sverker 3 μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.6 α: Δοκίμα Ornar Supreme μετά την κοπή



Εικόνα 5.1.6 β: Δοκίμα Ornar Supreme μετά την κοπή

Κατά την διαδικασία της κοπής, στο δοκίμιο από χάλυβα Calmax, παρατηρήθηκε μια ρωγμή έκτασης περίπου 12,5 χιλιοστών από την επιφάνεια προς το κέντρο.

5.2 Εγκιβωτισμός

Η δεύτερη σειρά των δοκιμών, υπεβλήθη σε εγκιβωτισμό στο μηχάνημα Struers Citopress - 1, στους 180 ° C υπό πίεση 250 bar για 3 min και ψύξη σε νερό για 2 min. Για τον εγκιβωτισμό χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη με ξύλο και φαινολική ρητίνη.

5.3 Λείανση και στίλβωση

Στην συνέχεια, όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε λείανση, με λειαντικό χαρτί από καρβίδιο του πυριτίου και μεγέθους κόκκου P 80, P 120, P 240, P 320, P 600, P 800, P 1000, P 1200 και P 2400. Χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα Presi Mecapol.

Τέλος, όλα τα δοκίμια στίλβώθηκαν σε 4 στάδια, 6 μm, 3 μm, 1 μm και 0,25 μm.

1° στάδιο – 6 μm: Στίλβωση με χρήση χαρτιού από βελούδο, αδαμανταλοιφής 6 μm metkon diamond paste 6 μm και αντίστοιχου λιπαντή metkon diamond lubricant water based. Πραγματοποιήθηκε ένα πάσο 1 min και 30 sec, καθαρίστηκαν με τζελ μεθανόλης και στεγνώθηκαν με πιστολάκι.

2° στάδιο – 3 μm: Στίλβωση με χρήση χαρτιού από βελούδο, αδαμανταλοιφής 3 μm struers diamond paste 3 μm και μεθανόλη για λιπαντή. Πραγματοποιήθηκε ένα πάσο 1 min και 30 sec, καθαρίστηκαν με τζελ μεθανόλης και στεγνώθηκαν με πιστολάκι.

3° στάδιο – 1 μm: Στίλβωση με χρήση χαρτιού από βελούδο, αιωρήματος διαμαντιού 1 μm struers. Πραγματοποιήθηκε ένα πάσο 1 min και 30 sec, καθαρίστηκαν με τζελ μεθανόλης και στεγνώθηκαν με πιστολάκι.

4° στάδιο – 0,25 μm: Στίλβωση με χρήση χαρτιού από βελούδο, αιωρήματος διαμαντιού 0,25 μm Presi. Πραγματοποιήθηκε ένα πάσο 1 min και 30 sec, καθαρίστηκαν με τζελ μεθανόλης και στεγνώθηκαν με πιστολάκι.

Ο χρόνος των πάσων μετρήθηκε με το χρονόμετρο Sanhart Mesotron Quartz.



Εικόνα 5.3.1 α: Δοκίμιο Calmax από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.2 α: Δοκίμιο Unimax από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.3 α: Δοκίμιο Nimax από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.4 α: Δοκίμιο Viking από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.5 α: Δοκίμιο Sverker 3 από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



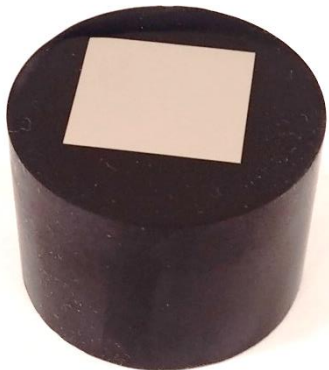
Εικόνα 5.3.6 α: Δοκίμιο Orvar Supreme από την πρώτη σειρά μετά από λείανση και στίλβωση



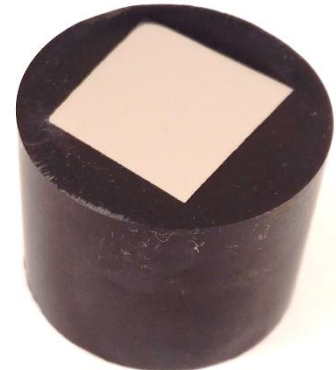
Εικόνα 5.3.1 β: Δοκίμιο Calmax μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση



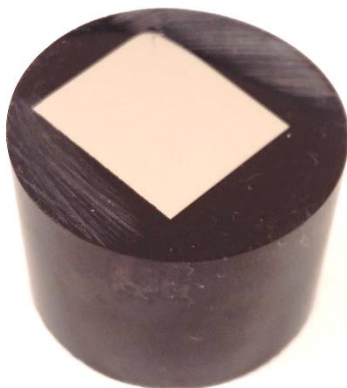
Εικόνα 5.3.2 β: Δοκίμιο Unimax μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση



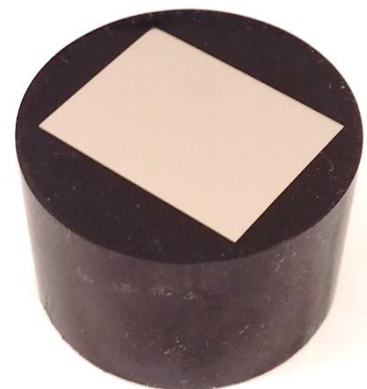
Εικόνα 5.3.3 β: Δοκίμιο Nimax μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.4 β: Δοκίμιο Viking μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.5 β: Δοκίμιο Sverker 3 μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση



Εικόνα 5.3.6 β: Δοκίμιο Orvar Supreme μετά από εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Μετά το πέρας της λείανσης, στην πρώτη σειρά των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μακροσκληρότητας στο σκληρόμετρο Alpha Duromatic (model 25850 No. 2221) του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, αφού αυτό βαθμονομήθηκε. Η βαθμονόμηση και όλες οι διαδικασίες που θα ακολουθήσουν έγιναν βάσει των προτύπων ASTM E13-08b και ASTM E140-02.

6.1 Βαθμονόμηση σκληρομέτρου Alpha Duromatic

Ελήφθησαν μετρήσεις σκληρότητας σε τρία πρότυπα δοκίμια, ονομαστικής σκληρότητας 26.3, 41.8 και 61.6 HRC. Το σκληρόμετρο βαθμονομείται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E18 – 08b. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι 5 μετρήσεις που ελήφθησαν σε καθένα από αυτά.

Πίνακας 6.1.1: Πρωτογενείς μετρήσεις προτύπων δοκιμίων

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HRC)	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΙΜΗ (HRC)
26,3	27
	28
	28
	28
	28
	28
41,8	43
	43
	43
	43
	43
	43
61,6	62
	63
	63
	62
	63
	63

Πίνακας 6.1.2: Υπολογισμός μέσης τιμής μετρούμενων τιμών σκληρότητας

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HRC)	ΜΕΣΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΙΜΗ (HRC)
26,3	27,8
41,8	43,0
61,6	62,7

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπολογίζεται η επαναληψιμότητα και το σφάλμα για τα τρία εύρη σκληρότητας της μεθόδου Rockwell C ως ακολούθως:

Επαναληψιμότητα R: : $H_{\max} - H_{\min} = 28,0 - 27,0 = 1,0 \text{ HRC}$

$$H_{\max} - H_{\min} = 43,0 - 43,0 = 0,0 \text{ HRC}$$

$$H_{\max} - H_{\min} = 63,0 - 62,0 = 1,0 \text{ HRC}$$

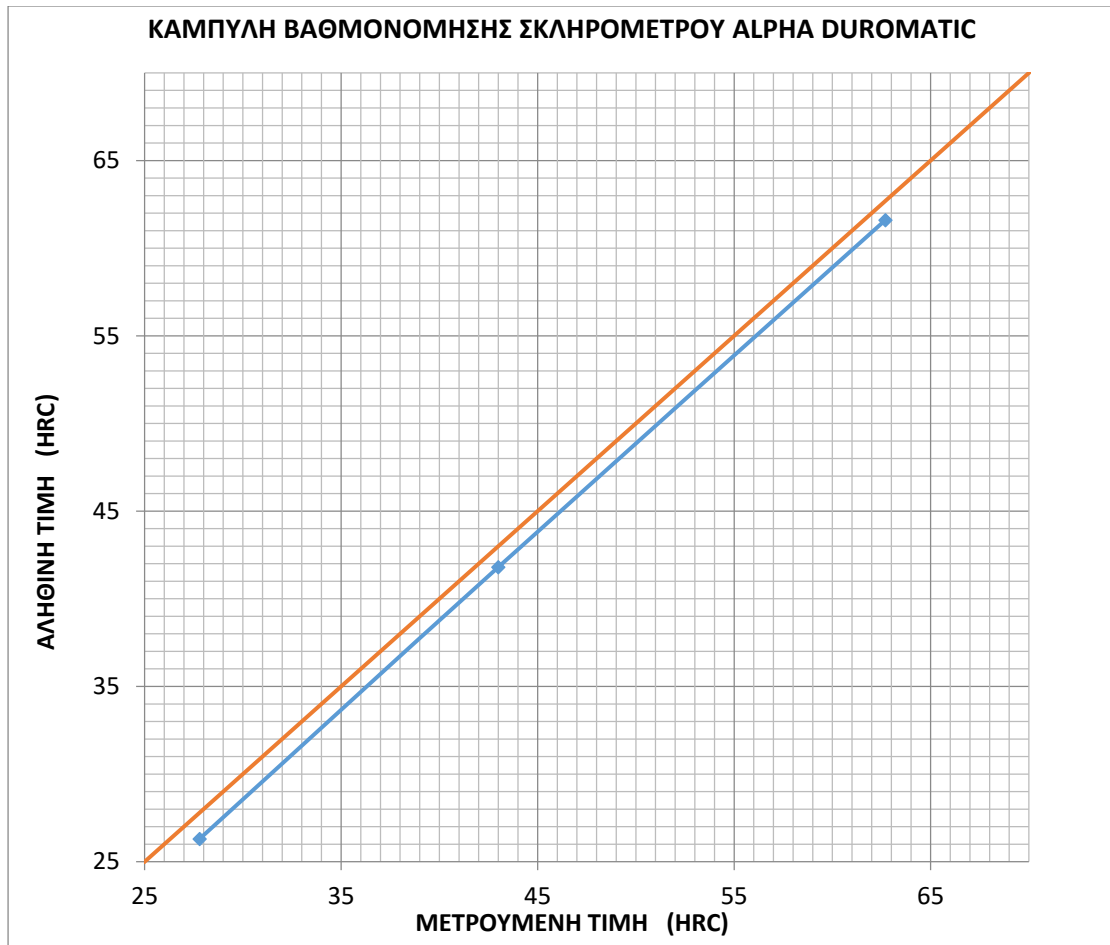
Σφάλμα E: $\bar{H} - H_{\text{STD}} = 27,8 - 26,3 = 1,5 \text{ HRC}$

$$\bar{H} - H_{\text{STD}} = 43,0 - 41,8 = 1,2 \text{ HRC}$$

$$\bar{H} - H_{\text{STD}} = 62,7 - 61,6 = 1,1 \text{ HRC}$$

Οι τιμές του σφάλματος για τα τρία εύρη τιμών σκληρότητας της μεθόδου Rockwell C είναι εκτός ορίων, ωστόσο επειδή η επαναληψιμότητα είναι εντός ορίων, διορθώνουμε κανονικά.

Η καμπύλη διόρθωσης του σκληρομέτρου, προκύπτει από τις ονομαστικές τιμές της σκληρότητας των προτύπων δοκιμίων, και από τον μέσο όρο των μετρούμενων τιμών πάνω σε αυτό.



Εικόνα 6.1.1: Καμπύλη διόρθωσης σκληρομέτρου Alpha Duromatic

6.2 Μετρήσεις Σκληρότητας Εξεταζόμενων Δοκιμίων

Οι αρχικές τιμές που ελήφθησαν για τα έξι δοκίμια παρουσιάζονται στον Πίνακα:

Πίνακας 6.2.1: Πρωτογενείς μετρήσεις υπό εξέταση δοκιμίων

ΥΛΙΚΟ	ΤΙΜΕΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (HRC)					
Calmax	58	59	58	59	59	59
Unimax	57	59	59	59	58	59
Nimax	37	38	38	38	38	38
Viking	59	60	60	60	60	59
Sverker 3	62	62	62	63	63	63
Orvar Supreme	53	54	54	53	52	52

Με την διόρθωση των τιμών από την καμπύλη βαθμονόμησης, οι νέες τιμές είναι πλέον οι ακόλουθες:

Πίνακας 6.2.2: Διορθωμένες τιμές υπό εξέταση δοκιμίων

ΥΛΙΚΟ	ΤΙΜΕΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (HRC)					
Calmax	56,9	57,9	56,9	57,9	57,9	57,9
Unimax	55,9	57,9	57,9	57,9	56,9	57,9
Nimax	35,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
Viking	57,9	58,9	58,9	58,9	58,9	57,9
Sverker 3	60,9	60,9	60,9	61,9	61,9	61,9
Orvar Supreme	51,8	52,8	52,8	51,8	50,8	50,8

Συνεπώς, υπολογίζονται τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη (υποδειγματικοί υπολογισμοί για τις μετρήσεις του υλικού Calmax) :

- Λαμβάνεται από πίνακα κατανομής Student ο συντελεστής t ίσος με 2,015
- Μέση τιμή $\bar{\mu}$: $\bar{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{345,4}{6} = 57,57$
- Τυπική απόκλιση s: $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{\mu})^2}{n-1}} =$

$$\sqrt{\frac{(56,9-57,57)^2+(57,9-57,57)^2+(56,9-57,57)^2+(57,9-57,57)^2+(57,9-57,57)^2+(57,9-57,57)^2}{5}} =$$

$$\sqrt{\frac{0,4489+0,1089+0,4489+0,1089+0,1089+0,1089}{5}} = \sqrt{\frac{1,3334}{5}} = 0,52$$
- 90% Διάστημα Εμπιστοσύνης Μέσης τιμής δ : $\delta = \bar{\mu} \pm t_{0,95,5} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} =$

$$57,57 \pm 2,015 \cdot \frac{0,5164}{\sqrt{6}} = 57,57 \pm 0,4248 = [57,1, 58,00]$$

Πίνακας 6.2.3: Στατιστικά μεγέθη κάθε υλικού

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ $\bar{\mu}$	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ s	90%ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ δ
Calmax	57,57	0,52	[57,1, 58,0]
Unimax	57,40	0,84	[56,7, 58,1]
Nimax	36,63	0,41	[36,3, 37,0]
Viking	58,53	0,50	[58,1, 58,9]
Sverker 3	61,40	0,55	[61,0, 61,9]
Orvar Supreme	51,80	0,89	[51,1, 52,5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Στα δοκίμια της δεύτερης σειράς τα οποία εγκιβωτίστηκαν, λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας στο σκληρόμετρο Shimadzu 341-64278 του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, το οποίο μετράει με την μέθοδο HV0,2, μετά την βαθμονόμησή του. Η βαθμονόμηση και επεξεργασία των μετρήσεων έγιναν βάσει του προτύπου ASTM E384-17.

7.1 Πρωτογενείς μετρήσεις

Πίνακας 7.1: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Calmax

Διάμετροι (μm)		
CALMAX	d1=	24,1
	d2=	23,9
	d1=	24,3
	d2=	23,9
	d1=	23,8
	d2=	24,1
	d1=	24,1
	d2=	24,1
	d1=	24,3
	d2=	24,3

Πίνακας 7.2: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Unimax

Διάμετροι (μm)		
UNIMAX	d1=	24,2
	d2=	24,8
	d1=	24,1
	d2=	24,5
	d1=	24,6
	d2=	24,1
	d1=	24,1
	d2=	24,2
	d1=	24,2
	d2=	24,7
	d1=	24,7
	d2=	24,7

Πίνακας 7.3: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Nimax

Διάμετροι (μm)		
NIMAX	d1=	34,5
	d2=	34,2
	d1=	34,6
	d2=	33,4
	d1=	34,1
	d2=	33,4
	d1=	34,1
	d2=	33,7
	d1=	34,9
	d2=	33,6
	d1=	32,9
	d2=	33,8

Πίνακας 7.4: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Viking

Διάμετροι (μm)		
VIKING	d1=	24,2
	d2=	23,5
	d1=	24,3
	d2=	23,6
	d1=	24,2
	d2=	23,8
	d1=	24,5
	d2=	23,9
	d1=	23,8
	d2=	23,7
	d1=	24,6
	d2=	24,3

Πίνακας 7.5: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Sverker 3

Διάμετροι (μm)		
SVERKER 3	d1=	22
	d2=	22,2
	d1=	23,3
	d2=	21,8
	d1=	21,4
	d2=	21,6
	d1=	22
	d2=	22,1
	d1=	22,1
	d2=	21,8

Πίνακας 7.6: Πρωτογενείς μετρήσεις δοκιμίου Orvar Supreme

Διάμετροι (μm)		
ORVAR SUPREME	d1=	27,1
	d2=	26,4
	d1=	27
	d2=	26,4
	d1=	27,3
	d2=	27,1
	d1=	26,8
	d2=	26,8
	d1=	26,4
	d2=	26,4

7.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Αρχικά, υπολογίστηκε η μέση τιμή των διαμέτρων του αποτυπώματος και στη συνέχεια, μέσω του τύπου $HV=1,8544*(0,2/(D/1000))^2$ υπολογίστηκε η τιμή μικροσκληρότητας σε Vickers.

Πίνακας 7.2.1: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Calmax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας	
CALMAX	d1=	24,1	24	643,9
	d2=	23,9		
	d1=	24,3	24,1	638,6
	d2=	23,9		
	d1=	23,8	23,95	646,6
	d2=	24,1		
	d1=	24,1	24,1	638,6
	d2=	24,1		
d1=	24,3	24,3	628,1	
d2=	24,3			

Πίνακας 7.2.2: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Unimax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας	
UNIMAX	d1=	24,2	24,5	617,9
	d2=	24,8		
	d1=	24,1	24,3	628,1
	d2=	24,5		
	d1=	24,6	24,35	625,5
	d2=	24,1		
	d1=	24,1	24,15	635,9
	d2=	24,2		
	d1=	24,2	24,45	620,4
	d2=	24,7		
	d1=	24,7	24,7	607,9
	d2=	24,7		

Πίνακας 7.2.3: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Nimax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας
NIMAX	d1=	34,5	34,35
	d2=	34,2	
	d1=	34,6	34
	d2=	33,4	
	d1=	34,1	33,75
	d2=	33,4	
	d1=	34,1	33,9
	d2=	33,7	
	d1=	34,9	34,25
	d2=	33,6	
	d1=	32,9	33,35
	d2=	33,8	

Πίνακας 7.2.4: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Viking σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας
VIKING	d1=	24,2	23,85
	d2=	23,5	
	d1=	24,3	23,95
	d2=	23,6	
	d1=	24,2	24
	d2=	23,8	
	d1=	24,5	24,2
	d2=	23,9	
	d1=	23,8	23,75
	d2=	23,7	
	d1=	24,6	24,45
	d2=	24,3	

Πίνακας 7.2.5: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Sverker 3 σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας	
SVERKER 3	d1=	22	22,1	759,4
	d2=	22,2		
	d1=	23,3	22,55	729,4
	d2=	21,8		
	d1=	21,4	21,5	802,3
	d2=	21,6		
	d1=	22	22,05	762,8
	d2=	22,1		
	d1=	22,1	21,95	769,8
	d2=	21,8		

Πίνακας 7.2.6: Τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Orvar Supreme σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Τιμή Μικροσκληρότητας	
ORVAR SUPREME	d1=	27,1	26,75	518,3
	d2=	26,4		
	d1=	27	26,7	520,2
	d2=	26,4		
	d1=	27,3	27,2	501,3
	d2=	27,1		
	d1=	26,8	26,8	516,4
	d2=	26,8		
	d1=	26,4	26,4	532,1
	d2=	26,4		

7.3 Διόρθωση

Από την καμπύλη βαθμονόμησης του μικροσκληρομέτρου, προκύπτει ότι η εξίσωση διόρθωσης των τιμών είναι η $y=0.9712x+30.684$. Επομένως, οι διορθωμένες τιμές της μικροσκληρότητας πλέον είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 7.3.1: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Calmax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
CALMAX	d1=	24,1	24	643,9	656,0
	d2=	23,9			
	d1=	24,3	24,1	638,6	650,9
	d2=	23,9			
	d1=	23,8	23,95	646,6	658,6
	d2=	24,1			
	d1=	24,1	24,1	638,6	650,9
	d2=	24,1			
	d1=	24,3	24,3	628,1	640,7
	d2=	24,3			

Πίνακας 7.3.2: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Unimax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
UNIMAX	d1=	24,2	24,5	617,9	630,8
	d2=	24,8			
	d1=	24,1	24,3	628,1	640,7
	d2=	24,5			
	d1=	24,6	24,35	625,5	638,2
	d2=	24,1			
	d1=	24,1	24,15	635,9	648,3
	d2=	24,2			
	d1=	24,2	24,45	620,4	633,2
	d2=	24,7			
	d1=	24,7	24,7	607,9	621,1
	d2=	24,7			

Πίνακας 7.3.3: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Nimax σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
NIMAX	d1=	34,5	34,35	314,3	336,0
	d2=	34,2			
	d1=	34,6	34	320,8	342,3
	d2=	33,4			
	d1=	34,1	33,75	325,6	346,9
	d2=	33,4			
	d1=	34,1	33,9	322,7	344,1
	d2=	33,7			
	d1=	34,9	34,25	316,2	337,7
	d2=	33,6			
d1=	32,9	33,35	333,5	354,5	
d2=	33,8				

Πίνακας 7.3.4: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Viking σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
VIKING	d1=	24,2	23,85	652,0	663,9
	d2=	23,5			
	d1=	24,3	23,95	646,6	658,6
	d2=	23,6			
	d1=	24,2	24	643,9	656,0
	d2=	23,8			
	d1=	24,5	24,2	633,3	645,7
	d2=	23,9			
	d1=	23,8	23,75	657,5	669,3
	d2=	23,7			
	d1=	24,6	24,45	620,4	633,2
	d2=	24,3			

Πίνακας 7.3.5: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Sverker 3 σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
SVERKER 3	d1=	22	22,1	759,4	768,2
	d2=	22,2			
	d1=	23,3	22,55	729,4	739,0
	d2=	21,8			
	d1=	21,4	21,5	802,3	809,9
	d2=	21,6			
	d1=	22	22,05	762,8	771,5
	d2=	22,1			
	d1=	22,1	21,95	769,8	778,3
	d2=	21,8			

Πίνακας 7.3.6: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Orvar Supreme σε HV 0,2

Διάμετροι (μm)		Μέση Τιμή	Μετρούμενη Τιμή Μικροσκληρότητας	Διορθωμένη Τιμή Μικροσκληρότητας	
ORVAR SUPREME	d1=	27,1	26,75	518,3	534,1
	d2=	26,4			
	d1=	27	26,7	520,2	535,9
	d2=	26,4			
	d1=	27,3	27,2	501,3	517,5
	d2=	27,1			
	d1=	26,8	26,8	516,4	532,2
	d2=	26,8			
	d1=	26,4	26,4	532,1	547,5
	d2=	26,4			

Ομοίως με την μακροσκληρότητα, υπολογίζονται τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη (υποδειγματικοί υπολογισμοί για τις μετρήσεις του υλικού Calmax) :

- Λαμβάνεται από πίνακα κατανομής Student ο συντελεστής t ίσος με 2,132 για 5 μετρήσεις (2,015 για 6 μετρήσεις)
- Μέση τιμή $\bar{\mu}$: $\bar{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{3257,1}{5} = 651,42$
- Τυπική απόκλιση s : $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{\mu})^2}{n-1}} =$

$$\sqrt{\frac{(656-651,4)^2 + (650,9-651,4)^2 + (658,6-651,4)^2 + (650,9-651,4)^2 + (640,7-651,4)^2}{4}} =$$

$$\sqrt{\frac{21,16 + 0,25 + 51,84 + 0,25 + 114,49}{4}} = \sqrt{\frac{187,99}{4}} = 6,9$$
- 90% Διάστημα Εμπιστοσύνης Μέσης τιμής δ : $\delta = \bar{\mu} \pm t_{0,95,5} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} =$

$$651,4 \pm 2,132 \cdot \frac{6,9}{\sqrt{5}} = 651,4 \pm 6,58 = [644,82 , 657,98]$$

Πίνακας 7.3.7: Στατιστικά μεγέθη κάθε υλικού

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ $\bar{\mu}$	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ s	90% ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ δ
Calmax	651,4	6,9	[644,8 , 656,0]
Unimax	635,4	9,3	[645,7 , 661,0]
Nimax	343,6	6,7	[338,1 , 349,1]
Viking	654,5	13,7	[643,2 , 665,8]
Sverker 3	773,4	25,3	[749,3 , 797,5]
Orvar Supreme	533,4	10,7	[523,2 , 543,6]

7.4 Μετατροπή των τιμών της κλίμακας Vickers σε Rockwell C

Πίνακας 7.3.1: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Calmax σε HRC

CALMAX	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
	656,0	58,1
	650,9	57,9
	658,6	58,3
	650,9	57,9
	640,7	57,4

Πίνακας 7.3.2: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Unimax σε HRC

UNIMAX	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
	630,8	56,9
	640,7	57,4
	638,2	57,3
	648,3	57,8
	633,2	57,0
	621,1	56,4

Πίνακας 7.3.3: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Nimax σε HRC

NIMAX	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
	336,0	34,1
	342,3	34,7
	346,9	35,2
	344,1	34,9
	337,7	34,2
	354,5	36,1

Πίνακας 7.3.4: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Viking σε HRC

VIKING	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
	663,9	58,5
	658,6	58,3
	656,0	58,1
	645,7	57,6
	669,3	58,8
	633,2	57,0

Πίνακας 7.3.5: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Sverker 3 σε HRC

	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
SVERKER 3	768,2	62,9
	739,0	61,7
	809,9	64,3
	771,5	63,0
	778,3	63,2

Πίνακας 7.3.6: Διορθωμένες τιμές μικροσκληρότητας δοκιμίου Orvar Supreme σε HRC

	Τιμή HV 0,2	Τιμή HRC
ORVAR SUPREME	534,1	51,4
	535,9	51,5
	517,5	50,3
	532,2	51,3
	547,5	52,2

Πίνακας 7.3.7: Στατιστικά Μεγέθη κάθε υλικού σε μονάδες hrc

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ $\bar{\mu}$	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ s	90%ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ δ
Calmax	57,9	0,33	[57,6 , 58,2]
Unimax	57,1	0,48	[56,7 , 57,5]
Nimax	34,8	0,73	[34,2 , 35,4]
Viking	58,1	0,65	[57,6 , 58,6]
Sverker 3	63,1	0,93	[62,2 , 64,0]
Orvar Supreme	51,3	0,68	[50,7 , 51,9]

- Λαμβάνεται από πίνακα κατανομής Student ο συντελεστής t ίσος με 2,132 για 5 μετρήσεις (2,015 για 6 μετρήσεις)
- Μέση τιμή $\bar{\mu}$: $\bar{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{289,6}{5} = 57,9$
- Τυπική απόκλιση s : $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{\mu})^2}{n-1}} =$
 $\sqrt{\frac{(58,1-57,9)^2 + (57,9-57,9)^2 + (58,3-57,9)^2 + (57,9-57,9)^2 + (57,4-57,9)^2}{4}} =$
 $\sqrt{\frac{0,04+0,00+0,16+0,00+0,25}{4}} = \sqrt{\frac{0,45}{4}} = 0,33$
- 90% Διάστημα Εμπιστοσύνης Μέσης τιμής δ : $\delta = \bar{\mu} \pm t_{0,95,5} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} =$
 $57,9 \pm 2,132 \cdot \frac{0,33}{\sqrt{5}} = 57,9 \pm 0,31 = [57,6 , 58,2]$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

8. ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

Για την μελέτη μικροδομής, τα δοκίμια της δεύτερης σειράς μετά την υποβολή τους σε μετρήσεις μικροσκληρότητας, έπρεπε να προσβληθούν χημικά για την παρατήρηση της μικροδομής τους σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο με ταυτόχρονη λήψη φωτογραφιών σε διάφορες μεγεθύνσεις.

8.1 Χημική προσβολή

Τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε χημική προσβολή με το διάλυμα Picral, το οποίο αποτελείται από 5 ml υδροχλώριο (HCl), 30 ml πικρικό οξύ (Picric Acid) και 100 ml μεθανόλη (CH₄). Οι χρόνοι προσβολής του κάθε εργαλειογάλυβα φαίνονται στον πίνακα 8.1.1.

Το δοκίμιο Viking επειδή με το διάλυμα Picral διαβρωνόταν γρήγορα η επιφάνειά του, στίλβώθηκε εκ νέου στα δύο τελευταία στάδια της στίλβωσης και στην συνέχεια προσεβλήθη με διάλυμα Nital.

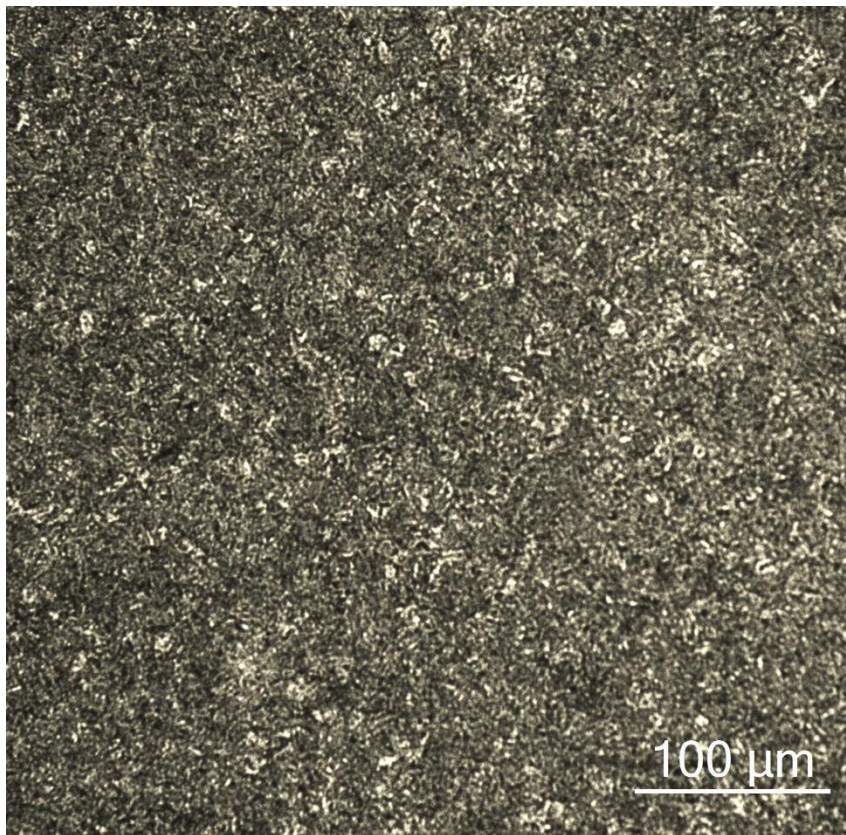
Πίνακας 8.1.1: Χρόνοι χημικής προσβολής κάθε δοκιμίου

ΥΛΙΚΟ	ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ
Calmax	1 min, 4 sec
Unimax	25 sec
Nimax	1 min, 3 sec
Viking	45 sec
Sverker 3	20 sec
Orvar Supreme	22 sec

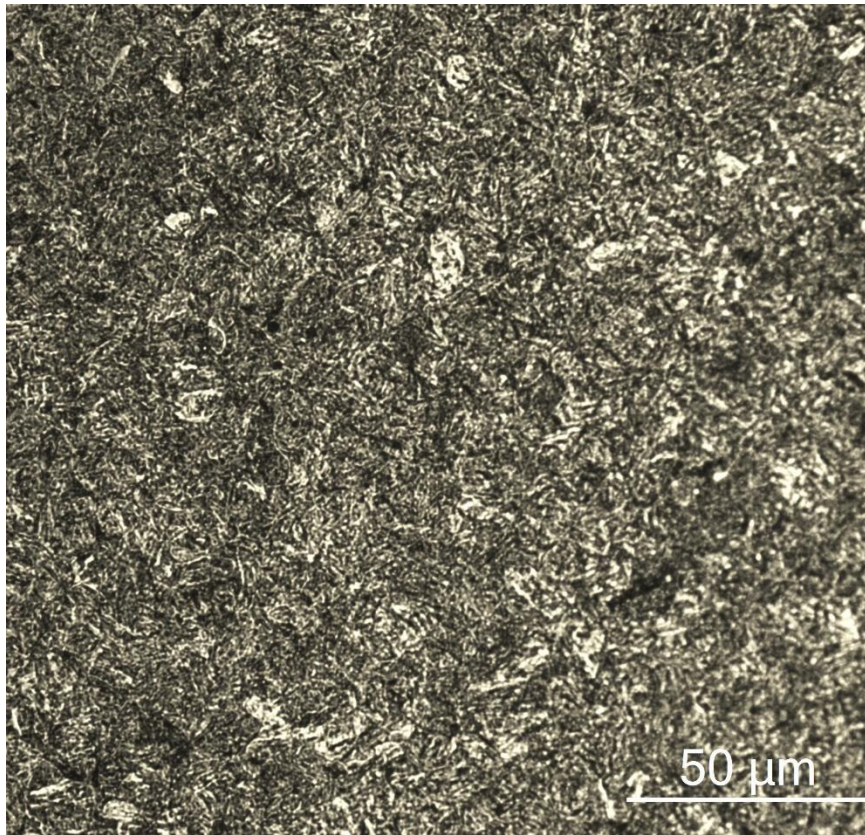
8.2 Οπτική Μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία έγινε με το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων αντικειμενικών φακών Zeiss Axio του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ελήφθησαν φωτογραφίες σε μεγεθύνσεις $\times 200$, $\times 500$ και $\times 1000$.

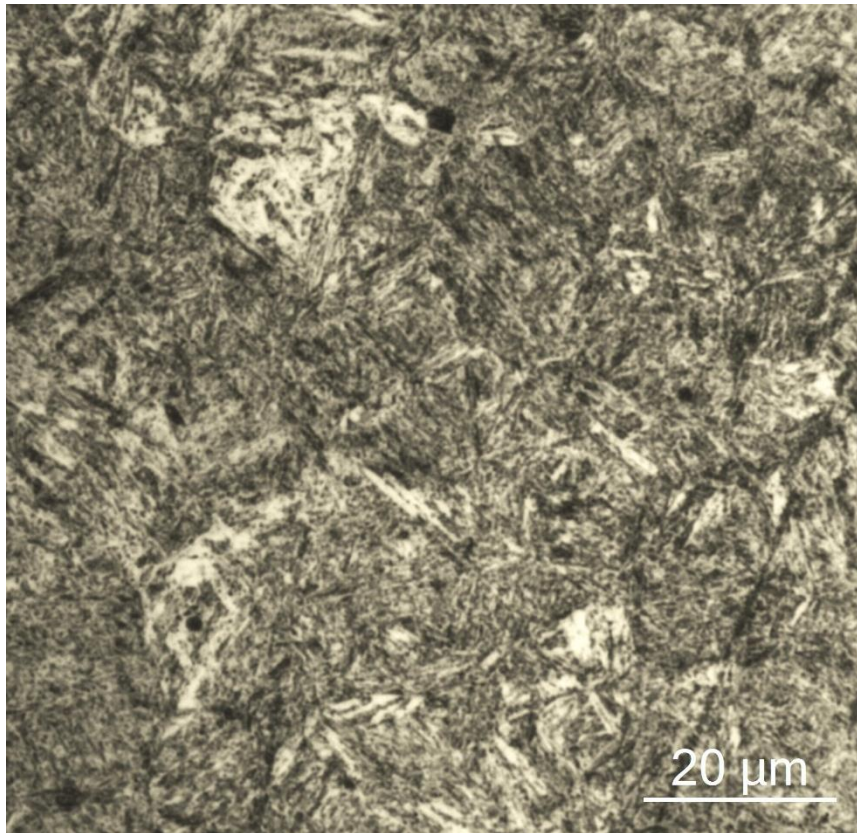
8.2.1 Uddeholm Calmax



Εικόνα 8.2.1.1: Μικροδομή δοκιμίου Calmax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.1.2: Μικροδομή δοκιμίου Calmax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



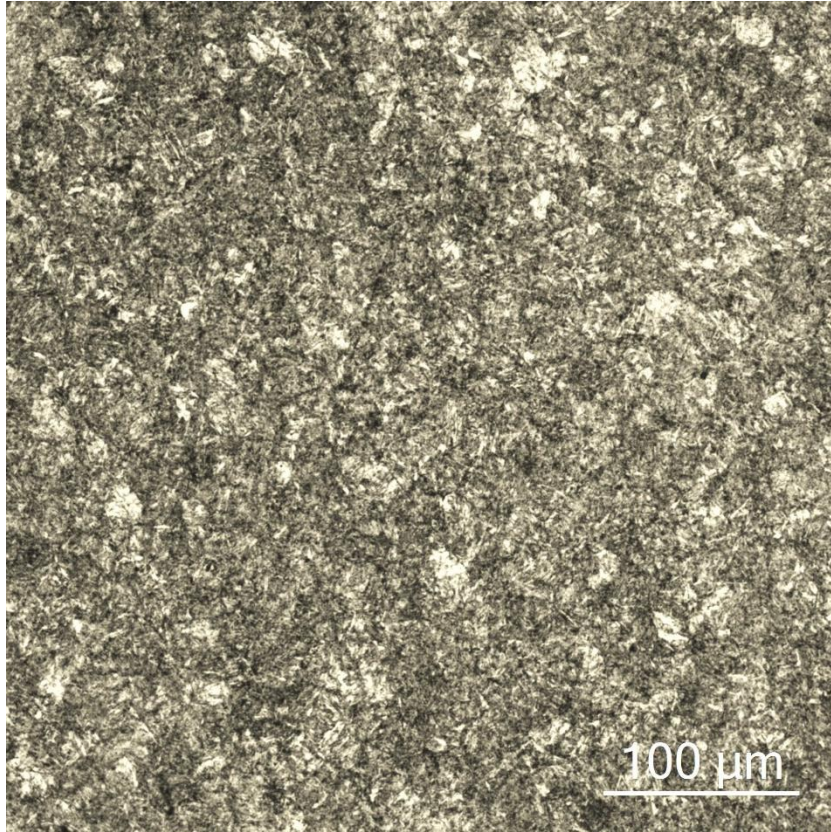
Εικόνα 8.2.1.3: Μικροδομή δοκιμίου Calmax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

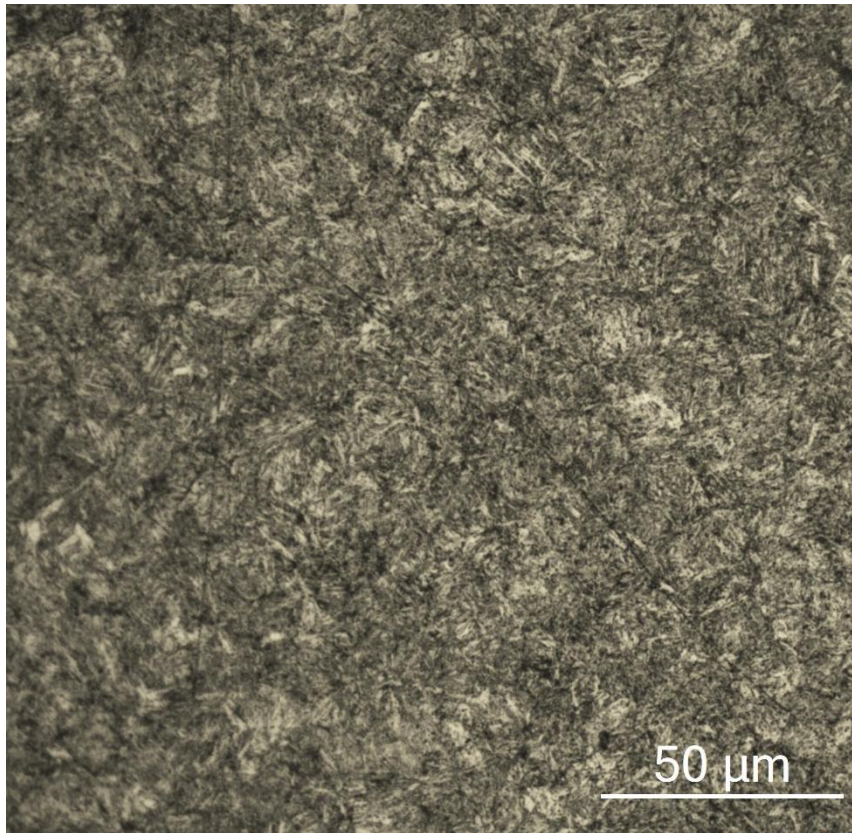
- Μήτρα: επαναφερμένος μαρτενσίτης
- Ομοιόμορφα κατανεμημένα Καρβίδια Cr (μεγαλύτερα), Mo και V (σφαιρικά)

Ομοιογενής δομή, δεν υπάρχουν ενδείξεις ύπαρξης RA (παραμένοντος ωστενίτη).

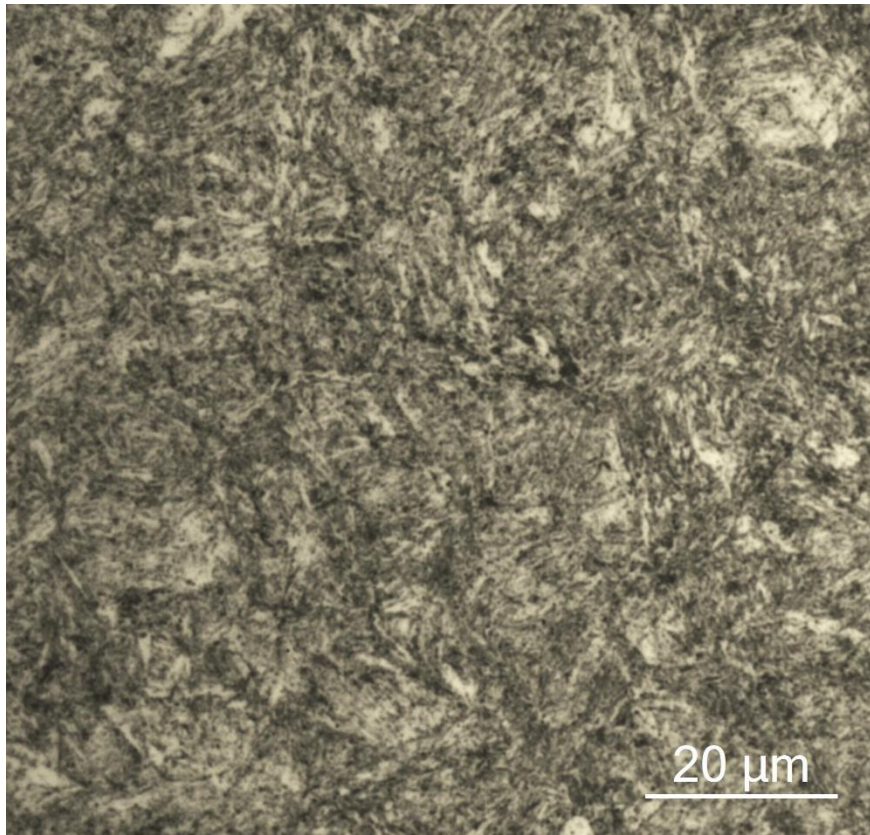
8.2.2 Uddeholm Unimax



Εικόνα 8.2.2.1: Μικροδομή δοκιμίου Unimax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.2.2: Μικροδομή δοκιμίου Unimax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



Εικόνα 8.2.2.3: Μικροδομή δοκιμίου Unimax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

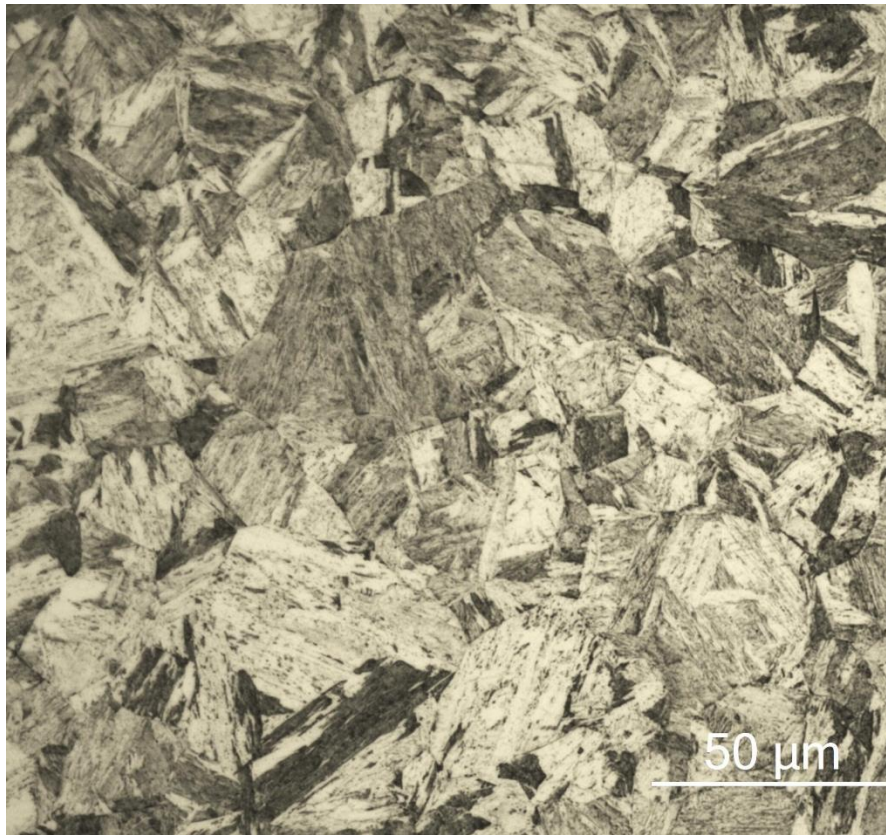
- Μήτρα: επαναφερόμενος μαρτενσίτης
- Ομοιομορφα κατανεμημένα Καρβίδια Cr (μεγαλύτερα), Mo και V (σφαιρικά)

Ομοιογενής δομή, δεν υπάρχουν ενδείξεις ύπαρξης RA.

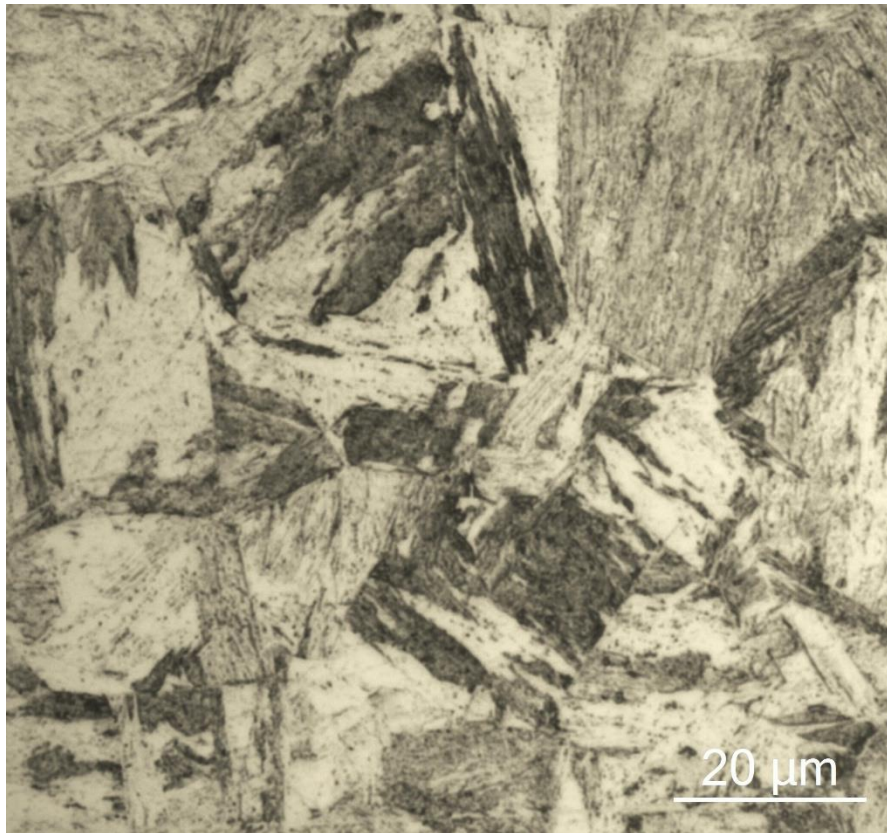
8.2.3 Uddeholm Nimax



Εικόνα 8.2.3.1: Μικροδομή δοκμίου Nimax μετά από λείανση, στίβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.3.2: Μικροδομή δοκμίου Nimax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



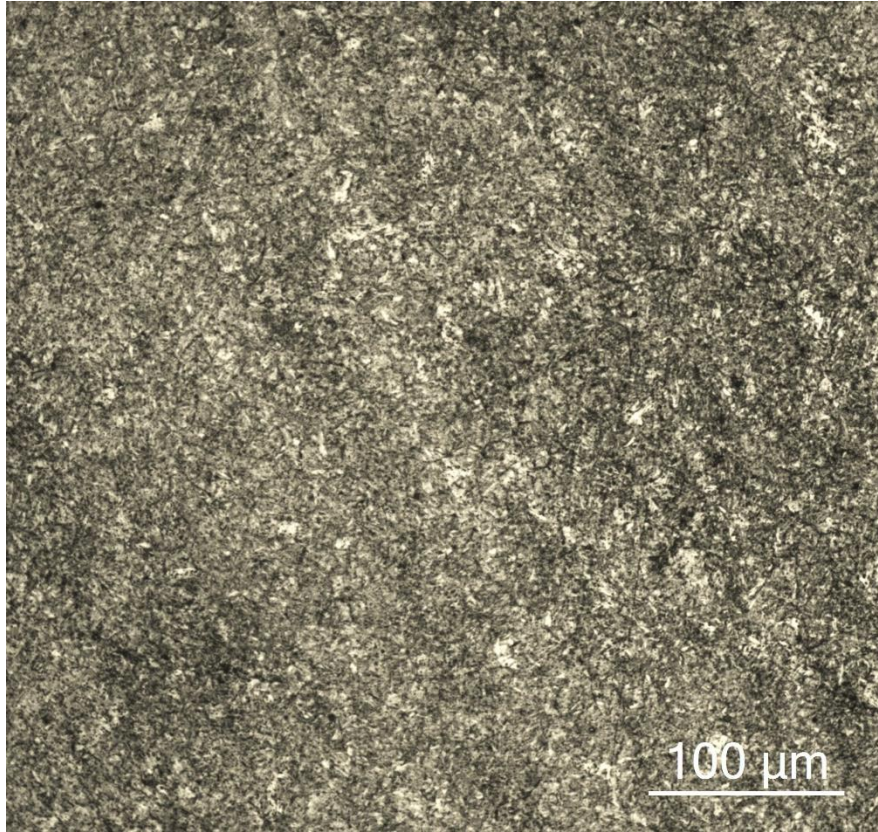
Εικόνα 8.2.3.3: Μικροδομή δοκιμίου Nimax μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

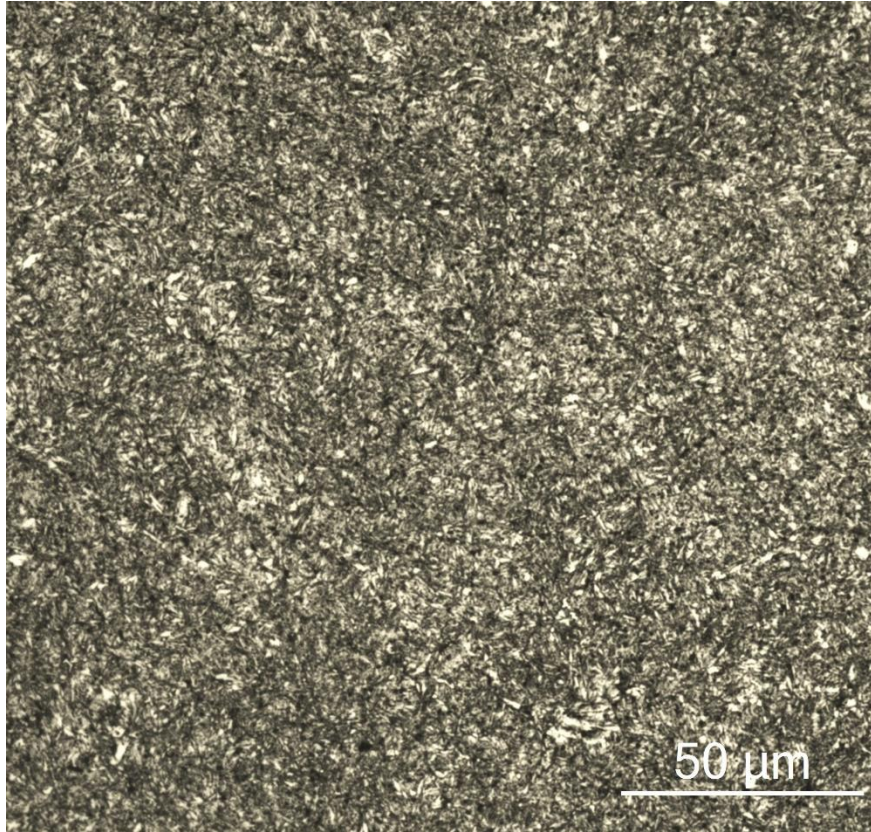
- Μπαινίτη
- Φερρίτη
- Περλίτη

Τρεις φάσεις ομοιόμορφα καταναμημένες.

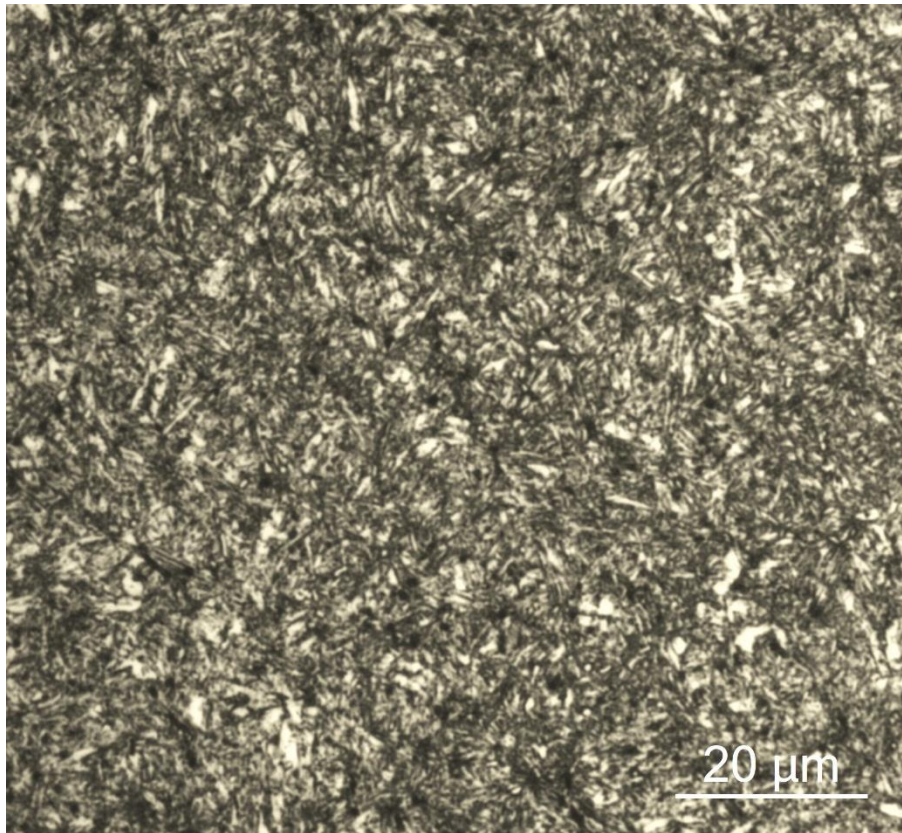
8.2.4 Uddeholm Viking



Εικόνα 8.2.4.1: Μικροδομή δοκιμίου Viking μετά από λείανση, στύβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.4.2: Μικροδομή δοκμίου Viking μετά από λείανση, στίβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



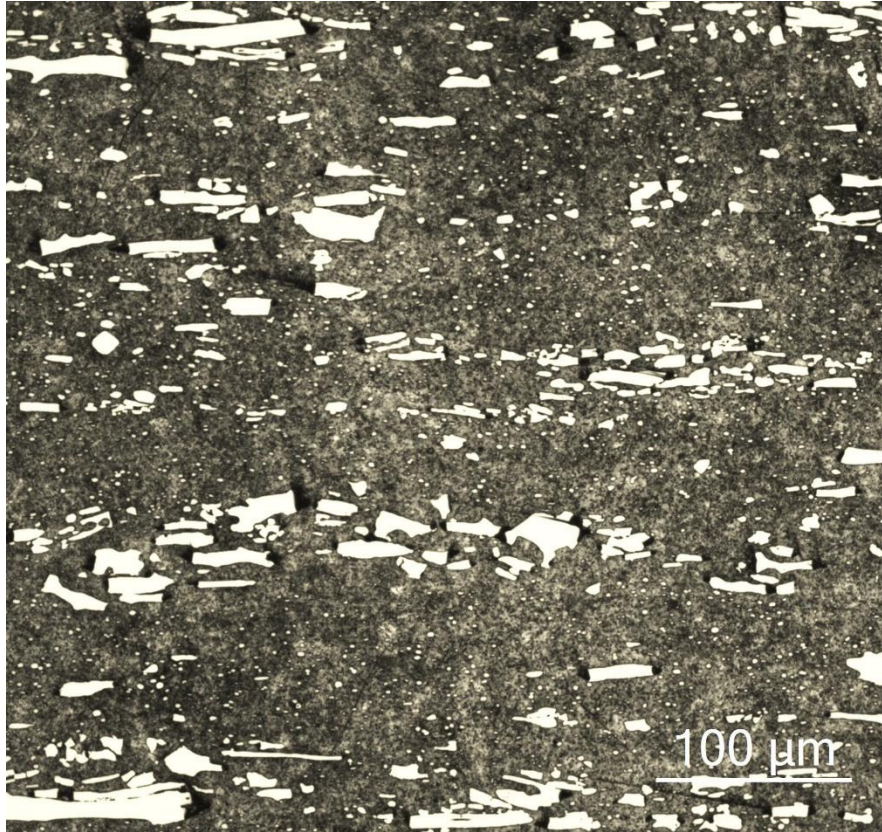
Εικόνα 8.2.4.3: Μικροδομή δοκιμίου Viking μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

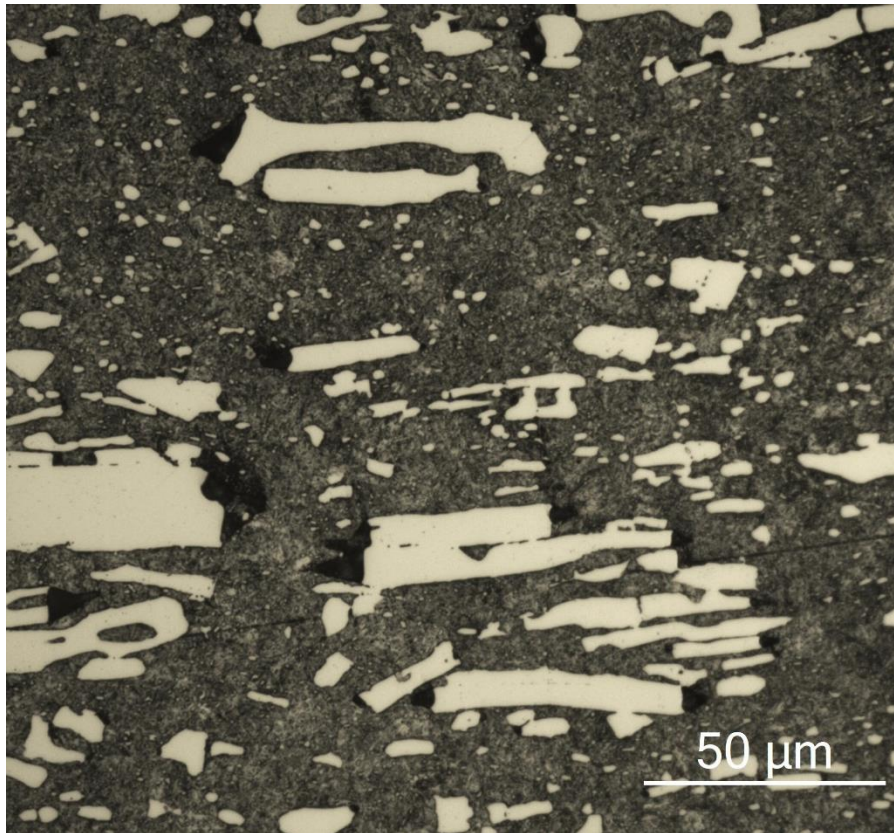
- Μήτρα: επαναφερμένος μαρτενσίτης
- Ομοιομορφα κατανεμημένα Καρβίδια Cr (μεγαλύτερα), Mo και V (σφαιρικά)

Ομοιογενής δομή, δεν υπάρχουν ενδείξεις ύπαρξης RA.

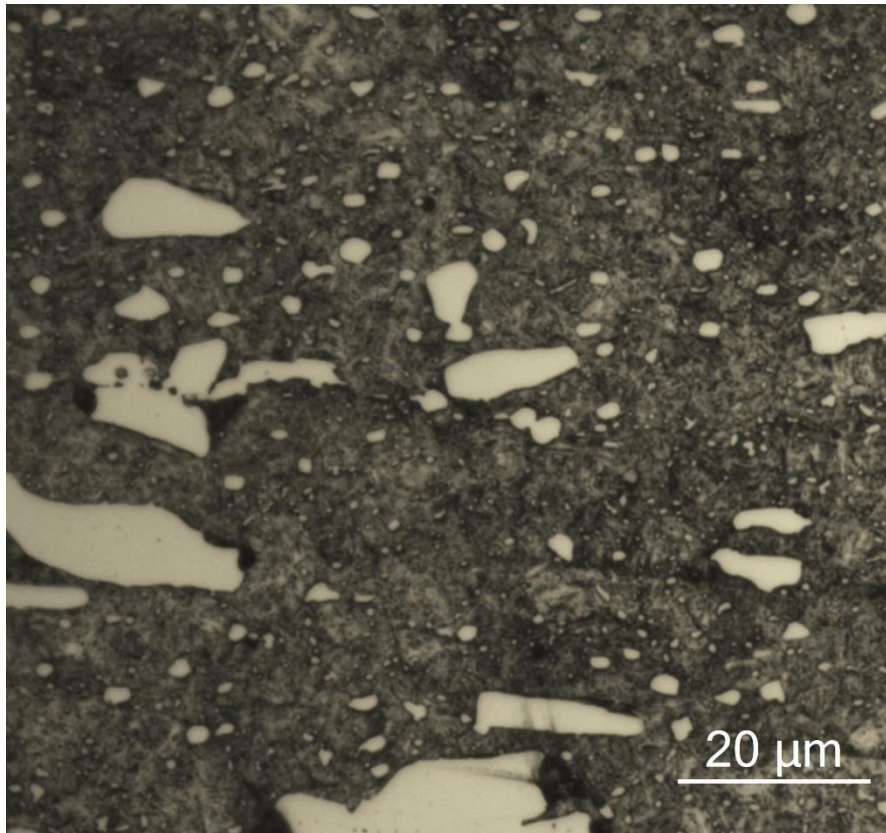
8.2.5 Uddeholm Sverker 3



Εικόνα 8.2.5.1: Μικροδομή δοκιμίου Sverker 3 μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.5.2: Μικροδομή δοκιμίου Sverker 3 μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



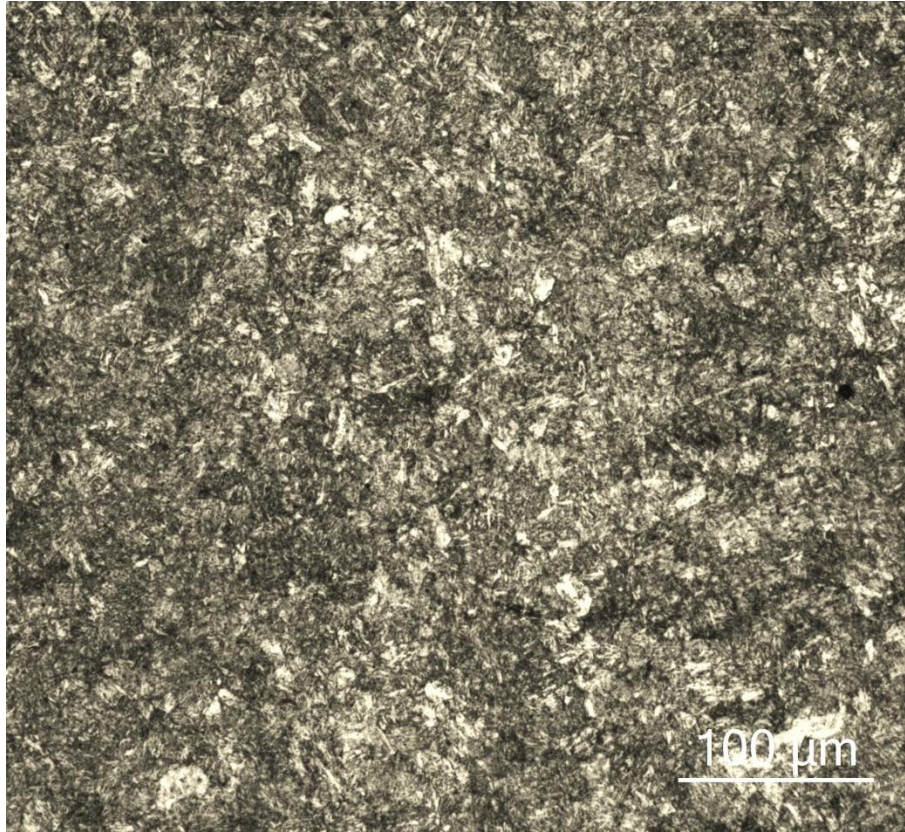
Εικόνα 8.2.5.3: Μικροδομή δοκιμίου Sverker 3 μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

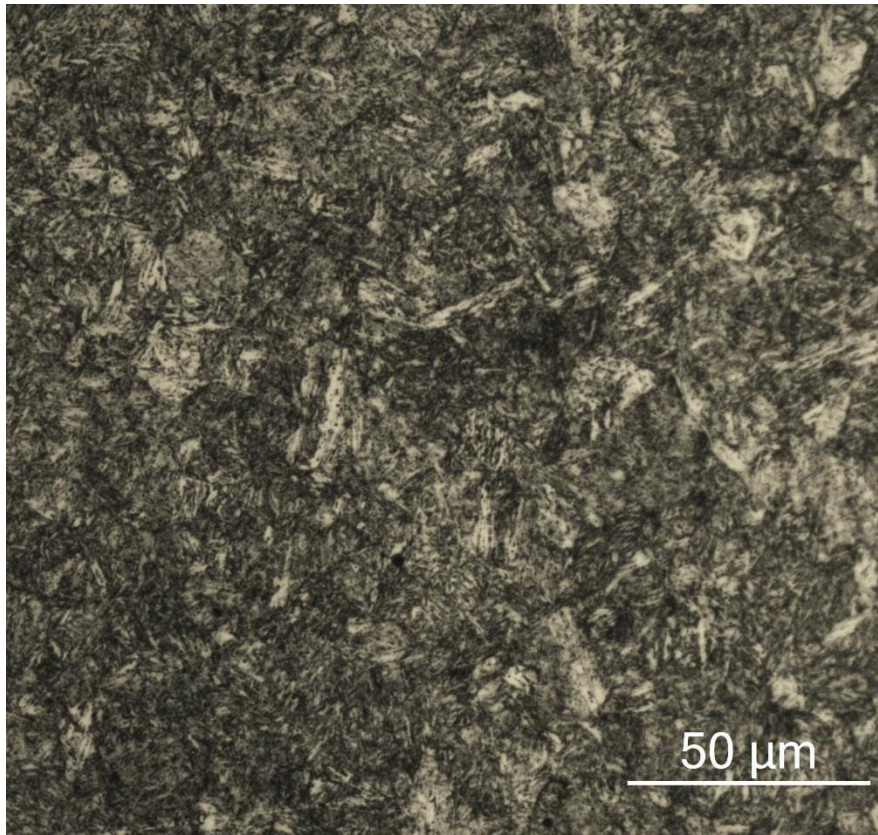
- Μήτρα: επαναφερμένος μαρτενσίτης
- Πρωτογενή Καρβίδια: Cr (πλατέα) και W (σφαιρικά)

Λόγω χημικής σύστασης τα καρβίδια που σχηματίστηκαν κατά την παρασκευή του χάλυβα διαστρωματώνονται και μένουν αδιάλυτα στη δομή.

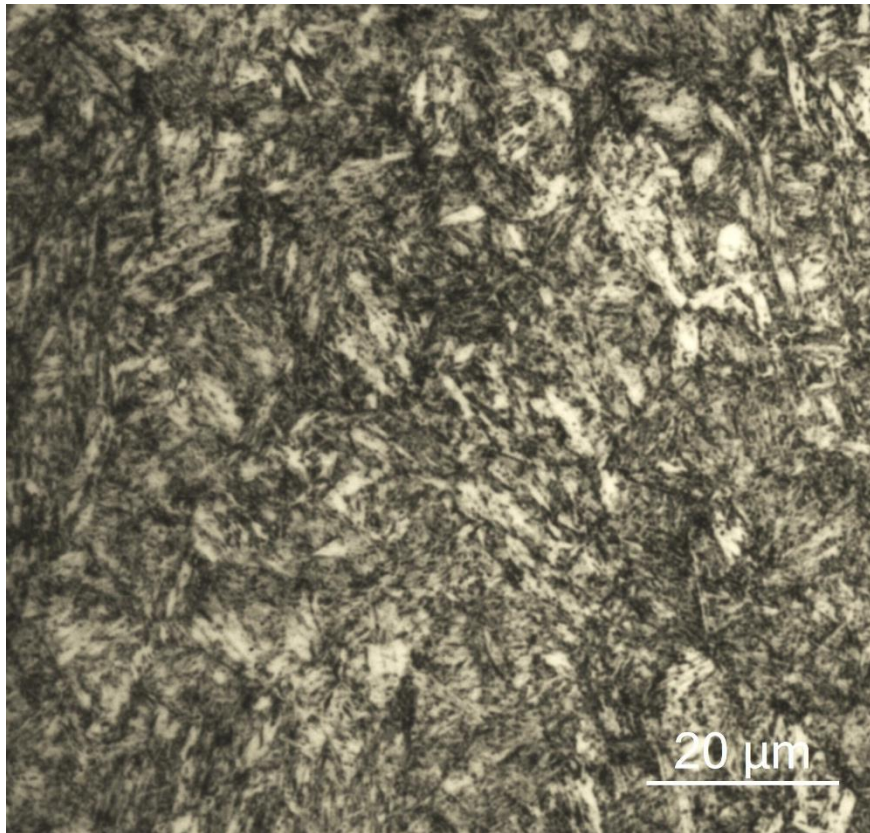
8.2.6 Uddeholm Orvar Supreme



Εικόνα 8.2.6.1: Μικροδομή δοκιμίου Orvar Supreme μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 200$.



Εικόνα 8.2.6.2: Μικροδομή δοκιμίου Orvar Supreme μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 500$.



Εικόνα 8.2.6.3: Μικροδομή δοκιμίου Orvar Supreme μετά από λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Μεγέθυνση $\times 1000$.

Η μικροδομή του αποτελείται από:

- Μήτρα: επαναφερμένος μαρτενσίτης
- Ομοιόμορφα κατανεμημένα Καρβίδια Cr (μεγαλύτερα), Mo και V (σφαιρικά)

Ομοιογενής δομή, δεν υπάρχουν ενδείξεις ύπαρξης RA.

ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι θερμικές κατεργασίες που υπέστησαν οι εργαλειοχάλυβες ανήκουν στην κατηγορία της ήπιας κρυογενικής κατεργασίας, η οποία φαίνεται να επιτέλεσε το ρόλο της αφού:
 - οι μικροδομές σε όλες τις περιπτώσεις είναι ομοιογενείς ως προς την κατανομή των φάσεων και των καρβιδίων,
 - έχει εξαιρεθεί ο RA (παραμένον ωστενίτης), γεγονός το οποίο ενισχύεται μακροσκοπικά από το πολύ μικρό εύρος σκληρότητας, αλλά και από το γεγονός ότι η σκληρότητα είναι 1-3 HRC μεγαλύτερη από την αντίστοιχη περίπτωση συμβατικής θερμικής κατεργασίας των υλικών, χωρίς παραμονή σε υπομηδενικές συνθήκες.
- Από τη μελέτη της μικροδομής, στις περιπτώσεις επαναφορών μόνο στους 180°C, είναι πιθανή η ύπαρξη μετασταθών η-καρβιδίων. Απαιτείται μελέτη SEM που είναι και η μελλοντική ενέργεια για την εξέλιξη της μελέτης.
- Τα οφέλη της ήπιας κρυογενούς κατεργασίας που πραγματοποιήθηκε στα υλικά αναμένεται να αναδειχθεί μετά από μηχανικές δοκιμές κρούσης και αντοχής στην τριβή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Π., 2008. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [2] Anon., n.d. [Ηλεκτρονικό] Available at:
<https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM106/%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%20%CE%A4%CE%95%CE%A4%CE%91%CE%A1%CE%A4%CE%9F/L9%20SIDHROUXA%20KRAMATA%20E%CE%A0%CE%99%CE%94%CE%A1%CE%91%CE%A3%CE%97%20%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%99%CE%A7%CE%95%CE%99>
[Πρόσβαση November 2020].
- [3] Roberts, G., Krauss, G. & Kennedy, R., 1998. *Tool Steels:5th edition*. s.l.:s.n.
- [4] <http://uddeholm.gr/portal/10022-Company.aspx>
- [5] International, A., 2015. *ASTM A 681-08 (2015)*. s.l.:s.n.
- [6] Mesquita, R. A. (2017). *Tool Steels: Properties and performance*. CRC Press taylor & francis group.
- [7] Canale, L.C. F., Mesquita, R. A. και Totten, G. E. *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. Ohio : ASM International, 2008.
- [8] *Uddeholm Calmax Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [9] *Uddeholm Unimax Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [10] *Uddeholm Nimax Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [11] *Uddeholm Viking Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [12] *Uddeholm Sverker 3 Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [13] *Uddeholm Orvar Supreme Technical Brochure*. (2021). Ανάκτηση May 2021, από www.uddeholm.gr
- [14] Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2018). *Υλικά: Δομή, Ιδιότητες Τεχνολογικές Εφαρμογές* (7 εκδ.). (D. K. Bhattacharya, R. P. Chhabra, Επιμ., & Π. Ψυλλάκη, Μεταφρ.) Αθήνα, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

[15] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2019). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών* (9 εκδ.). (Κ. Γαλιώτης, Α. Βανακάρης, Σ. Μπογιατζής, Κ. Πλιάγκας, Β. Ταγκούλης, & Γ. Χ. Ψαρράς, Μεταφρ.) Αθήνα, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα.

[16] [https://www.pangas.ch/fr/images/Subzero Treatment of Steels en tcm557-116014.pdf](https://www.pangas.ch/fr/images/Subzero_Treatment_of_Steels_en_tcm557-116014.pdf)

[17] A. Y. L. Yong, K. H. W. Seah and M. Rahman, “Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning”, *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, vol. 46, pp. 2051-2056, 2006.

[18] P. Baldissera, C. Delprete, “Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review”, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2008, 2, 1-11

[19] Rozalia Papp, “The Emerging Science of Deep Cryogenic Treatment”, *Cold Facts*, June 2014, Volum 30, n.3

[20] A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal and G. Nagarajan, “Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment”, *Cryogenics*, vol. 45, pp. 747-754, 2005.

[21] <https://cryogenictreatmentdatabase.org/tag/helium>

[22] “Cryotreatment- State of the art 1997- an Update”, T. Holm, AGA Internal Report

[23] D.N. Collins, J. Dorner, *Heat Treatment of Metals*, 1997, No.3

[24] Ajit Behera, S. C. Mishra, Comparative Study of Cryo -Treated Steel, *International Journal of Scientific & Technology Research*, Volume 1, Issue 7, August 2012

[25] Simranpreet Singh Gill, Jagdev Singh, Harpreet Singh and Rupinder Singh, “*Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC-Co)*”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1-4, pp. 119-131, 2012, DOI: 10.1007/s00170-011-3369-4.

[26] Muammer Nalbant, Hasan Gökkaya, Ihsan Toktaş, Gökhan Sura, “*The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural network*”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 25, Issue 1, pp. 211–223, 2009.

[27] Adam L. Woodcraft, “*Recommended values for the thermal conductivity of aluminium of different purities in the cryogenic to room temperature range, and a comparison with copper*”, *Cryogenics*, Vol. 45, Issue 9, pp. 626–636, 2005. 21

[28] J. Dossett, G.E. Totten, “Cold and Cryogenic treatment of steel”, *ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processings*, revised by F. Diekmann, 2013

[29] R. F. Barron, “Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance”, *Cryogenics*, vol. 22(8), pp. 409-413, 1982.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

- [30] R. F. Barron, “Cryogenic treatment of tool steels”, in Proceedings of Conference Manufacturing Strategies, vol. 6, 1996, pp. 535-548.
- [31] ”Dimensional Tolerances and Gauging for Tooling in the Can-Making Industry”, N.Sasinowski, SME Technical Paper, MR 74-945
- [32] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini and K. H.Stiasny, “Effects of deep cryogenic treatment on the properties of tool steels”, in Proceedings of Conference on Advances Materials Processes Technologies, 1999, pp. 1461-1469
- [33] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini and K. H.Stiasny, “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels”, *J. Mater.Process. Technol.*, vol. 118, pp.350-355, 2001
- [34] T.P. Sweenley, Heat Treating, Feb.1986, p.28
- [35] H. Uchida et al, J. Soc. Mater.Sci. Jpn., 34 (1985), p 809
- [36] P. Paulin, Gear Technology, March/April 1993, p.23
- [37] Understanding Tool-Steel Service Life”, Metallurgical Services Staff of Latrobe Steel, div. Of Timken Company, Tooling & Production, December 1985
- [38] Dr. Jeffrey Levine, Applied Cryogenics Inc., Burlington MA. Private Communication.
- [39] Collins, N. D. & O'Rourke, G., 1999. *The Response of Tool Steels to Deep Cryogenic Treatment Effect of Alloying Elements*. Dublin, s.n., pp. 229-247.
- [40] Yan, X. G. & Li, D. Y., 2013. Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel. *Wear*, vol. 302, pp. 854-862
- [41] Cardoso, P. S. και συν., 2020. Effects of deep cryogenic treatment on microstructure, impact toughness and wear resistance of an AISI D6 tool steel. *Wear*, vol. 456-457
- [43] Πρότυπο ASTM E13-08b
- [44] Πρότυπο ASTM E140-02
- [45] Πρότυπο ASTM E384-17



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ