



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : κ. Γ.-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ

---

ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ  
ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΤΖΟΥΛΗ ΕΥΘΥΜΙΑ



ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

Η συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιθυμεί να εκφράσει τις ευχαριστίες της στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και στον Επίκουρο Καθηγητή Γ. Χ. Βοσνιάκο για την επίβλεψη του κατά την εκπόνηση της παρούσας. Επίσης στον Καθηγητή Δρ. Δ. Παντελή για την ουσιαστική του βοήθεια σε θέματα Τεχνολογίας Υλικών και για την παροχή πρόσβασης στο Μεταλλογραφικό Εργαστήριο της Σχολής Ναυπηγών . Ακόμη για τη βοήθεια και υποστήριξη κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στους : Δρα Π. Μπενάρδο και τους Υ/Δ Ξ. Γωγουβίτη, Τ. Γιαννακάκη, Θ. Τσιούρβα, Χ. Σαράφογλου, Αλ. Ζώικη Καραθανάση και Ν. Βασιλείου. Τέλος στον Κ. Γιαννόπουλο και την εταιρία CRYO cryogenic services, στις εγκαταστάσεις της οποίας έγινε η Κρυογενική Κατεργασία των δοκιμίων.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη διερεύνηση μιας καινούργιας, καινοτομικής κατεργασίας υλικών, της κρυογενικής κατεργασίας.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας και που αποτελεί το θεωρητικό μέρος παρουσιάζεται η κρυογενική κατεργασία, μια ιστορική αναδρομή της τεχνικής αυτής και τα στάδια εξέλιξης της έως σήμερα. Αναλύεται καθολικά ο φυσικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο λειτουργεί η κρυογενική κατεργασία μετάλλων, οι παράμετροι και οι παράγοντες που την επηρεάζουν, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υποκείμενων στην κατεργασία αυτή υλικών που μεταβάλλονται και το κόστος της συγκριτικά με τα αποτελέσματα που επιφέρει. Συμπληρωματικά γίνεται αναφορά στις αρχές και τη θεωρία της επιστήμης και τεχνολογίας των μεταλλικών υλικών με στόχο να ερμηνευθεί η συμπεριφορά των υλικών όταν υποβάλλονται σε κρυογενική κατεργασία. Ακόμη παρατίθεται σειρά μελετών, από τη διεθνή βιβλιογραφία, που αφορούν διάφορα σχετικά πειράματα, σε δυο ενότητες, η πρώτη σε σχέση με τη χρήση κρυογενικά κατεργασμένων ταχυχαλύβων και σκληρομετάλλων ως κοπτικών εργαλείων και η δεύτερη σε σχέση με τη χρήση κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων για την κατασκευή μητρών.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται πειραματική μελέτη για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων (σκληρότητα, αντοχή σε φθορά-τριβή) και της μικροδομής δύο διαφορετικών εργαλειοχαλύβων πριν και μετά την κρυογενική κατεργασία, με τη χρήση μιας γκάμας τεχνικών (μεταλλογραφία, οπτική μικροσκοπία, ανάλυση εικόνας, σκληρομετρήσεις και δοκιμές ball-on-disc). Στόχος είναι να διερευνηθούν και να ερμηνευθούν βελτιωμένες ιδιότητες που προσδίδει στους εργαλειοχάλυβες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μητρών, π.χ. για χυτοπρεσσαριστά ή για πλαστικά τεμάχια. Παρουσιάζονται επίσης δοκιμές κοπής με κονδύλια από ταχυχάλυβα με στόχο να ανιχνευθεί βελτίωση στη φθορά τους μετά από κρυογενική κατεργασία και με κύριο εργαλείο την οπτική στερεοσκοπία και ανάλυση εικόνας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>6</b>
1.1 Κρυογενική κατεργασία μετάλλων	6
1.2 Φυσικός μηχανισμός	8
1.3 Διαδικασία κρυογενικής κατεργασίας	8
1.4 Πλεονεκτήματα της κρυογενικής κατεργασίας	11
1.5 Παράμετροι της κρυογενικής κατεργασίας	13
1.6 Εφαρμογές	14
<b>2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ</b>	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Φθορά και διάρκεια ζωής τρυπανιού M2 HSS	16
2.3 Απόδοση κρυογενικά κατεργασμένων εργαλείων HSS	20
2.4 Κατεργασιμότητα C45 με κρυογενικά κατεργασμένα πλακίδια βολφραμίου	22
2.5 Απόδοση κρυογενικά κατεργασμένων σκληρομετάλλων σε τόννευση	23
2.6 Βελτίωση της αντίστασης σε φθορά κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων	24
<b>3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ</b>	<b>27</b>
3.1 Εργαλειοχάλυβες	27
3.2 Κρυογενική κατεργασία για βελτίωση της αντοχής σε φθορά	27
3.3 Μικροδομή εργαλειοχαλύβων M2	29
3.4 Επίδραση κρυογενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 4340	31
3.5 Μεγιστοποίηση αντίστασης σε φθορά κρυογενικά κατεργασμένου ανοξ. χάλυβα	33
3.6 Επίδραση πολλαπλής ανόπτησης σε κρυογενικά κατεργασμένο χάλυβα D-3	33
3.7 Επίδραση κρυογενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες εργαλειοχαλύβων	36
<b>4. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ</b>	<b>39</b>
<b>5. ΠΕΙΡΑΜ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ</b>	<b>42</b>

---

<b>5.1 Εισαγωγή</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Χάλυβες</b>	<b>42</b>
<b>5.3 Κρυογενική κατεργασία</b>	<b>42</b>
<b>5.4 Μικροδομή</b>	<b>43</b>
5.4.1 Προετοιμασία δοκιμίων	43
5.4.2 Μεταλλογραφία	44
<b>5.5 Μικροσκληρότητα</b>	<b>49</b>
5.5.1 Εξοπλισμός-διαδικασία	49
5.5.2 Αποτελέσματα	49
5.6.1 Εξοπλισμός- διαδικασία	50
5.6.2 Μετρήσεις	51
<b>5.7 Συμπεράσματα</b>	<b>64</b>
<b>6. ΠΕΙΡΑΜ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ</b>	<b>66</b>
<b>6.1 Εισαγωγή</b>	<b>66</b>
<b>6.2 Κονδύλια</b>	<b>66</b>
<b>6.3 Κρυογενική κατεργασία</b>	<b>67</b>
<b>6.4 Εργαλειομηχανή</b>	<b>67</b>
<b>6.5 Διαδικασία κοπής</b>	<b>69</b>
<b>6.6 Μέτρηση φθοράς</b>	<b>69</b>
<b>6.7 Αποτελέσματα</b>	<b>73</b>
<b>6.8 Συμπεράσματα</b>	<b>74</b>
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ</b>	<b>75</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>77</b>

---

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κρυογενική κατεργασία μετάλλων

Με την ευρεία έννοια, "κρυογενική" είναι ο κλάδος της φυσικής που μελετά την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών και τη συμπεριφορά υλικών υπό τέτοιες συνθήκες "ψύχους"[1].

Συγκεκριμένα σε ότι αφορά την εφαρμογή της στα μέταλλα, πρόκειται για μια ανέξοδη, μόνιμη, θερμική κατεργασία η οποία εφαρμόζεται άπαξ σε μεταλλικά αντικείμενα και στοιχεία μηχανών τα οποία έχουν ήδη αποκτήσει την τελική, εμπορική τους μορφή ακριβώς πριν τη συναρμολόγησή τους. Αποτελεί μια πρόσθετη κατεργασία, πέρα από τις συμβατικές θερμικές κατεργασίες και επιδρά σε ολόκληρο το τεμάχιο αντίθετα με άλλες επιφανειακές κατεργασίες. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μεταλλικά τεμάχια ψύχονται σε κρυογενικές θερμοκρασίες, ακολουθώντας έναν ειδικά σχεδιασμένο κατά περίπτωση θερμοδυναμικό κύκλο, παραμένουν στη θερμοκρασία αυτή για προκαθορισμένο χρόνο και έπειτα επανέρχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα από συγκεκριμένη διαδικασία πλήρως ελεγχόμενη. Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι η βελτίωση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων και κατ' επέκταση η αύξηση του χρόνου ζωής των αντικειμένων [2-8]. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε κάποια σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η κρυογενική κατεργασία εφαρμόζεται μια μόνον φορά και τα αποτελέσματά της διαρκούν μέχρι το τέλος της ζωής του αντικειμένου. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατεργασία αυτή επιδρά στη δομή του κρυσταλλικού πλέγματος, αλλάζοντας τη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνει τις ιδιότητες του υλικού [2-6].

Κατατάσσεται στην οικογένεια των θερμικών κατεργασιών, επειδή αυτό που αλλάζει δραματικά τη συμπεριφορά των μετάλλων είναι η μεταβολή της ενεργειακής τους κατάστασης εξ' αιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας τους, που οδηγεί σε μεταβολή της κρυσταλλικής τους δομής [4-7,10,13].

Όσον αφορά το κόστος της απαιτείται αρκετά μεγάλο χρηματικό ποσό για την απόκτηση και εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Το χρησιμοποιούμενο δε δραστικό μέσο, το άζωτο, υπάρχει σε μεγάλη αφθονία και σε πολύ χαμηλή τιμή [2-4].

Η διαδικασία με την οποία τα κατεργασμένα τεμάχια επανέρχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πλήρως ελεγχόμενη και αποτελεί μια ολόκληρη φάση της κατεργασίας, που λέγεται ανόπτηση.

Στη βιβλιογραφία γίνεται μια διάκριση των κρυογενικών θερμοκρασιών σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε θερμοκρασίες γύρω από τους 189K (-84 °C) και τότε η διαδικασία ονομάζεται κρυογενική κατεργασία, ενώ η δεύτερη σε θερμοκρασίες γύρω από τους 77K (-196 °C) και τότε η διαδικασία ονομάζεται βαθεία κρυογενική κατεργασία. Στη διπλωματική εργασία αναφερόμαστε σε θερμοκρασίες της δεύτερης κατηγορίας, αλλά θα αποκαλούμε την κατεργασία, χάριν ευκολίας, κρυογενική κατεργασία [1-17].

Η ιστορία της κρυογενικής έχει αφετηρία στην εποχή του Ψυχρού Πολέμου, κατά την οποία Σοβιετικοί επιστήμονες όταν δοκίμασαν να ψύξουν χαλύβδινα δοκίμια δεν διαπίστωσαν ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα σχετικά με τη μεταβολή των μηχανικών τους ιδιοτήτων οπότε και απέρριψαν αυτή τη μέθοδο βαθείας ψύξης. Βέβαια σήμερα γνωρίζουμε πως για τα φτωχά αποτελέσματα των Σοβιετικών ευθύνεται μόνο η μέθοδος που χρησιμοποιούσαν η οποία δεν ήταν τίποτε άλλο από την απλή εμβάπτιση των δοκιμίων σε υγρό άζωτο [10].

Τα πρώτα πειράματα εφαρμογής της κρυογενικής σε μέταλλα ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια του Β Παγκοσμίου Πολέμου στη Γερμανία. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν κυρίως βύθιση μεταλλικών αντικειμένων μέσα σε υγρό άζωτο. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αλλά η τεχνολογία της εποχής σε συνδυασμό με τις μικρές ποσότητες αζώτου που ήταν διαθέσιμες δεν επέτρεψαν την γενικευμένη χρήση της κρυογενικής [11].

Το 1966 ο Αμερικανός Edward Busch ο οποίος είχε έντονη δραστηριότητα σε θερμικές κατεργασίες μετάλλων, κατάφερε να δημιουργήσει τον πρώτο κρυογενικό επεξεργαστή που χρησιμοποιούσε αέριο άζωτο. Έτσι δημιουργήθηκε η Cryo-tech, η πρώτη εταιρεία κρυογενικής κατεργασίας μετάλλων παγκοσμίως [12].

Το 1973 ο Ed. Busch σε συνεργασία με τον Dr. Randall Barron, καθηγητή κρυογενικής στο πανεπιστήμιο της Louisiana, πραγματοποίησαν έρευνα για τα αποτελέσματα της κρυογενικής σε μεταλλικά αντικείμενα.

Το 1989 ο Pete Paulin εξαγόρασε την τεχνολογία από τον Ed Busch και εξελίσσοντας τον κρυογενικό επεξεργαστή την βελτίωσε αρκετά. Ο Pete Paulin εκμεταλλευόμενος τις δυνατότητες που του έδιναν πλέον οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές δημιούργησε εξειδικευμένο software, το οποίο μπορούσε πλέον να ελέγχει πλήρως την διαδικασία παρέχοντας πολλές πληροφορίες όσον αφορά το χρόνο και τη θερμοκρασία της κρυογενικής κατεργασίας.

Το 1999 η νέα εταιρεία του Pete Paulin, 300BELOW εξαγόρασε πλήρως την Cryotech και έγινε η μεγαλύτερη εταιρεία κρυογενικής κατεργασίας στον κόσμο. Από το 2000 μέχρι και το 2005 η 300BELOW κατεργάζεται η ίδια στις εγκαταστάσεις της στο Decatur IL πάνω από 1500 τόνους μέταλλο το χρόνο και παγκοσμίως λειτουργούν 160 κρυογενικές εγκαταστάσεις της.

## 1.2 Φυσικός μηχανισμός

Όταν ένα μεταλλικό υλικό ψυχθεί σε ακραία χαμηλές θερμοκρασίες συστέλλεται και τα άτομα του τείνουν να έρθουν ακόμη πιο κοντά μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι μια ακόμη πιο πυκνή δομή. Αποτέλεσμα της πυκνής αυτής διάταξης είναι η συμπλήρωση των κενών που υπήρχαν στη δομή του μετάλλου και η εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων. Συγκεκριμένα για τα ανθρακούχα μέταλλα, τα οποία αποτελούν και τη πλειονότητα των μετάλλων, το μεγάλο «μυστικό» βρίσκεται στον άνθρακα. Τα μόρια του άνθρακα που βρίσκονται στο κρυσταλλικό του πλέγμα αναδιατάσσονται. Όταν τα μόρια του άνθρακα μεταβάλλονται παρατηρείται το φαινόμενο μετατροπής του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, που είναι και το προσδοκώμενο αποτέλεσμα λόγω των ευεργετικών ιδιοτήτων του μαρτενσίτη [10,13].

Ακόμη κατά τη διάρκεια της ψύξης παρατηρείται η δημιουργία καρβιδίων από τα ελεύθερα άτομα άνθρακα τα οποία επίσης καλύπτουν τα μικροκενά που έχουν δημιουργηθεί, κυρίως κατά τη χύτευση του μετάλλου. Τα καρβίδια έχουν τη δυνατότητα να ενώνουν πλέον με πολύ ισχυρούς δεσμούς το νέο μαρτενσιτικό πλέγμα που έχει δημιουργηθεί.

Ταυτόχρονα με τη μεταβολή που δημιουργείται στη κρυσταλλική δομή, και επειδή οι συστολές και διαστολές που συμβαίνουν γίνονται ομοιόμορφα σε όλο το τεμάχιο, εκτονώνονται οι όποιες τάσεις υπήρχαν στο αντικείμενο εξαιτίας των προηγούμενων κατεργασιών που είχε υποστεί.

Με τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και επαναφορά του τεμαχίου σε συνθήκες περιβάλλοντος όταν η διαδικασία ψύξης έχει ολοκληρωθεί, οι μεταβολές στη δομή παραμένουν και το τεμάχιο διατηρεί τη νέα του πλέον δομή και τα πλεονεκτήματα αυτής μόνιμα [18].

## 1.3 Διαδικασία κρυογενικής κατεργασίας

Όλα ξεκινούν από τον κρυογενικό επεξεργαστή. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν

---



ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ψυκτικό θάλαμο ο οποίος μειώνει με προκαθορισμένο ρυθμό τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του, και φυσικά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, μέχρι τους  $-300\text{ F}$  ( $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) περίπου.

Τα προς κατεργασία τεμάχια πρέπει να μην έχουν υποστεί τέτοιες καταπονήσεις, οι οποίες να έχουν προκαλέσει αστοχίες. Πρέπει, επίσης, τα τεμάχια να έχουν ομαδοποιηθεί, έτσι ώστε το κάθε τεμάχιο να μην υπάρχει περίπτωση να υποβληθεί σε κατεργασία ασύμβατη με τα χαρακτηριστικά του, αλλά και για να εξλειφθεί ο κίνδυνος παραμορφώσεων εξαιτίας των μεγάλων συστολών και διαστολών που θα συμβούν. Τέλος, τα τεμάχια θα πρέπει να έχουν καθαριστεί σχολαστικά και να έχουν επάλειψη με ειδικό λιπαντικό για την προστασία τους από τυχόν υγρασία και οξειδώσεις.

Τα τεμάχια τοποθετούνται κατά τρόπον ώστε να διευκολύνεται η διέλευση του ψυκτικού μέσου στον κρυογενικό επεξεργαστή και η διαδικασία βαθιάς ψύξης αρχίζει. Ο ρυθμός με τον οποίο η θερμοκρασία στο εσωτερικό του επεξεργαστή μειώνεται μέχρι την τελική τιμή της, ελέγχεται από κύκλωμα κλειστού βρόγχου, όπου τις εντολές δίνει το ειδικό software ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος αποτελεί και τη μονάδα ελέγχου του συστήματος. Ο χειριστής του συστήματος επιλέγει μέσω της μονάδας ελέγχου το λεγόμενο «προφίλ» της ψύξης, ουσιαστικά τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου συναρτήσει του χρόνου. Η μέτρηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μέσω των θερμομέτρων που υπάρχουν στο εσωτερικό, τα οποία στέλνουν σήμα στην κεντρική μονάδα, που με τη σειρά της ρυθμίζει ανάλογα την παροχή ψυκτικού μέσου στον κρυογενικό επεξεργαστή.

Η ρύθμιση της παροχής γίνεται με τη βοήθεια μιας βαλβίδας, συνήθως μαγνητικής. Το ψυκτικό μέσο εγχύεται με ψεκαστήρα στην είσοδο του θαλάμου ψύξης. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται συνήθως, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, όπως θα δούμε παρακάτω, υγρό άζωτο το οποίο αεριοποιείται μόλις εξέρχεται από τον ψεκαστήρα. Το υγρό άζωτο τοποθετείται και αποθηκεύεται σε μεγάλες δεξαμενές υπό μανομετρική πίεση 3-4 Bar και μέσω δικτύου σωληνώσεων και βαλβίδων ασφαλείας οδηγείται στον κρυογενικό επεξεργαστή.

Αντί του αζώτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα ψυκτικά μέσα όπως το ήλιο. Το άζωτο είναι το επικρατέστερο, αφού αποτελεί παραπάνω από το 70% του ατμοσφαιρικού αέρα με αποτέλεσμα να έχει εξαιρετικά περιορισμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επίσης η παρασκευή αζώτου είναι πλέον μια διαδικασία αρκετά εύκολη και με χαμηλό κόστος. [9,13,19].

Καθώς το υγρό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο και εισέρχεται στο θάλαμο ψύξης, τα συστατικά στην εγγύτητά του ψύχονται και αυτά. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από μικροκατεργαστές με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμικό σοκ να μην «παράγεται» ταυτόχρονα και να προκαλεί ζημιά στα συστατικά αυτά.

Καθώς το άζωτο πληρώνει τον εσωτερικό χώρο του επεξεργαστή ο ατμοσφαιρικός αέρας εξέρχεται σταδιακά μέσω ειδικών οπών που συνδέονται με τον περιβάλλοντα χώρο, ώσπου από κάποιο σημείο και μετά υπάρχει μόνο άζωτο. Από τις οπές αυτές εξέρχεται, εκτός από τον ατμοσφαιρικό αέρα, και το αέριο άζωτο το οποίο χάνει την επιθυμητή θερμοκρασία και τότε δίνεται εντολή από το σύστημα για νέα εισαγωγή αζώτου. Συνεπώς, απουσία οξυγόνου και υδρατμών, αποφεύγεται η οξειδωση. Η παροχή αζώτου εξαρτάται από τη μάζα και την ποσότητα των τεμαχίων που θα τοποθετηθούν στον επεξεργαστή.

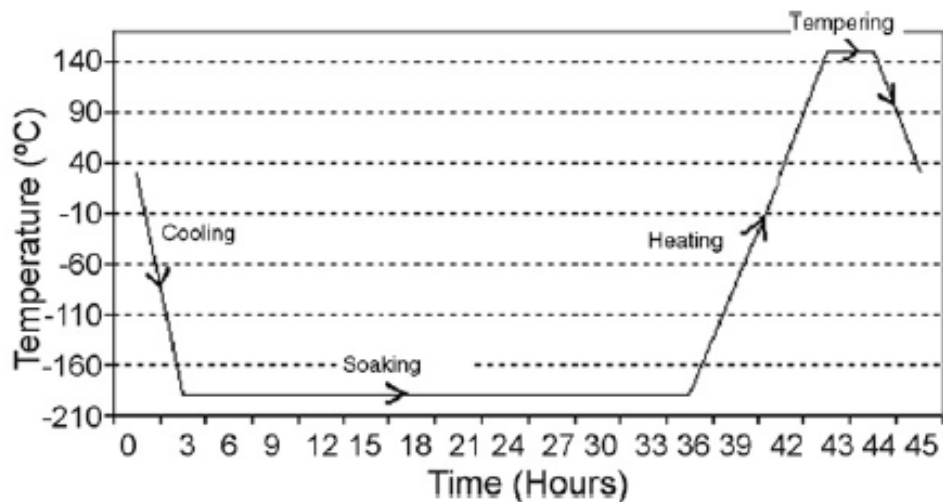
Η χρονική αλληλουχία των σταδίων της κατεργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η σταδιακή ψύξη στους  $-300\text{ F}$  ( $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) απαιτεί περίπου 4 έως 10 ώρες και στη θερμοκρασία αυτή το τεμάχιο παραμένει για 36 περίπου ώρες. Ο λόγος για τον οποίο η πτώση της θερμοκρασίας γίνεται σταδιακά είναι ο ίδιος για τον οποίο το τεμάχιο δεν έρχεται σε καμία φάση της διαδικασίας σε άμεση επαφή με υγρό άζωτο, παρά μόνο με άζωτο σε αέρια κατάσταση, δηλαδή για να αποφευχθεί το λεγόμενο «θερμικό σοκ» του υλικού.

Μόλις η μονάδα ελέγχου του επεξεργαστή οδηγήσει το τεμάχιο σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και πάλι, αυτό αφαιρείται από τον επεξεργαστή και εισέρχεται σε ηλεκτρικό φούρνο για τη διαδικασία της επαναφοράς. Η επαναφορά θα φέρει το τεμάχιο στο άλλο άκρο της κλίμακας του θερμομέτρου, στους  $+149\text{ }^{\circ}\text{C}$ , για δυο σημαντικούς λόγους. Πρώτον για να ατμοποιηθεί και να αποβληθεί η όποια υγρασία έχει συκρατηθεί στη μάζα του υλικού, και δεύτερον για να σταθεροποιηθεί ο μαρτενσίτης εφόσον πρόκειται για χαλύβδινα υλικά. Συνολικά η όλη διαδικασία διαρκεί περίπου 50 ώρες.

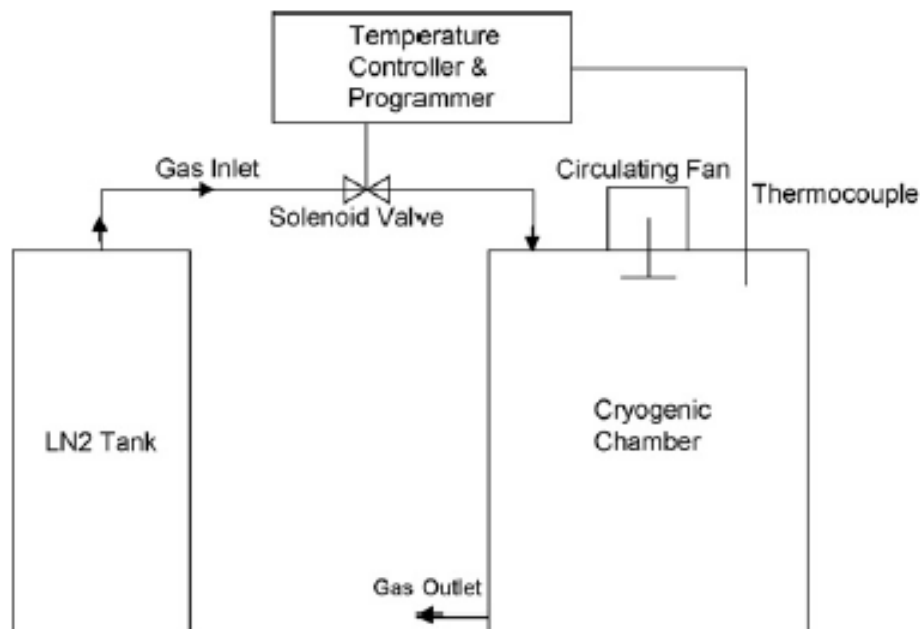
Ο μαρτενσίτης έχει υψηλή σκληρότητα και επομένως ελάχιστη πλαστικότητα, σίγουρα όχι το ζητούμενο της κατεργασίας μας. Με τη διαδικασία της ανόπτησης οι παραμένουσες τάσεις του υλικού καθώς και αυτές που προήλθαν από τη πτώση της θερμοκρασίας εξαλείφονται σχεδόν ολοκληρωτικά και τελικά οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου είναι πολύ κοντά στις επιθυμητές. Η φάση της ανόπτησης διαρκεί μιάμιση ώρα περίπου και επαναλαμβάνεται δυο φορές για λόγους αποτελεσματικότητας. Συμπληρωματικά κάποιες φορές, κυρίως σε αεροπορικά κράματα αλουμινίου, εφαρμόζεται και το λεγόμενο "sweetening", κατά το οποίο πριν τη

φάση της ψύξης προηγείται ένα στάδιο θέρμανσης στους 180°C σε ηλεκτρικό φούρνο για να προετοιμαστεί καλύτερα το υλικό από πλευράς τάσεων και υγρασίας.

Στο σχήμα 1 φαίνεται ενδεικτικά ένας θερμικός κύκλος της κρυογενικής κατεργασίας συναρτήσει του χρόνου [2] και στο σχήμα 2 ένα σύστημα κρυογενικού επεξεργαστή.



Σχήμα 1 Ενδεικτικός θερμικός κύκλος.



Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της κρυογενικής κατεργασίας.

#### 1.4 Πλεονεκτήματα της κρυογενικής κατεργασίας

Τα πλεονεκτήματα που έχουν μέχρι σήμερα παρατηρηθεί είναι αρκετά και σημαντικά [1-17,20,21]:

- Αύξηση στη διάρκεια ζωής.
- Αυξημένη αντοχή στην τριβή (φθορά).
- Αυξημένη αντοχή σε κόπωση.
- Μείωση ταλαντώσεων.
- Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων.
- Διαστατική σταθερότητα και μη παραμόρφωση των τεμαχίων.

Η πλέον διαδομένη θερμική κατεργασία σήμερα είναι η βαφή ως ο απλούστερος τρόπος δημιουργίας ωστενιτικής μορφής στερεού διαλύματος το οποίο να διατηρείται σχετικά σταθερό στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με τη θέρμανση του μετάλλου, άτομα άνθρακα παρεμβάλλονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου το οποίο λόγω της πρόσδοσης θερμότητας έχει γίνει πιο «χαλαρό», σχηματίζοντας ωστενιτικό στερεό διάλυμα. Η απότομη ψύξη του αντικειμένου επαναφέρει το κρυσταλλικό πλέγμα ταχύτατα στην αρχική του κατάσταση εγκλωβίζοντας τα άτομα άνθρακα που έχουν εισχωρήσει σε αυτό. Αποτέλεσμα είναι η μεγάλη αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα αλλά και η μεγάλη μείωση της πλαστικότητάς του. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται εύθραυστα αντικείμενα υψηλής σκληρότητας, τα οποία όμως είναι ουσιαστικά «ακατάλληλα».

Η αιτία της υψηλής ευθραυστότητας των βαμμένων χαλύβων είναι η ασταθής φύση του ωστενίτη όταν αυτός βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τη λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνει η θερμική κατεργασία της επαναφοράς. Η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται μετά τη βαφή και συνίσταται στην αναθέρμανση του βαμμένου χάλυβα έως μια ορισμένη θερμοκρασία (ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα), στη διατήρηση αυτής της θερμοκρασίας έως τη στιγμή που θα έχει θερμανθεί ομοιόμορφα ολόκληρη η μάζα του χάλυβα και τέλος στην αργή ψύξη του χάλυβα έως της θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, τόσο στην επιφάνεια του αντικειμένου, όσο και στο εσωτερικό του.

Όταν η θερμοκρασία φτάσει στους 25°C περίπου (θερμοκρασία περιβάλλοντος) η διαδικασία σταματά, χωρίς όμως να έχει μετατραπεί ολόκληρη η ποσότητα του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Το φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο έντονο στους υπερευθηκτοειδείς

χάλυβες, στους χάλυβες δηλαδή που έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη του 0.80%.

Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι όταν ένα αντικείμενο από χάλυβα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 0.80% υποστεί βαφή και επαναφορά έως και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η μισή περίπου ποσότητα του ωστενίτη που περιέχει δεν καταφέρνει να μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Έτσι οι μηχανικές ιδιότητες των αντικειμένων που υπόκεινται σε επαναφορά είναι μεν καλύτερες σε σχέση με την απλή βαφή, ωστόσο διατηρείται σε μεγάλο βαθμό η ευθραυστότητα. Πολλοί λοιπόν από τους χάλυβες που χρησιμοποιούμε καθημερινά έχουν τη μισή ποσότητα του άνθρακά τους σε μορφή ωστενίτη.

Με την κρυογενική κατεργασία, η απόψυξη του χάλυβα σε μικρότερες θερμοκρασίες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος θα επιτρέψει σε μεγαλύτερο ποσοστό ωστενίτη να μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Αποτελέσματα σχετικών πειραμάτων έδειξαν ότι όταν η διαδικασία της ψύξης του δοκιμίου επεκταθεί έως και τους  $-300\text{ F}$ , μόνο το 0.9% του ωστενίτη παραμένει ανέπαφο, πρακτικά δηλαδή το σύνολο της μάζας του αντικειμένου έχει μαρτενσιτική δομή. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα μετά από αυτή τη θερμική κατεργασία βαθιάς ψύξης είναι κατά πολύ ανώτερες από οποιαδήποτε θερμική κατεργασία έχει επινοηθεί έως τώρα.

### 1.5 Παράμετροι της κρυογενικής κατεργασίας

Οι κύριες παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία της κατεργασίας είναι [2]:  
ο ρυθμός ψύξης (cooling rate). Είναι ο ρυθμός με τον οποίο το μεταλλικό τεμάχιο ψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία εμβάπτισης.

η θερμοκρασία εμβάπτισης (soaking temperature). Είναι η κρυογενική θερμοκρασία στην οποία το τεμάχιο παραμένει για αρκετές ώρες.

η χρονική διάρκεια εμβάπτισης (soaking time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται το τεμάχιο να παραμείνει στη θερμοκρασία εμβάπτισης.

ο ρυθμός θέρμανσης (heating rate). Είναι ο ρυθμός με τον οποίο το τεμάχιο θερμαίνεται πίσω στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

η θερμοκρασία ανόπτησης (tempering temperature). Είναι η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία θα θερμανθεί το τεμάχιο ολοκληρώνοντας έτσι την κατεργασία.

η χρονική διάρκεια της ανόπτησης (tempering time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται το τεμάχιο να παραμείνει στη θερμοκρασία ανόπτησης.

Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικά επίπεδα των εν λόγω παραμέτρων στις μελέτες τους και έχουν παρατηρήσει διαφορετικά ποσοστά βελτίωσης στις μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών τεμαχίων που έχουν κατεργαστεί. Τα επίπεδα αυτών των παραμέτρων κατεργασίας μπορούν να ποικίλουν και από υλικό σε υλικό. Παραδείγματος χάριν, η θερμοκρασία εμβάπτισης εξαρτάται από τη θερμοκρασία λήξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (Mf) του εξεταζόμενου υλικού και η περίοδος εμβάπτισης εξαρτάται από το χρόνο που απαιτείται ώστε τα καρβίδια να κατακρημνιστούν.

Παράγοντες που επηρεάζουν τη κατεργασία, χωρίς να σχετίζονται με τη διάταξη, είναι : το υλικό των προς κατεργασία τεμαχίων καθώς και οι διατομές των τεμαχίων αυτών, ώστε να επιλεγεί σωστά το κατάλληλο προφίλ.

## 1.6 Εφαρμογές

Η κρυογενική είναι μια κατεργασία με τρομερά ευρύ πεδίο εφαρμογών, που εκτείνεται από τα πιο απλά αντικείμενα που χρησιμοποιούμε καθημερινά μέχρι και τις πιο εξεζητημένες εφαρμογές της από τη NASA, που ήταν και οι πρώτες που έγιναν γνωστές. Από εκεί και πέρα επεκτάθηκε σε πολλούς τομείς όπως π.χ. στην ιατρική, με θεαματικά αποτελέσματα [4-6,22-25].

Η πολεμική βιομηχανία είναι ένας από τους χώρους που η κρυογενική βρήκε απήχηση. Η κάνη ενός όπλου κατά την φάση κατασκευής περιέχει παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται κατά κύριο λόγο από τις έντονες μηχανουργικές και θερμικές κατεργασίες. Καθώς οι κάνες θερμαίνονται μετά από επαναλαμβανόμενες βολές, με την παρουσία παραμενουσών τάσεων θα έχαναν την ακρίβεια και την ευθυβολία τους. Με την κρυογενική κατεργασία το πρόβλημα απαλείφεται.

Άλλο ένα από τα βασικότερα πεδία εφαρμογής της είναι ο μηχανοκίνητος αθλητισμός. Τμήματα όπως μπλοκ κινητήρων, σασμάν, καπάκια, και άλλα αποδίδουν καλύτερα και διαρκούν περισσότερο. Η κρυογενική κατεργασία δεν δίνει οπτικά παρατηρήσιμη βελτίωση, δίνει όμως καλύτερες επιδόσεις, λιγότερη φθορά και αστοχίες.

Σε αθλητικό εξοπλισμό όπως μπαστούνια του γκολφ, ρακέτες του τένις, πέδιλα πατινάζ, μετά από κρυογενική κατεργασία στα μεταλλικά του μέρη απαλείφονται παραμένουσες τάσεις, ομογενοποιείται η μορφή της κρυσταλλικής δομής και μειώνονται τα κενά της.

Στη βιομηχανία μουσικών οργάνων, ένα καλής ποιότητας μουσικό όργανο πρέπει να έχει καλό τόνο και ηχητική χροιά σε ολόκληρο το εύρος του. Ο λόγος που πολλά μουσικά όργανα δεν προσφέρουν αυτά τα χαρακτηριστικά κατά ένα μεγάλο μέρος είναι οι τάσεις που δημιουργούνται στο μέταλλο τους κατά την κατασκευής τους, π.χ. στη

συγκόλληση είτε στη δημιουργία καμπύλων μορφών για να πάρει το μουσικό όργανο την τελική του μορφή. Η κρυογενική κατεργασία εφαρμόζεται σε όλα σχεδόν τα μουσικά όργανα όπως σαξόφωνα, ντραμς, τρομπέτες, κορνέτα, χορδές κιθάρας, χορδές πιάνου κλπ και τα αποτελέσματά της είναι θεαματικά.

Στις εργαλειομηχανές, πάλι, με τη χρήση της κρυογενικής στα αναλώσιμα και κινητά μέρη τους, επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής, αύξηση αξιοπιστίας και άρα μείωση του κόστους χρήσης και παραγωγής.

Επίσης, με το ίδιο σκεπτικό κοπτικά εργαλεία μπορεί να αποδίδουν έως και τριπλάσια από την ονομαστική τους τιμή. Παραπλήσια αποτελέσματα επιτυγχάνονται σε αγροτικά εργαλεία, αναλώσιμα ανταλλακτικά εκσκαφών, εργαλεία εξόρυξης κλπ.

Η κρυογενική κατεργασία χαίρει του πλεονεκτήματος ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μια τεράστια γκάμα υλικών [23]. Σε κάποια υλικά έχει ευεργετικές επιπτώσεις, ενώ κάποια άλλα δεν αντιδρούν τόσο καλά. Από τα συχνότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για κρυογενική κατεργασία είναι :

- Όλοι οι τύποι χαλύβων και χυτοσιδήρων
- Χαλκός
- Ορείχαλκος
- Σίδηρος
- Τιτάνιο
- Αλουμίνιο
- Γυαλί
- Νάυλον
- Πλαστικό

## 2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερα αυξημένο ενδιαφέρον για την εφαρμογή της κρυογενικής κατεργασίας σε εργαλεία κοπής. Στην κοπή μετάλλων το κοπτικό εργαλείο συμπιέζεται ενάντια στο κατεργαζόμενο τεμάχιο με συγκεκριμένη δύναμη, με αποτέλεσμα την αφαίρεση υλικού με τη μορφή αποβλήτου. Συνεχής χρήση του κοπτικού εργαλείου οδηγεί στη φθορά του και τελικά στην αστοχία του. Στον τομέα των κοπτικών εργαλείων, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για ταχυχάλυβες (HSS) και μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβες, που είναι και οι κυρίως χρησιμοποιούμενοι. Έχει παρατηρηθεί ότι η κρυογενική κατεργασία μπορεί να αυξήσει το χρόνο ζωής των εργαλείων ταχυχάλυβα, όπως επίσης αυξάνει τη σκληρότητα και την τραχύτητά τους. Πειραματικές μελέτες έδειξαν αύξηση του χρόνου ζωής από 92% έως 817% όταν χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία κρυογενικά κατεργασμένοι ταχυχάλυβες [6]. Εντούτοις, οι πραγματικοί μηχανισμοί που εγγυώνται την καλύτερη απόδοση εργαλείων δεν έχουν ακόμη αποσαφηνισθεί πλήρως, κάτι που τονίζει την ανάγκη περαιτέρω έρευνας. Παρ' όλα αυτά οι ήδη υπάρχουσες μελέτες παρέχουν έναν ικανοποιητικό όγκο πληροφοριών για τα συγκεκριμένα υλικά, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

### 2.2 Φθορά και διάρκεια ζωής τρυπανιού M2 HSS

Στη μελέτη [15] ελέγχθηκαν τα αποτελέσματα της κρυογενικής κατεργασίας πάνω στην αντοχή στη φθορά και στο χρόνο ζωής σε τρυπάνια M2 HSS κατά τη διαμόρφωση ανθρακούχων χαλύβων σε ξηρή διάτρηση υψηλής ταχύτητας. Η χημική σύσταση και οι ιδιότητες των τρυπανιών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αντίστοιχα στους πίνακες 1 και 2.



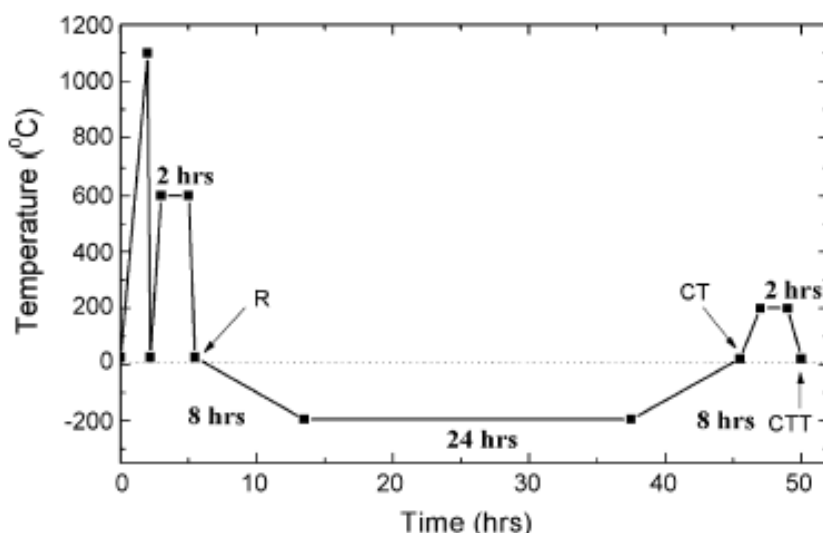
C	0.87
W	6
Mo	4.9
Cr	4
V	1.9
Si	0.4
Mn	0.2
Ni	0.2
Cu	0.1

Tool material	M2 HSS
Tool reference	1055(DIN1897)
Coating	None
Helix angle	30°
Point angle	130°
Diameter	6.9mm

Με την τοποθέτηση των δοκιμών στο θάλαμο αρχίζει σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας μέχρι τους  $-196^{\circ}\text{C}$ , όπου τα δοκίμια παραμένουν για 24 ώρες και στη συνέχεια επανέρχονται σταδιακά σε θερμοκρασία δωματίου. Ο ρυθμός ψύξης-θέρμανσης είναι  $0,5^{\circ}\text{C}$  ανά λεπτό.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τριών ειδών τρυπάνια : Απλά τρυπάνια (R), χωρίς επιπλέον κατεργασία, κρυογενικά κατεργασμένα τρυπάνια (CT), και κρυογενικά κατεργασμένα τρυπάνια (CTT) με επιπλέον θέρμανση για μια ώρα στους  $200^{\circ}\text{C}$ . Στο σχήμα 3 φαίνεται ο θερμοδυναμικός κύκλος για την κάθε κατηγορία.

Οι δοκιμές διάτρησης πραγματοποιήθηκαν σε έναν ειδικά κατασκευασμένο, για τέτοιες εργασίες άκαμπτο πάγκο. Ανοίχθηκαν τυφλές οπές σε μπλοκ ανθρακούχου χάλυβα, με βάθος κοπής, πρόωση και ταχύτητα κοπής σταθερές και ίσες με 50mm, 0.11mm/rev και 350 m/min, αντίστοιχα. Οι δοκιμές έγιναν με 5 τρυπάνια σε κάθε κατηγορία και το κριτήριο που καθόρισε το χρόνο ζωής του κάθε εργαλείου ήταν ο συνολικός αριθμός των οπών που διάτρησε κάθε τρυπάνι μέχρι να αστοχήσει.



Σχήμα 3 Θερμοδυναμικός κύκλος κατεργασιών για τις τρεις κατηγορίες τρυπανιών.

Για να μετρηθεί ο βαθμός φθοράς, αφαιρέθηκαν τα τρυπάνια από τον άξονα του τσοκ αφού είχαν διατρήσει 10, 15 και 20 οπές και μετρήθηκε το πλάτος του πεδίου

φθοράς στο όριο της πλευρικής επιφάνειας με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου μεγέθυνσης x50.

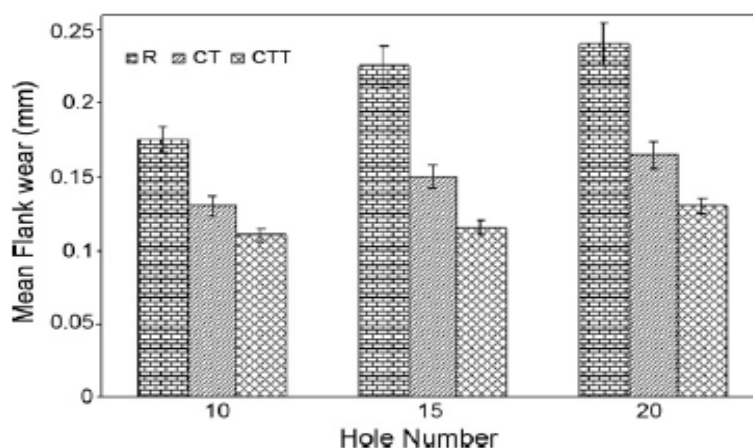
Η φθορά του κοπτικού εργαλείου υπολογίστηκε ποσοτικά θεωρώντας το βολφράμιο και τα καρβίδια βολφραμίου χωριστά στο υλικό, χρησιμοποιώντας φασματοσκόπια μάζας (ICP-MS) PerkinElmer ELAN 9000.

Η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στο χρόνο ζωής και τη σκληρότητα των τρυπανιών, κάθε κατηγορίας, είναι σημαντική όπως φαίνεται στον πίνακα 3. Ο χρόνος ζωής του εργαλείου αυξάνει περίπου κατά 77% στη περίπτωση τρυπανιού με κρυογενική κατεργασία και 126% στη περίπτωση τρυπανιού με κρυογενική κατεργασία και θέρμανση.

**Πίνακας 3 Σύγκριση διάρκειας ζωής και σκληρότητας των διαφόρων τύπων τρυπανιών.**

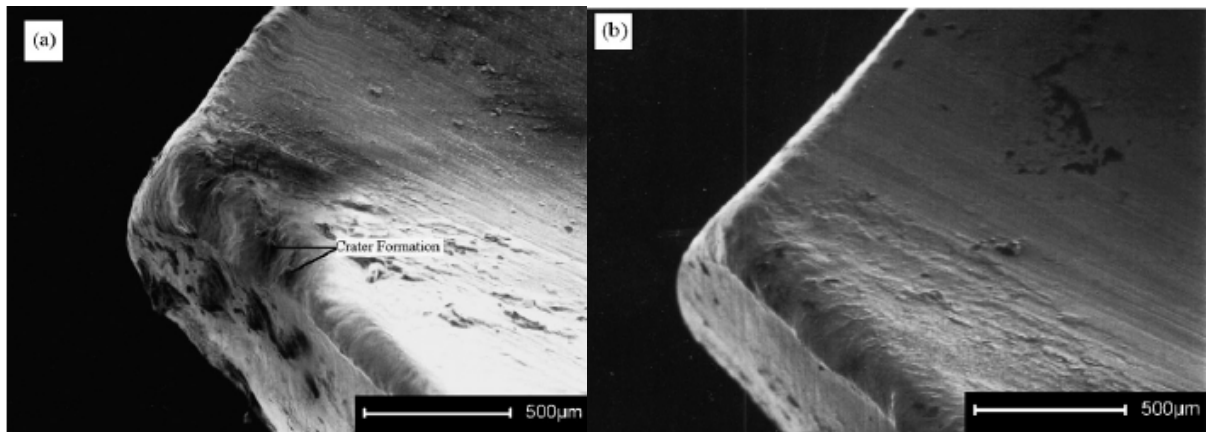
Drill type	Total number of holes					Average	Increase (%)	Hardness (RC)
R	40	43	42	38	39	40.4	-	61
CT	68	73	74	75	69	71.8	77	63
CCT	92	93	90	88	94	91.4	126	62

Το πεδίο φθοράς που μετρήθηκε, παρουσιάζεται στο σχήμα 4, και είναι προφανές ότι αυξάνεται με τη χρήση καθώς επίσης και ότι τα κρυογενικά κατεργασμένα τρυπάνια έχουν μικρότερο βαθμό φθοράς συγκριτικά με τα υπόλοιπα.



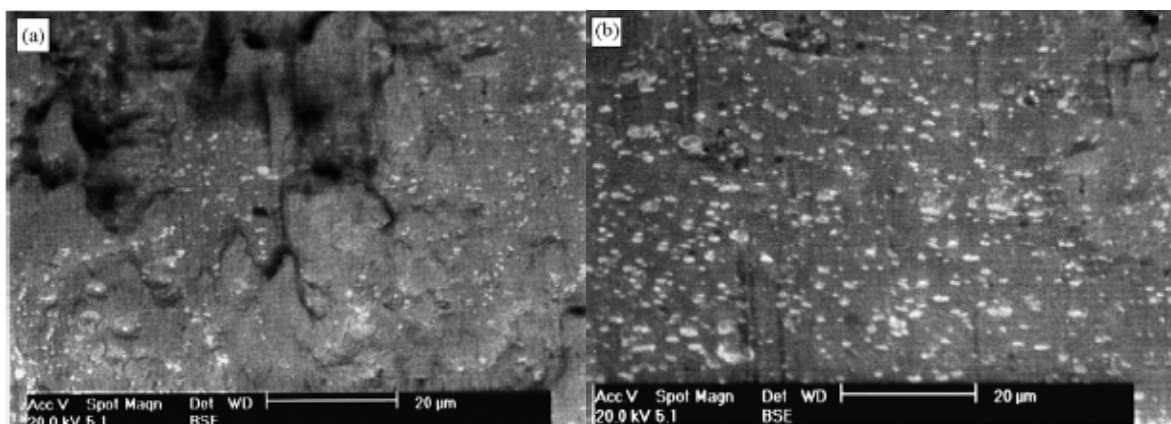
**Σχήμα 4 Επίδραση της κατεργασίας στο πεδίο φθοράς.**

Αυτό που επίσης παρατηρήθηκε και φαίνεται στο σχήμα 5 είναι ότι η πλαστική παραμόρφωση των τρυπανιών χωρίς κρυογενική κατεργασία είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτά που κατεργάστηκαν κρυογενικά, έπειτα από διάνοιξη 30 οπών.



Σχήμα 5 SEM ανάλυση των τρυπανιών μετά από διάνοιξη 30 οπών: (a) R και (b) CTT.

Άλλη μια διαπίστωση είναι ότι η δημιουργία καρβιδίων  $Fe_3M_2$  ( $M = (W, Mo, Cr, V)C$ ) που οφείλεται στη κρυογενική κατεργασία οδηγεί σε βελτίωση της αντοχής σε φθορά. Ο όγκος των καρβιδίων βρέθηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση εικόνας σε 10 περιοχές κάθε τρυπανιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο όγκος των καρβιδίων στα τρυπάνια CT και CTT ήταν περίπου 10% ενώ στην περίπτωση των απλών τρυπανιών (R) ήταν περίπου 6%. Σημειώνεται ακόμη ότι η κρυογενική κατεργασία όχι μόνο διευκολύνει το σχηματισμό και την αύξηση του αριθμού των καρβιδίων στο μαρτενσιτικό πλέγμα, αλλά και κάνει τη διάχυση τους μέσα σε αυτό περισσότερο ομογενή όπως παρατηρήθηκε σε μικροσκόπιο SEM, σχήμα 6. Το μέγεθος και η διάχυση των καρβιδίων στα κρυογενικά κατεργασμένα τρυπάνια (CT) είναι αρκετά πιο ομογενή συγκριτικά με τα μη κρυογενικά κατεργασμένα (R).



Σχήμα 6 BSE ανάλυση πλευρικών επιφανειών μετά τη διάνοιξη 30 οπών: (a) R (b) CT.

## 2.3 Απόδοση κρυογενικά κατεργασμένων εργαλείων HSS

Η μελέτη [6] έχει σκοπό να ελέγξει τα αποτελέσματα της κρυογενικής κατεργασίας σε κοπτικά εργαλεία ταχυχαλύβων M2. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές είναι :

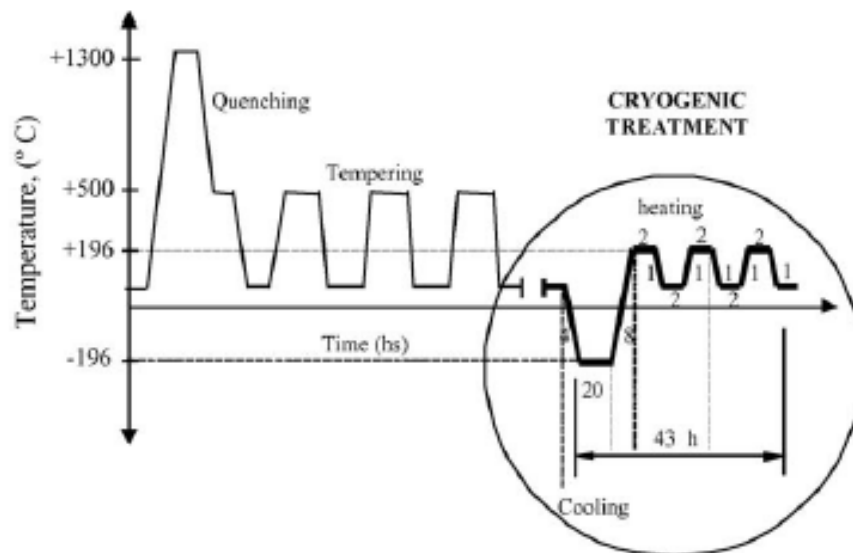
A και D: εργαλεία τόννου με διαστάσεις 10mmx10mmx102mm.

B και E: τρυπάνια διαμέτρου 7,5mm.

C και F: κονδύλια με επικάλυψη TiN 3μm.

Οι πρώτες δυο κατηγορίες εξετάστηκαν στο εργαστήριο ενώ η τρίτη στο εργοστάσιο.

Η κρυογενική κατεργασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής, βλ. Σχήμα 7:



**Σχήμα 7 Διαδικασία της κρυογενικής κατεργασίας.**

Βήμα 1: Μείωση της θερμοκρασίας στους  $-196^{\circ}\text{C}$ , με ρυθμό  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  για 4 ώρες.

Βήμα 2: Παραμονή των δοκιμίων στη θερμοκρασία αυτή για 20 ώρες.

Βήμα 3: Θέρμανση στους  $+196^{\circ}\text{C}$ , με ρυθμό  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  για 8 ώρες.

Βήμα 4: Παραμονή των δοκιμίων στη θερμοκρασία αυτή για 2 ώρες.

Βήμα 5: Ψύξη των δοκιμίων σε θερμοκρασία δωματίου για περίπου 1 ώρα.

Βήμα 6: Παραμονή των δοκιμίων στη θερμοκρασία αυτή για 2 ώρες.

Βήμα 7: Θέρμανση στους  $+196^{\circ}\text{C}$ , με ρυθμό για 1 ώρα.

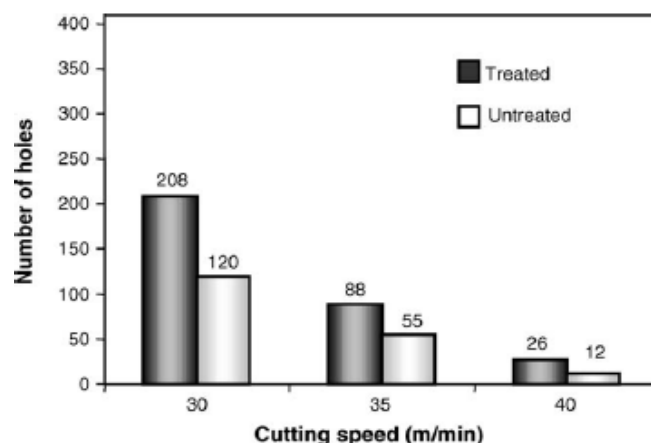
Τα βήματα 5-7 επαναλήφθηκαν 3 φορές.

Κατά τις εργαστηριακές δοκιμές υπολογίστηκε το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη και μετρήθηκε η σκληρότητα Vickers. Στο μη κρυογενικά κατεργασμένο δείγμα ο όγκος του ωστενίτη είναι περίπου 24% ενώ στο κρυογενικά κατεργασμένο περίπου 0%. Ο έλεγχος της σκληρότητας έδειξε μηδενικές αλλαγές στα 65-66 HRc. Το ίδιο ασήμαντες διαφορές έδειξε και ο έλεγχος μικροσκληρότητας. Τα κατεργασμένα δείγματα είχαν μέση τιμή 820 HV0.1 ενώ τα μη κρυογενικά κατεργασμένα 819 HV0.1.

Στη δοκιμή ταχείας μετωπικής τόννευσης Brandsma αυξάνοντας τόσο την ταχύτητα περιστροφής όσο και την πρόωση, μειώνεται η διάρκεια ζωής των εργαλείων, τόσο στα κρυογενικά όσο και στα μη κρυογενικά κατεργασμένα εργαλεία. Ωστόσο τα κρυογενικά κατεργασμένα εργαλεία παρουσιάζουν υψηλότερη διάρκεια ζωής.

Στη δοκιμή pin-on-disc χρησιμοποιήθηκαν μικροί κύλινδροι από M2 ταχυχάλυβα διαμέτρου 4,9mm και μήκους 20mm, σε δύο ποιότητες λειαντικού χαρτιού αλλά δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων.

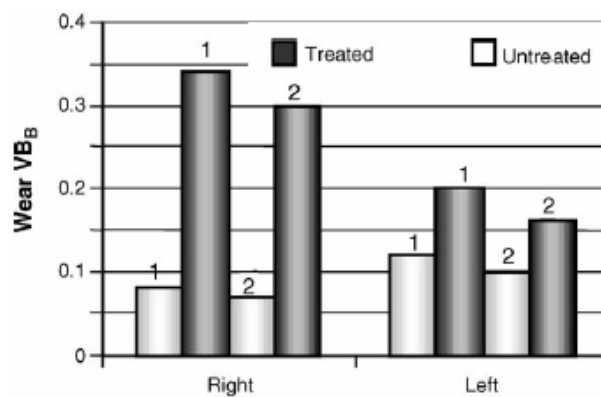
Κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένα M2 HSS τρυπάνια, δοκιμάστηκαν σε χαλύβδινα δοκίμια AISI 8640 μέσης σκληρότητας HV 290 (kgf/mm<sup>2</sup>). Για την εκτίμηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο. Οι δοκιμές έγιναν για ταχύτητες κοπής 30, 35 και 40 m/min και πρόωση σταθερή 0.11 mm/rev. Η διάρκεια ζωής των κρυογενικά κατεργασμένων κοπτικών εργαλείων είναι πάντα μεγαλύτερη συγκριτικά με τα μη κρυογενικά κατεργασμένα και σε ποσοστιαία βάση οι διαφορές ήταν 73%, 60%, 117% για ταχύτητες κοπής 30, 35 και 40 m/min αντίστοιχα. με κριτήρια  $VB_B = 0.3$  mm και  $VB_{Bmax} = 0.7$  mm, βλ. Σχήμα 8.



**Σχήμα 8** Διάρκεια ζωής τρυπανιών σε πλήθος οπών μέχρι το όριο του πεδίου φθοράς.

Οι εργοστασιακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με κονδύλια σε ξηρές συνθήκες με ταχύτητα κοπής 89 m/min και ταχύτητα πρόωσης 1200 mm/min. Η φθορά του

εργαλείου παρατηρήθηκε στο οπτικό μικροσκόπιο και η τραχύτητα των επιφανειών που διαμορφώθηκαν με διάταξη PERTHEN-58p. Τα κρυογενικά κατεργασμένα εργαλεία παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο πεδίο φθοράς, βλ. Σχήμα 9. Παρ' όλο που η φθορά τους ήταν μεγαλύτερη, η τραχύτητα των επιφανειών των κατεργασμένων τεμαχίων ήταν σχεδόν η ίδια. Όταν χρησιμοποιείται ο σχηματισμός burrs ως κριτήριο του χρόνου ζωής των εργαλείων μετρήθηκε παραγωγή 95 τεμαχίων, από κρυογενικά κατεργασμένα εργαλεία και 123 τεμαχίων από μη κρυογενικά κατεργασμένα εργαλεία. Είναι προφανές ότι η κρυογενική κατεργασία είχε αρνητική επίδραση στην απόδοση των εργαλείων στη συγκεκριμένη δοκιμή.



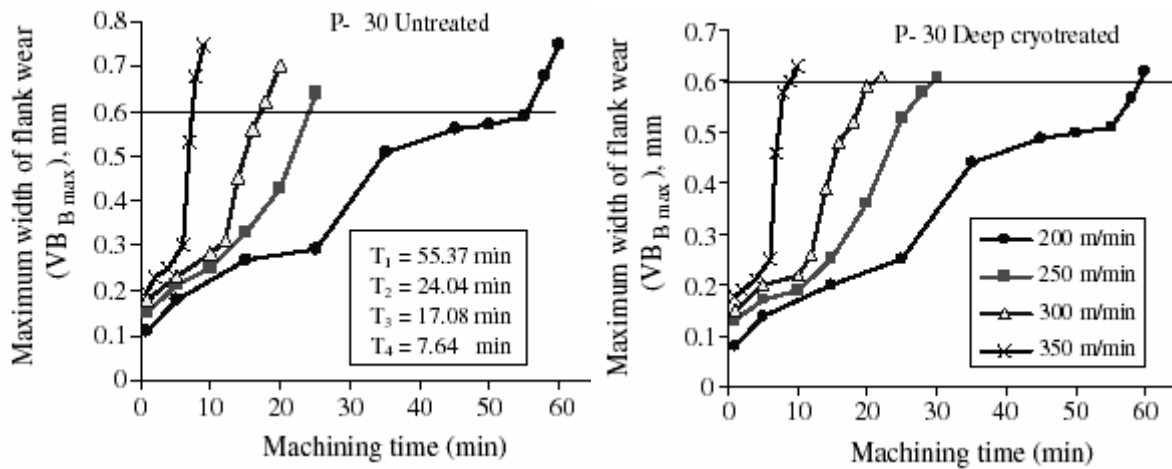
Σχήμα 9 Πεδίο φθοράς των κοπτικών εργαλείων μετά από κατεργασία 200 τεμαχίων.

#### 2.4 Κατεργασιμότητα C45 με κρυογενικά κατεργασμένα πλακίδια βολφραμίου

Στη συγκεκριμένη έρευνα [20] χρησιμοποιήθηκαν πλακίδια από καρβίδια βολφραμίου ISO P-30, με πολυστρωματική επίστρωση TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> πάχους 25μm. Η διαδικασία της κρυογενικής κατεργασίας που εφαρμόστηκε είναι η ακόλουθη: σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας από θερμοκρασία περιβάλλοντος στους -176°C με ρυθμό μείωσης 2°C ανά λεπτό, παραμονή στους -176°C για 24 ώρες και έπειτα άνοδος της θερμοκρασίας με ρυθμό 2°C ανά λεπτό ξανά σε θερμοκρασία δωματίου.

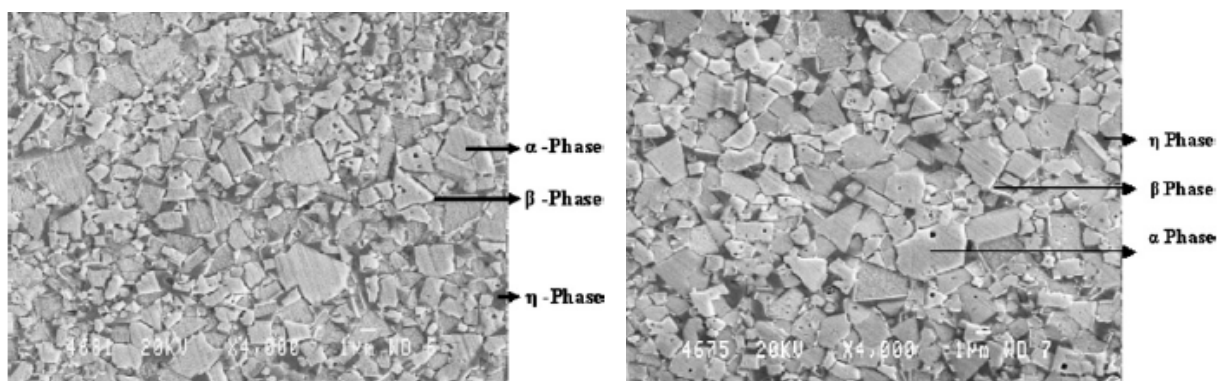
Έγινε τόννευση τεμαχίων από χάλυβα C45 με βάθος κοπής 1mm, πρόωση 0.22 mm/rev και ταχύτητες κοπής 200, 250, 300 και 350 m/min. Η φθορά μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μηχανουργικό μικροσκόπιο. Η διάρκεια ζωής του εργαλείου θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί σε μέγιστο πεδίο φθοράς 0,6mm (ISO 3685-1993). Στο σχήμα 10 φαίνεται ότι η φθορά των πλακιδίων που είχαν κατεργαστεί κρυογενικά είναι μικρότερη σε σχέση με αυτά που δεν είχαν.





**Σχήμα 10 Μέγιστο πεδίο φθοράς σε συνάρτηση με τη διάρκεια κατεργασίας για απλά και κρυογενικά κατεργασμένα πλακίδια P-30.**

Μικροσκοπική ανάλυση, βλ. Σχήμα 11, δείχνει την πιο σταθερή μαρτενσιτική δομή του κρυσταλλικού πλέγματος στην περίπτωση της κρυογενικής κατεργασίας.



**Σχήμα 11 Μικροδομή απλού και κρυογενικά κατεργασμένου πλακιδίου P-30.**

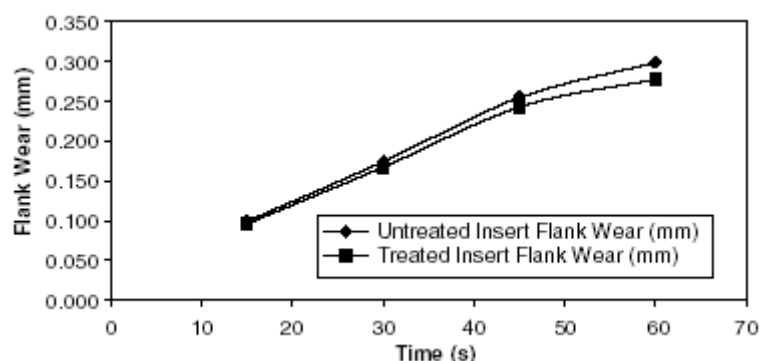
Μετρήθηκε επίσης αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της κρυογενικής κατεργασίας πράγμα που αυξάνει την ικανότητα σκεδασμού της θερμότητας και βοηθά στη μείωση της θερμοκρασίας στις ακμές του κοπτικού εργαλείου.

## 2.5 Απόδοση κρυογενικά κατεργασμένων σκληρομετάλλων σε τórνευση

Άλλη μελέτη [8] έγινε για την αξιολόγηση της απόδοσης κοπτικών εργαλείων από καρβίδια βολφραμίου σε ορθογωνική κοπή σε χάλυβα μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα (ASSAB 760). Οι δοκιμές κοπής έγιναν σε διάφορες ταχύτητες και τα πλακίδια εξετάστηκαν σε συνεχείς και σε επαναλαμβανόμενες κοπές. Έπειτα από κάθε κοπή μετρήθηκε το πεδίο φθοράς χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο Mitutoyo και σύμφωνα με τη τυποποίηση ISO 3685.

Η κρυογενική κατεργασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής : Με την εισαγωγή των πλακιδίων στον ψυκτικό θάλαμο πραγματοποιείται σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας για διάστημα 6 ωρών με τη θερμοκρασία να φτάνει στους  $-184^{\circ}\text{C}$ . Τα δοκίμια παραμένουν στη θερμοκρασία αυτή για περίπου 18 ώρες και στη συνέχεια θερμαίνονται σταδιακά μέχρι να αποκτήσουν ξανά θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η άνοδος της θερμοκρασίας διαρκεί 6 ώρες και με το πέρας αυτής πραγματοποιείται η τελική φάση που είναι η διαδικασία της ανόπτησης.

Σε γενικές γραμμές τα κρυογενικά κατεργασμένα πλακίδια παρουσίασαν μικρότερο πεδίο φθοράς σε σχέση με τα μη, κατά τα αρχικά στάδια της κοπής, εκτός από την περίπτωση όπου η ταχύτητα κοπής ήταν μεγάλη ( $300\text{ m/min}$ ), βλ. Σχήμα 12. Καθώς η κοπή προχωρά υπάρχει ένα οριακό σημείο, πέρα από το οποίο το κατεργασμένο πλακίδιο αρχίζει να συμπεριφέρεται όπως και το μη κατεργασμένο. Όπως φαίνεται η ταχύτητα κοπής παίζει σημαντικό ρόλο. Τα καλύτερα αποτελέσματα καταγράφηκαν για ταχύτητα κοπής  $300\text{ m/min}$ , και μάλιστα σε ολόκληρη τη διάρκεια της κοπής. Γενικά, το πεδίο φθοράς ήταν ελαφρώς μικρότερο στα κατεργασμένα εργαλεία περίπου 4% -10% ανάλογα με τις συνθήκες.



Σχήμα 12 Πεδίο φθοράς για ταχύτητα κοπής= $300\text{ m/min}$ , βάθος κοπής= $1\text{ mm}$  και πρόωση  $0,1\text{ mm/rev}$ .

## 2.6 Βελτίωση της αντίστασης σε φθορά κρυογενικά κατεργασμένων εργαλειοχαλύβων



Η μελέτη [4] είναι μια συγκριτική μελέτη της βελτίωσης της αντοχής σε φθορά κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων.

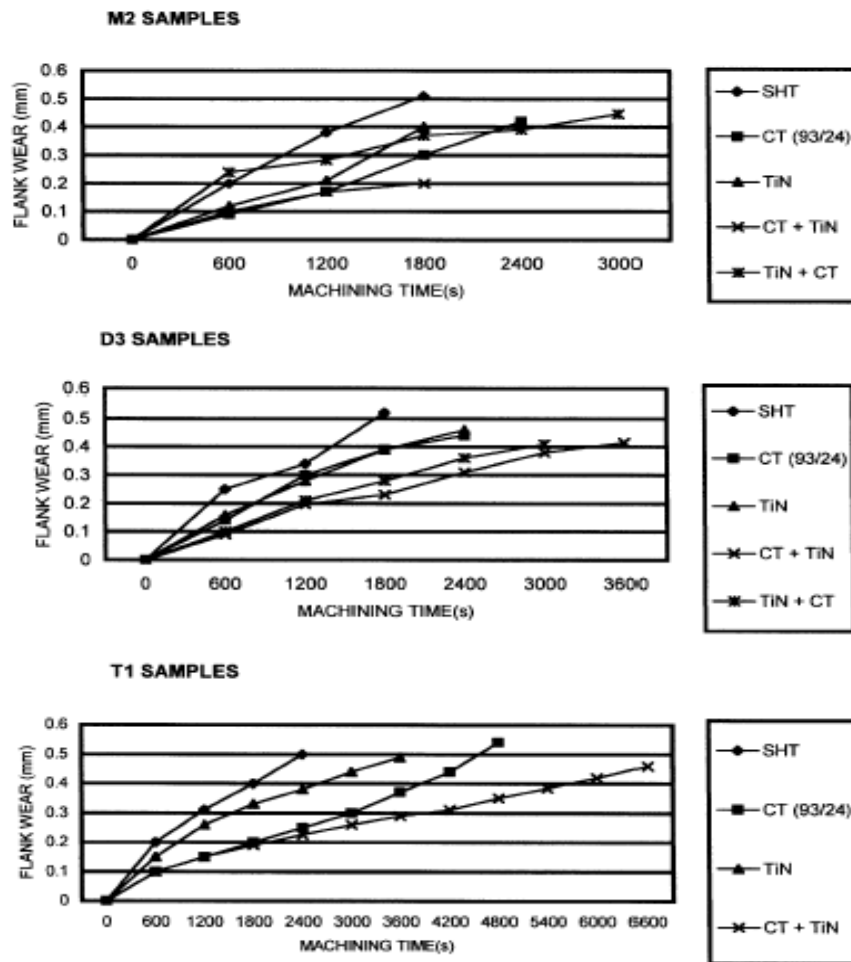
Για τη σύγκριση πραγματοποιήθηκαν δοκιμή πλευρικής φθοράς, και δοκιμή φθοράς ολίσθησης.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν κύλινδροι εμβόλων σε κατάλληλα μεγέθη. Σε κάθε δείγμα εφαρμόστηκε ειδική κατεργασία, βλ. Πίνακα 4. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι χάλυβες M2 και T1. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε χάλυβας D3 ώστε να ελεγχθεί η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε τόρνο με ταχύτητα κοπής 30 m/min, πρόωση 0,13 mm/min, βάθος κοπής 0.5 mm χωρίς υγρό κοπής και με υλικό εργοτεμαχίου μαλακό χάλυβα. Η κατεργασία στο τόρνο εφαρμόζεται μέχρι το πεδίο φθοράς να υπερβεί τη τιμή των 0,4mm.

**Πίνακας 4 Κατηγορίες των κατεργασιών που εφαρμόστηκαν κατά περίπτωση.**

Cases	Purpose	Nomenclature followed
1. Hardened and tempered	Standard tool for comparing the tool life of cryotreated tools	SHT (standard heat treated)
2. Cryotreated at 93 K for 24 h	Cryogenic treatment for tool steels	CT (93/24)
3. Cryotreated at 133 K for 24 h	To check the effect of lowering the temperature deep below cold treatment levels	CT (133/24)
4. Cryotreated at 163 K for 24 h	To check the effect of lowering the temperature deep below cold treatment levels	CT (163/24)
5. Cryotreated at 93 K for 6 h	To check the significance of isothermal holding time at the treatment temperature	CT (93/6)
6. Cryotreated at 93 K for 6 h and quenched in LN <sub>2</sub> for 2 h	To check the effects of reducing the temperature below 93 K	CT (93/6) + LN <sub>2</sub> /2
7. Tempered and cryotreated at 133 K for 24 h	To confirm whether tempering is to be done before cryogenic treatment	TCT (133/24)
8. Tempered and cryotreated at 93 K for 24 h	To confirm whether tempering is to be done before cryogenic treatment	TCT (93/24)
9. Titanium nitride coated	To compare the benefits of cryogenic treatment with that of surface coatings	TiN
10. Cryotreated (CT (93/24)) and then coated with Titanium	To compare the benefits of cryogenic treatment with that of surface coatings	CT + TiN
11. Titanium nitride coated and then cryotreated (CT (93/24))	To compare the benefits of cryogenic treatment with that of surface coatings	TiN + CT

Παραδείγματα εξέλιξης της φθοράς με το χρόνο κοπής φαίνονται στο σχήμα 13. Διαπιστώθηκε ότι η ζωή των εργαλείων αυξήθηκε λόγω κρυογενικής κατεργασίας. Σημειώθηκαν ποσοστά βελτίωσης 86,6% και 48% στους χάλυβες M2 και D3 αντίστοιχα συγκρινόμενα με τα δείγματα SHT. Ακόμη η μέγιστη βελτίωση παρατηρήθηκε στο χάλυβα T1, κάτι που πιθανόν οφείλεται στα καρβίδια βολφραμίου.



Σχήμα 13 Πεδίο φθοράς σε σχέση με το χρόνο κατεργασίας για διάφορες περιπτώσεις.

Και στη δοκιμή φθοράς ολίσθησης χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια χαλύβων D3 και M2 που χρησιμοποιούνται σε βαφές και διατρήσεις αντίστοιχα. Οι παράμετροι αυτής της δοκιμής είναι το φορτίο, η ταχύτητα και η απόσταση ολίσθησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση της αντίστασης σε φθορά σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις, κατατάσσοντάς τες στην ακόλουθη φθίνουσα σειρά :

1. CT (93/24);
2. TCT (93/24);
3. CT (133/24);
4. CT (163/24);
5. CT (93/6 + LN<sub>2</sub>/2);
6. SHT;
7. CT (93/6);
8. TCT (133/24).

### 3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

#### 3.1 Εργαλειοχάλυβες

Οι εργαλειοχάλυβες είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για πολλές χρήσεις στην τεχνολογία των κατεργασιών. Η καταλληλότητά τους αυτή προέρχεται από την ιδιαίτερη σκληρότητά τους, την αντίστασή τους σε τριβή και την ικανότητά τους να μη παραμορφώνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Μια από τις πλέον διαδομένες εφαρμογές τους είναι στην κατασκευή μητρών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη βελτίωση των ιδιοτήτων εργαλειοχαλύβων με κρυογενική κατεργασία.

#### 3.2 Κρυογενική κατεργασία για βελτίωση της αντοχής σε φθορά

Στόχος της εργασίας [9] είναι να εξετάσει ποια μεταλλικά υλικά ανταποκρίνονται καλύτερα στη κρυογενική κατεργασία με κριτήριο τη φθοράς λείανσης βλ. Πίνακα 5.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμή της αντοχής σε φθορά λείανσης είναι δοκίμια κυλινδρικής διατομής με διάμετρο 12,7mm και μήκος 64mm. Για κάθε κατηγορία υλικού εξετάστηκαν τρία σετ δειγμάτων : Στο πρώτο τα δοκίμια δεν έχουν υποστεί καμία κρυογενική κατεργασία πέραν της συμβατικής θερμικής κατεργασίας, στο δεύτερο τα δοκίμια μετά τη θερμική κατεργασία ψύχθηκαν σταδιακά από θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους 189 K, με ρυθμό 3°C/min και στο τρίτο τα δείγματα ψύχθηκαν από θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους 77 K, με ρυθμό 3°C/min, αφού είχαν ήδη υποστεί την ίδια θερμική κατεργασία όπως και τα δυο προηγούμενα σετ. Στην ιδιοκατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για το τεστ φθοράς το δείγμα τοποθετείται σε μια προσάρτηση στο βραχίονα φορτίου και η άκρη του δείγματος πιέζεται με δύναμη 430N στην περιφέρεια λειαντικού τροχού με ταχύτητα επιφανείας 480mm/s. Μια δέσμη αέρα κατευθύνεται στην άκρη του δείγματος για να ψύχει και για να απομακρύνει τα σωματίδια από τον τροχό. Η δοκιμή στα δείγματα έγινε για δεκαπεντάλεπτα διαστήματα. Μεταξύ των δοκιμών το δείγμα απομακρύνεται από τη διάταξη και μετράται το βάρος του ώστε να καθοριστεί η απώλεια μάζας του λόγω φθοράς. Ο συνολικός χρόνος για την πλειονότητα των δειγμάτων είναι 75min.

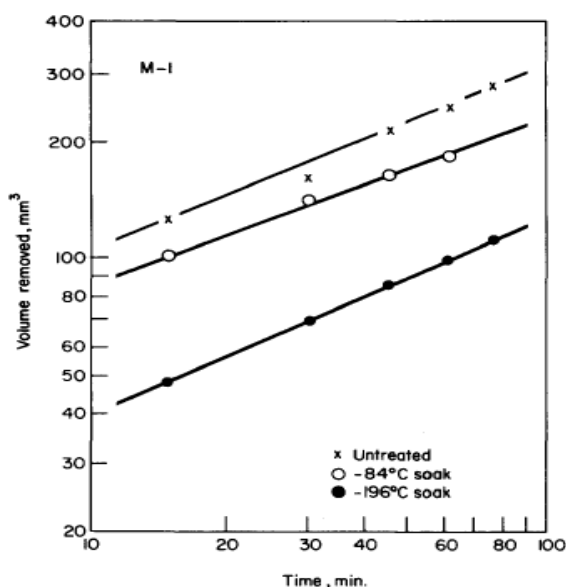
Στο σχήμα 14 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παραστάσεις του όγκου του αφαιρούμενου υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Πίνακας 5 Υλικά που εξετάστηκαν

AISI No	Alloy type	Description
<b>Tool steels</b>		
S-7	315	Silicon tool steel
P-20	380	Mold steel
O-1	410	Oil-hardening cold-work die steel
A-2	420	Chromium air-hardening cold-work die steel
A-6	426	Manganese air-hardening cold-work die steel
A-10	395	Graphitic tool steel
D-2	430	High-carbon high-chromium cold-work die steel
H-13	521	Chromium-molybdenum hot-work die steel
T-1	610	Tungsten high-speed tool steel
T-2	611	Tungsten high-speed tool steel
M-1	630	Molybdenum high-speed tool steel
M-2	650	Tungsten-molybdenum high-speed tool steel
<b>Stainless steels</b>		
303		Austenitic stainless steel
430		Ferritic stainless steel
440		Martensitic stainless steel
<b>Other metals</b>		
AQS Meehanite		Graphitic cast iron
CPM-10V		Alloy steel
8620		Nickel-chromium-molybdenum alloy steel
C1020		Plain carbon steel

Πίνακας 6 Αντίσταση σε φθορά για τις δυο κατηγορίες της κρυογενικής κατεργασίας

Material	Wear resistance ratio, $R_w/R_w^0$	
	189 K soak	77 K soak
<b>Group I</b>		
D-2	3.164	8.177
S-7	2.417	5.031
O-1	2.216	2.721
A-10	2.305	2.645
M-1	1.455	2.253
H-13	1.646	2.094
T-1	1.418	1.763
<b>Group II</b>		
440 SS	1.280	1.218
M-2	1.125	1.204
430 SS	1.162	1.199
8620	1.037	1.116
303 SS	1.053	1.108
<b>Group III</b>		
CPM-10 V	0.939	1.313
A-2	0.982	1.116
<b>Group IV</b>		
P-20	1.231	0.972
<b>Group V</b>		
C1020	0.982	0.972
AQS	0.966	0.964



Σχήμα 14 Χαρακτηριστικές παραστάσεις του όγκου του αφαιρούμενου υλικού συναρτήσει του χρόνου για M-1 χαλύβδινο εργαλείο.

Η αντίδραση των υλικών στη κρυογενική κατεργασία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε πέντε ομάδες, βλ. Πίνακα 6.

Ομάδα 1 : Αφορά τα υλικά εκείνα για τα οποία και οι δυο περιπτώσεις κρυογενικής κατεργασίας παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση (περισσότερο από 10%) στην αντίσταση στη φθορά και το θερμικό σοκ στους 77 K έχει καλύτερα αποτελέσματα απ' ότι στους 189 K.

Ομάδα 2 : Αφορά τα υλικά εκείνα για τα οποία και οι δυο περιπτώσεις κρυογενικής κατεργασίας παρουσιάζουν βελτίωση στην αντίσταση στη φθορά, αλλά η διαφορά μεταξύ των θερμικών σοκ στους 189 K και τους 77 K είναι μικρότερη του 10%.

Ομάδα 3 : Αφορά τα υλικά εκείνα για τα οποία το θερμικό σοκ στους 77 K βελτίωσε την αντοχή σε φθορά, ενώ στους 189 K όχι.

Ομάδα 4 : Αφορά τα υλικά εκείνα για τα οποία το θερμικό σοκ στους 189 K βελτίωσε την αντοχή σε φθορά, ενώ στους 77 K όχι

Ομάδα 5 : Αφορά τα υλικά για τα οποία καμία από τις δυο περιπτώσεις κρυογενικής κατεργασίας δεν βελτίωσε την αντοχή τους σε φθορά.

Όλα τα υλικά της ομάδας 1 ευνοούν την εμφάνιση υπολειπόμενου ωστενίτη κατά τη διάρκεια θερμικών κατεργασιών και για λόγους που αφορούν στη πληρέστερη μαρτενσιτική μετατροπή σε ωστενίτη δείχνουν τα καλύτερα αποτελέσματα για θερμικό σοκ στους 77K. Για τα ανοξείδωτα της ομάδας 2, η κρυογενική κατεργασία βελτίωσε την αντοχή σε φθορά σε ποσοστό 5% με 28%, ποσοστό αρκετά ικανοποιητικότερο απ' ότι για την Ομάδα 1.

Η δομή των ανθρακούχων χαλύβων ήταν πρακτικά μαρτενσιτική μετά τη σκλήρυνση και δεν υπήρχαν καθόλου κραματικά στοιχεία για να σχηματίσουν καρβίδια. Έτσι, είναι αναμενόμενο ότι η κρυογενική κατεργασία δεν έχει καμία επίπτωση στην αντίσταση σε φθορά του χάλυβα C1020 ή του χυτοσιδήρου Meehanite (διαφορά μικρότερη του 3%).

Σημειώνεται ότι η σκληρότητα των υλικών δεν επηρεάστηκε σε καμία περίπτωση από την κρυογενική κατεργασία.

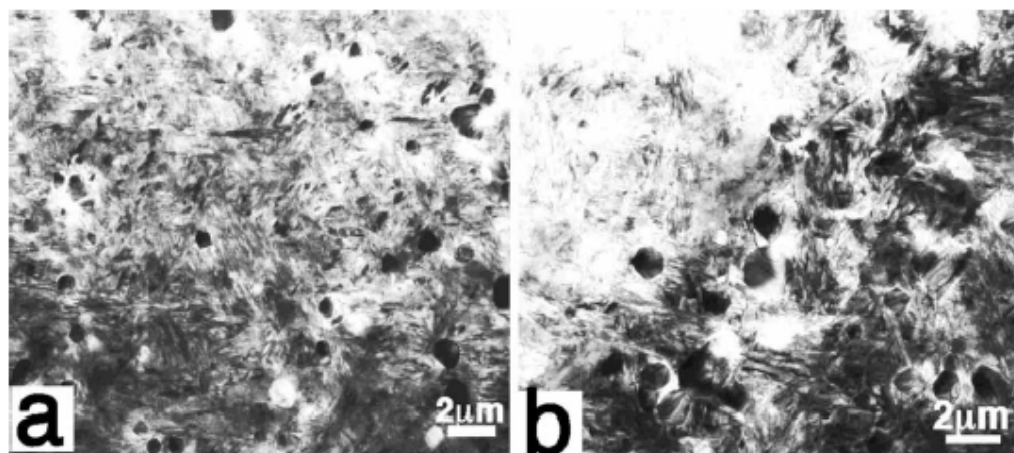
### 3.3 Μικροδομή εργαλειοχαλύβων M2

Στη μελέτη [14] εξετάζονται οι αλλαγές στη μικροδομή του εργαλειοχάλυβα M2 (0.85- 1% C, 6% W, 5% Mo, 4 % Cr, 2% V) πριν και μετά την εφαρμογή κρυογενικής

κατεργασίας. Ακόμη γίνεται μια προσπάθεια να αποσαφηνιστεί ο μηχανισμός με τον οποίο η κρυογενική κατεργασία δρα ευεργετικά στα υλικά, εξετάζοντας τις δυο επικρατέστερες απόψεις, δηλαδή τη μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη και τη δημιουργία η-καρβιδίων.

Στα δοκίμια εφαρμόστηκε θερμική κατεργασία αρχικά με θέρμανση με ρυθμό  $0,17^{\circ}\text{C/s}$  στους  $815^{\circ}\text{C}$  σε φούρνο κενού. Ακολούθησε συνεχής θέρμανση στους  $1100^{\circ}\text{C}$  σε περιβάλλον αζώτου υπό πίεση  $20\text{Pa}$  και παραμονή εκεί για μια ώρα, που ακολουθείται από απόσβεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε αέριο άζωτο. Η κρυογενική κατεργασία έγινε με βύθιση σε υγρό άζωτο για μια εβδομάδα. Για τη σύγκριση των κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένων δειγμάτων, και τα δυο θερμάνθηκαν στους  $200^{\circ}\text{C}$  σε περιβάλλον αζώτου για 24 ώρες. Για την εξέταση των δειγμάτων πάρθηκαν λεπτές φέτες από τις ράβδους και παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Τόσο στα κρυογενικά όσο και στα μη κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια δημιουργήθηκαν σφαιρικά καρβίδια  $\text{Fe}_4\text{M}_2$  με κυβική μικροδομή και παράμετρο πλέγματος  $a=11,5 \text{ \AA}$ , βλ. Σχήμα 15.

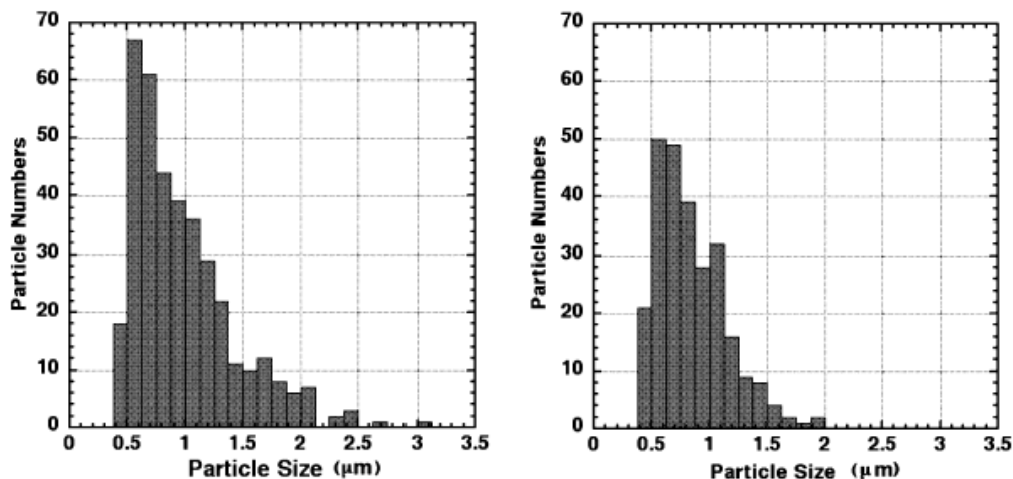


**Σχήμα 15** TEM ανάλυση του εργαλειοχάλυβα M2 χωρίς κρυογενική κατεργασία και ανόπτηση. Στο (a) τα καρβίδια είναι μικρά ενώ στο (b) είναι μεγάλα.

Το μέγεθος των καρβιδίων ποικίλει από  $0,3$  έως  $2\mu\text{m}$  και οι κατανομές του μεγέθους των μορίων στις περιπτώσεις κρυογενικής και μη κρυογενικής κατεργασίας είναι παρόμοιες, βλ Σχήμα 16. Παρ' όλα αυτά τα καρβίδια διανέμονται με πολύ μεγαλύτερη ομοιογένεια στη περίπτωση των δοκιμίων που υπέστησαν κρυογενική



κατεργασία. Σε ότι αφορά το ποσοστό όγκου των καρβιδίων, διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι υψηλότερο στη περίπτωση των κρυογενικά κατεργασμένων δειγμάτων, 11% έναντι 5% των απλών.



Σχήμα 16 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων στο χάλυβα M2 με (αριστερά) και χωρίς κρυογενική κατεργασία (δεξιά) και ανόπτηση στους 200°C.

Τα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια καθώς και αυτά στα οποία εφαρμόστηκε ψυχρή κατεργασία έχουν σχεδόν το ίδιο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη. Παρ' όλα αυτά η αντίσταση σε φθορά των πρώτων είναι σαφέστατα βελτιωμένη σε σχέση με αυτή των δεύτερων. Αυτό υποδηλώνει την επίδραση των καρβιδίων που είναι και περισσότερα και ομοιόμορφα διεσπαρμένα στα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια.

### 3.4 Επίδραση κρυογενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 4340

Στην εργασία [5] μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της κρυογενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή του AISI 4340 χάλυβα. Εφαρμόστηκαν συμβατικοί τρόποι σκλήρυνσης σε κάποια δοκίμια, ως επίπεδο αναφοράς.

Η κρυογενική κατεργασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής : Σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας στους -196°C και παραμονή των δειγμάτων στη θερμοκρασία αυτή για 24 ώρες και έπειτα σταδιακή επαναφορά των δειγμάτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με ρυθμό ψύξης και θέρμανσης 1,8°C/min.

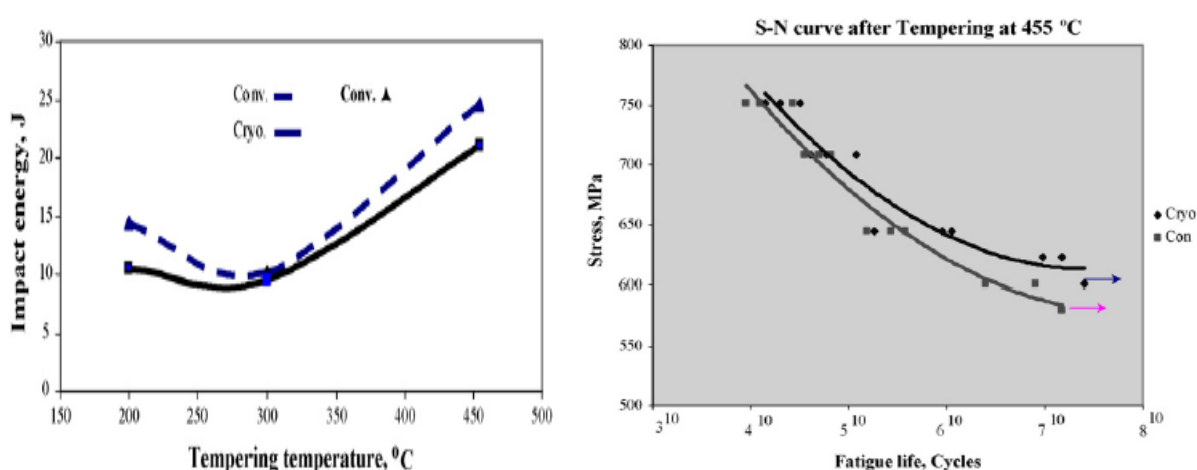
Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 8 θερμικές διαδικασίες που φαίνονται στο πίνακα 7.

**Πίνακας 7 Θερμικές κατεργασίες.**

Sequence	Heat treatment
1	Austenitise at 845 °C, oil quench
2	Austenitise at 845 °C, oil quench, temperature at 200 °C
3	Austenitise at 845 °C, oil quench, temperature at 300 °C
4	Austenitise at 845 °C, oil quench, temperature at 455 °C
5	Austenitise at 845 °C, oil quench, cryo
6	Austenitise at 845 °C, oil quench, cryo, temperature at 200 °C
7	Austenitise at 845 °C, oil quench, cryo, temperature at 300 °C
8	Austenitise at 845 °C, oil quench, cryo, temperature at 455 °C

Πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές συμπεριλαμβανομένων δοκιμής σκληρότητας, κρούσης και κόπωσης. Για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής εφαρμόστηκε μεταλλογραφία ενώ ελέγχθηκαν τα χαρακτηριστικά θραύσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Τέλος μετρήθηκε το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη και μαρτενσίτη πριν και μετά τη κρυογενική κατεργασία με διάθλαση νετρονίων.

Τα κρυογενικά κατεργασμένα δείγματα εμφανίζουν ελαφρώς υψηλότερο επίπεδο σκληρότητας, π.χ. από 54.5 HRC σε 55.3 HRC, λόγω αύξησης του ποσοστού του μαρτενσίτη. Επίσης, παρουσιάζουν ελαφρά καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση και ελαφρά χειρότερη συμπεριφορά σε κρούση, βλ. Σχήμα 17.



**Σχήμα 17 Συμπεριφορά σε κρούση και σε κόπωση δοκιμών πριν και μετά κρυογενική κατεργασία.**



### 3.5 Μεγιστοποίηση αντίστασης σε φθορά κρυογενικά κατεργασμένου ανοξ. χάλυβα

Η μελέτη [2] χρησιμοποιεί τη μέθοδο Taguchi ώστε να μεγιστοποιήσει την αντίσταση σε φθορά σε ένα ελατήριο εμβόλου από μαρτενσιτικό χάλυβα με 18% Cr (SR34).

Η αντίσταση σε φθορά του υλικού των δαχτυλιδιών υπολογίστηκε με τη μέθοδο της απώλειας βάρους σε ιδιοκατασκευή υπό φορτίο 5N, συχνότητα 5Hz και διαδρομή 10mm, με διάρκεια δοκιμής μια ώρα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων Taguchi με χρήση ANOVA οδήγησε στην ακόλουθη κατάταξη με φθίνουσα σειρά σημαντικότητας των παραγόντων που επηρεάζουν τη κρυογενική κατεργασία :

- α) Θερμοκρασία εμβάπτισης
- β) Χρονική διάρκεια εμβάπτισης
- γ) Ρυθμός ψύξης
- δ) Θερμοκρασία ανόπτησης

Για τις βέλτιστες τιμές των παραγόντων που καθορίστηκαν από τη μέθοδο Taguchi τα κρυογενικά κατεργασμένα δείγματα αυξάνουν την αντίστασή τους σε φθορά σε ποσοστό 43,8%.

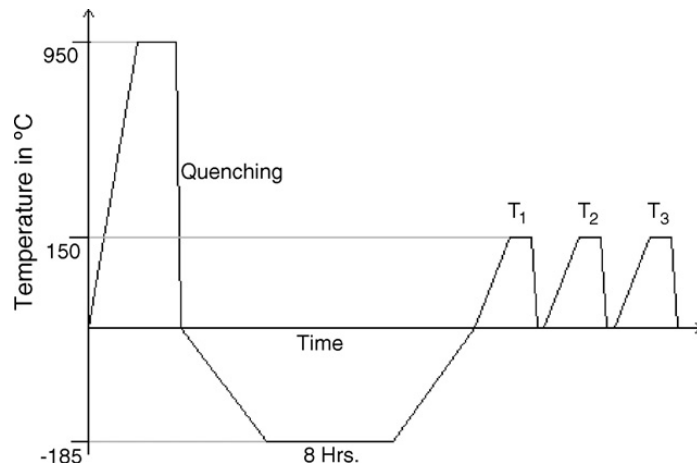
### 3.6 Επίδραση πολλαπλής ανόπτησης σε κρυογενικά κατεργασμένο χάλυβα D-3

Στη μελέτη [16] εξετάζεται η επίδραση των πολλαπλών ανοπτήσεων σε συνδυασμό με την κρυογενική κατεργασία εργαλειοχάλυβα D-3.

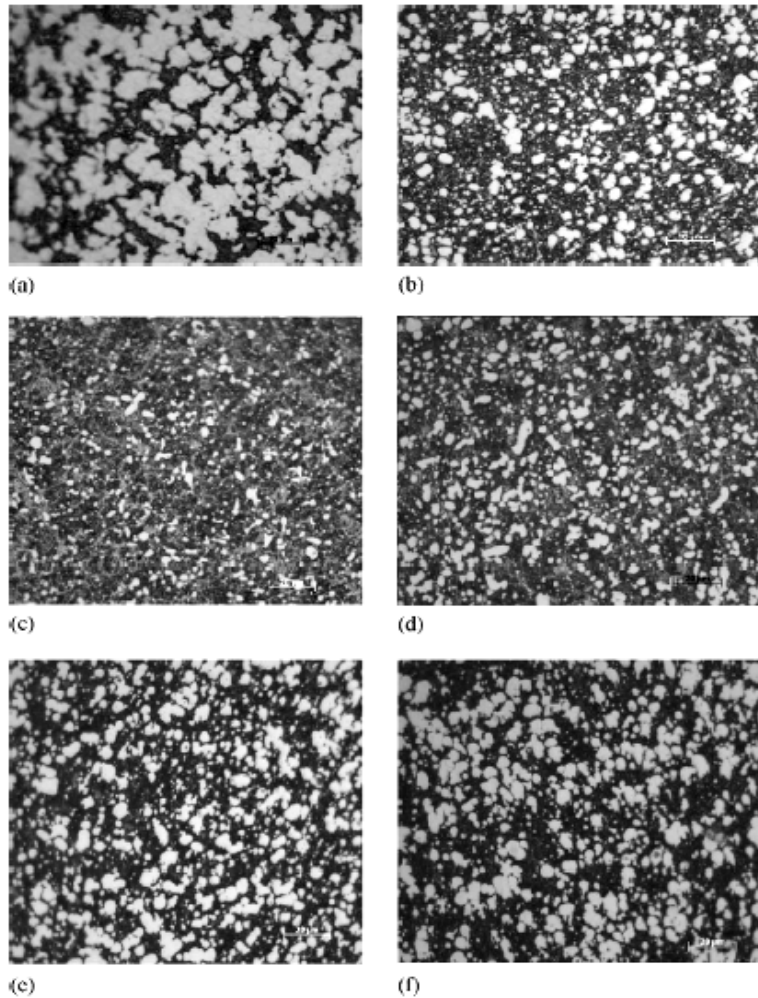
Στα δείγματα εφαρμόστηκαν διάφορες κατεργασίες που παρουσιάζονται συνοπτικά στο πίνακα 8 και το σχήμα 18. Σημειώνουμε εδώ ότι για την αποφυγή θερμικού σοκ, διατηρώντας το ρυθμό ψύξης στους 0.5°C/min μεσολάβησε ενδιάμεση φάση στους -140°C για 75 min. Η τελική θερμοκρασία ήταν οι -185°C και τα δείγματα παρέμειναν σε αυτή για 8 h.

**Πίνακας 8 Κατεργασίες που εφαρμόστηκαν στο χάλυβα D-3.**

Treatment	Particulars of treatment	Nomenclature followed
B-I	Hardening (950 °C) and tempering (275 °C for 2 h)	HT
B-II	Hardening (950 °C) and cryotreated (-185 °C for 8 h)	HC
B-III	Hardening (950 °C) and cryotreated (-185 °C for 8 h) and <i>single tempering</i> (150 °C for 2 h)	HCT
B-IV	Hardening (950 °C) and cryotreated (-185 °C for 8 h) and <i>double tempering</i> (150 °C for 2 h)	HCTT
B-V	Hardening (950 °C) and cryotreated (-185 °C for 8 h) and <i>triple tempering</i> (150 °C for 2 h)	HCTTT



Σχήμα 18 Διαδικασία της κρυογενικής κατεργασίας.



Σχήμα 19 Μικροδομή του χάλυβα D-3 για τις κατεργασίες (a) raw (500X); (b) HT (500X); (c) HC (500X); (d) HCT (500X); (e) HCTT (500X); (f) HCTTT (500X).

Στο σχήμα 19(a) παρατηρείται διασπορά μεγάλων καρβιδίων. Ακόμη φαίνεται καθαρά ότι υπάρχει σημαντική μείωση του μεγέθους των καρβιδίων περίπτωση (d) ιδιαίτερα για τη κατεργασία B-III (HCT) συγκριτικά με τη περίπτωση (b) για τη κατεργασία B-I (HT). Παρ' όλα αυτά ο απλά κρυογενικά κατεργασμένος χάλυβας B-II (HC), περίπτωση (c), δείχνει προϋπάρχοντα καρβίδια και σχηματισμό λεπτών καρβιδίων κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης. Τα αποτελέσματα από τη μέτρηση σκληρότητας φαίνονται στον πίνακα 9.

**Πίνακας 9 Επίδραση ανοπτήσεων στη σκληρότητα του χάλυβα D-3.**

Treatment	Condition	Hardness, RC	Mean hardness, RC
B-I	HT	64	61
		61	
		60	
B-II	HC	58	56
		55	
		57	
B-III	HCT	61	61
		60	
		61	
B-IV	HCTT	57	58
		58	
		59	
B-V	HCTTT	58	57
		57	
		56	

Όπως παρατηρείται στο πίνακα δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των κατεργασιών HT (B-I) και HCT (B-III), ενώ υπάρχει σταδιακή μείωση της σκληρότητας από τα δείγματα μονής ανόπτησης στα δείγματα τριπλής ανόπτησης και μικρότερη σκληρότητα παρατηρείται στη περίπτωση HC (B-II).

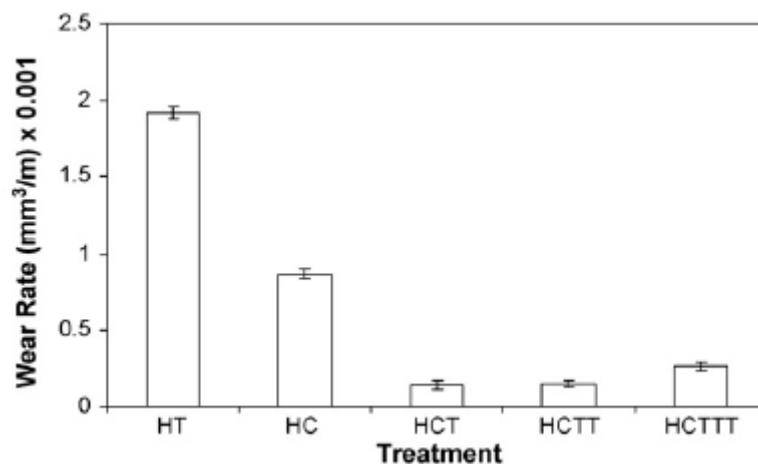
Είναι προφανές ότι η σκληρότητα επηρεάζεται λιγότερο από το μικρό μέγεθος των καρβιδίων στα εξεταζόμενα υλικά.

Για τη δοκιμή φθοράς εφαρμόστηκε η μέθοδος pin-on-disc με φορτίο 5,5 kg, ταχύτητα 3 m/s και διαδρομή 6000 m. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 20.

Προφανώς δεν υπάρχει ευθύς συσχετισμός με τη σκληρότητα. Παρ' όλο που η σκληρότητα των δειγμάτων HT και HCT είναι ίδια, από τη δοκιμή φθοράς παρατηρείται μια δραματική μείωση στην απώλεια μάζας για την περίπτωση HCT της τάξης του 93%. Σε αυτή τη περίπτωση η συμπεριφορά του υλικού ως προς τη φθορά επηρεάζεται σε

μεγάλο βαθμό από παραμέτρους που αφορούν τη μικροδομή του και τέτοιες είναι το μέγεθος των καρβιδίων και η κατανομή τους.

Αντίθετα ο υψηλότερος ρυθμός φθοράς αντιστοιχεί στη περίπτωση της HT κατεργασίας όπου ο μηχανισμός φθοράς καθορίζεται από παρεκτόπιση στρώσεων που οδηγεί σε τραχειά επιφάνεια.



Σχήμα 20 Ρυθμοί φθοράς του χάλυβα D-3 για διάφορες συνθήκες κατεργασίας.

Όσον αφορά τη διπλή και τριπλή ανόπτηση, τα καρβίδια συγχωνεύονται και μεγαλώνουν σε μέγεθος. Αυτό επιδεινώνει την αντοχή του D-3 χάλυβα για επόμενες ανοπτήσεις. Η ανάλυση των καταπονημένων επιφανειών διπλής, τριπλής ανόπτησης έδειξε ελαφρώς αυξημένες μικροαυλακώσεις καθώς επίσης και μείωση στη σκληρότητα. Τέλος φαίνεται ότι συνδυασμένη επίδραση θερμικής κατεργασίας και κρυογενικής κατεργασίας μπορεί να βοηθήσουν στη βελτίωση της αντοχής σε μονή ανόπτηση, ενώ δεν έχουν θετική επίδραση για επιπλέον ανοπτήσεις.

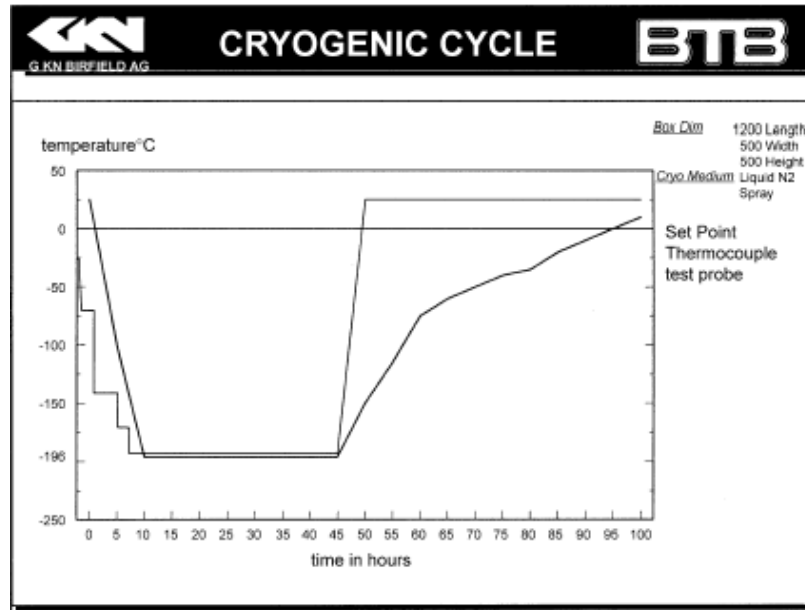
### 3.7 Επίδραση κρυογενικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες εργαλειοχαλύβων

Η εργασία [17] αναφέρεται μεταξύ άλλων και σε ταχυχάλυβες AISI M2. Το σχήμα 21 απεικονίζει τον κρυογενικό κύκλο που ακολουθήθηκε. Οι εναλλακτικές κατεργασίες φαίνονται στον πίνακα 10.

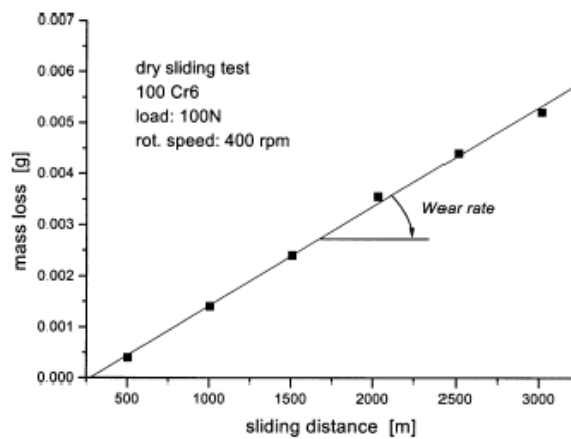
Οι δοκιμές φθοράς έγιναν σε συσκευή Amsler trybotester. Στο σχήμα 22 φαίνεται η καμπύλη φθοράς του δείγματος B και στον πίνακα 11 φαίνεται ο ρυθμός φθοράς και η σκληρότητα που μετρήθηκαν στα διάφορα δείγματα.

Πίνακας 10 Αντιπροσωπευτικά δείγματα που εξετάστηκαν.

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



Σχήμα 21 Κρυογενικός κύκλος.



Σχήμα 22 Καμπύλη φθοράς για το δείγμα Β.

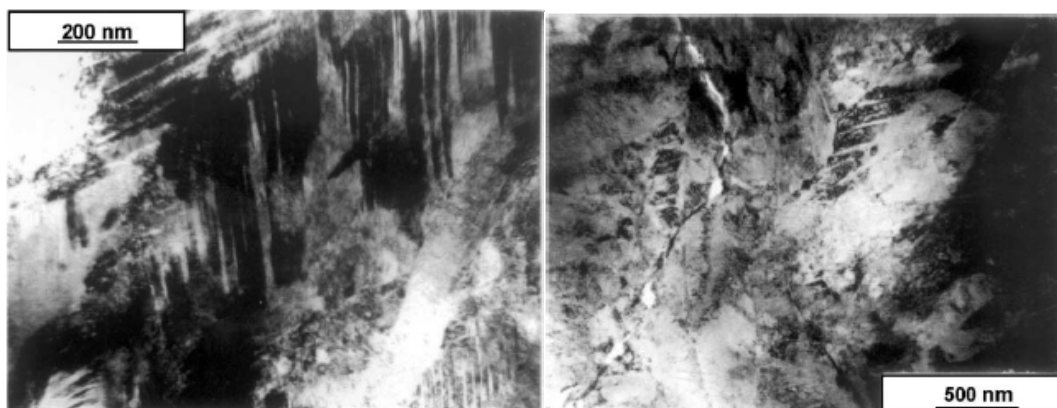
Πίνακας 11 Αποτελέσματα δοκιμών φθοράς – σκληρότητας.

---

Specimen	Wear rate ( $\text{g/m} \times 10^{-6}$ )	HV30
A	3.7	826
B	1.8	894
C	2.2	888
D	2.4	874

---

Από τις δοκιμές κρούσης παρατηρήθηκε μια εξαιρετική αύξηση στην απορροφώμενη ενέργεια μετά την κρυογενική κατεργασία: 0,56 J για το δοκίμιο B και 0,38 J για το δοκίμιο A. Τα δοκίμια A και B εξετάστηκαν σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, χωρίς όμως να αποκαλύψουν καμία διαφορά που να οφείλεται στην κρυογενική κατεργασία. Η προκαταρκτική ανάλυση TEM δεν έδειξε μεν σημαντικές διαφορές στη διασπορά καρβιδίων του ανοπτημένου μαρτενσίτη, αλλά ο ανοπτημένος μαρτενσίτης παρουσιάζει διδυμίες ενώ ο αντίστοιχος κρυογενικά κατεργασμένος όχι, βλ. Σχήμα 23.



**Σχήμα 23** Μικροδομή του ανοπτημένου μαρτενσίτη στα δοκίμια A (αριστερά) και B (δεξιά).

Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν ακόμη σε hot work εργαλειοχάλυβα AISI H13. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κρυογενική κατεργασία, αν εκτελεστεί μετά τη συνηθισμένη θερμική κατεργασία, αυξάνει την ανθεκτικότητα σε φθορά και δεν επηρεάζει τη σκληρότητα ούτε τη δυσθραυστότητα.

#### 4. ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ

Η κρυογενική κατεργασία όλων των δοκιμών, στη πειραματική διερεύνηση που θα ακολουθήσει, έγινε στις εγκαταστάσεις της εταιρίας CRYO cryogenic services. Ο κρυογενικός επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε εκεί, είναι ο 701 Deep Cryogenic Processor, της κατασκευάστριας εταιρίας 300 Below Inc, σχήμα 24. Ο επεξεργαστής είναι τριβάθμιος, 115 VAC ηλεκτρικός και εφοδιάζεται με υγρό άζωτο το οποίο αεροποιείται μέσω κατάλληλου συστήματος ψεκασμού ακριβώς την ώρα που εισέρχεται στο ψυκτικό θάλαμο.

Ο ψυκτικός θάλαμος του κρυογενικού επεξεργαστή είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ασάλι και φέρει μόνωση 5” από αφρό ουρεθάνης. Οι διαστάσεις του είναι 179.1cm x 67.3cm x 48.3cm και έχει τη δυνατότητα κατεργασίας υλικού 681 kg.

Το μοντέλο 701 ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, εφοδιασμένου με το κατάλληλο λογισμικό, εκτελώντας με ακρίβεια τις εντολές για μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, καταλήγοντας σε θερμοκρασία -300 F (-184 °C). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής της διαδικασίας ψύξης, μέσα από μια σειρά συγκεκριμένων διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτές αποτελούν τα λεγόμενα κρυογενικά προφίλ και για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι έξι. Στο πίνακα 12 περιγράφονται τα κρυογενικά προφίλ και στο σχήμα 25 δίνεται η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου και για τα έξι κρυογενικά προφίλ.



Σχήμα 24 701 Deep Cryogenic Processor.



**Πίνακας 12 Κρυογενικά προφίλ.**

<b>ΠΡΟΦΙΛ 1</b>			<b>ΠΡΟΦΙΛ 2</b>		
Hours	Minutes	Temperature (F)	Hours	Minutes	Temperature (F)
0	0	50	0	0	50
3	30	-100	4	15	-100
5	22	-214,2	6	33	-214,2
5	58	-214,2	7	28	-214,2
6	32	-246,5	8	10	-246,5
7	54	-289,4	9	38	-289,4
8	27	-300	10	22	-300
32	27	-300	34	22	-300
40	38	-50	44	20	-50

<b>ΠΡΟΦΙΛ 3</b>			<b>ΠΡΟΦΙΛ 4</b>		
Hours	Minutes	Temperature (F)	Hours	Minutes	Temperature (F)
0	0	50	0	0	-100
5	0	-100	1	52	-214,2
7	52	-214,2	2	32	-214,2
8	44	-214,2	3	6	-246,5
9	33	-246,5	4	22	-289,4
11	20	-289,4	4	58	-300
12	14	-300	28	58	-300
36	14	-300	37	0	-50
48	0	-50			

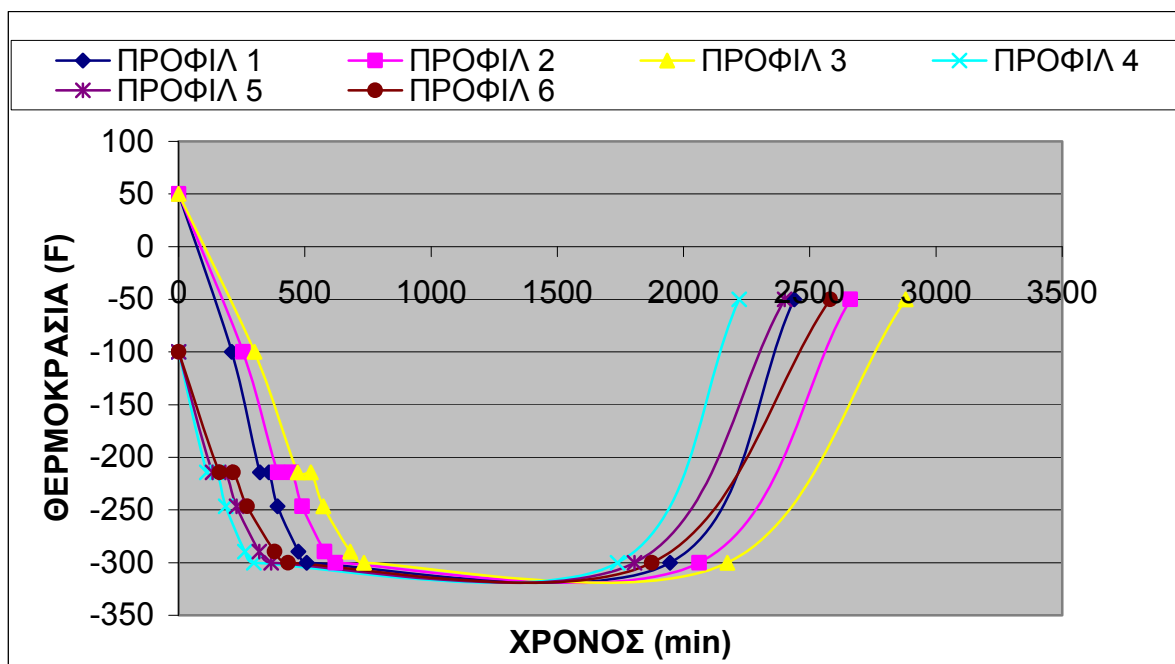
  

<b>ΠΡΟΦΙΛ 5</b>			<b>ΠΡΟΦΙΛ 6</b>		
-----------------	--	--	-----------------	--	--

---



Hours	Minutes	Temperature (F)	Hours	Minutes	Temperature (F)
0	0	-100	0	0	-100
2	14	-214,2	2	42	-214,2
3	5	-214,2	3	36	-214,2
3	50	-246,5	4	32	-246,5
5	20	-289,4	6	20	-289,4
6	6	-300	7	14	-300
30	6	-300	31	14	-300
40	0	-50	43	0	-50



Σχήμα 25 Γραφική παράσταση των κρυογενικών προφίλ.

## 5. ΠΕΙΡΑΜ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

Το πρώτο μέρος των πειραματικών δοκιμών έχει σαν στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στις ιδιότητες δύο χαλύβων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη ανάμεσα σε κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια από τα δύο υλικά. Εξετάστηκε η μικροδομή των υλικών με έμφαση στη διασπορά των καρβιδίων, στη συνέχεια μετρήθηκε η μικροσκληρότητα των χαλύβων και τρίτο μελετήθηκε η αντίσταση των υλικών σε φθορά - τριβή.

### 5.2 Χάλυβες

Ο πρώτος χάλυβας είναι ο SLEIPNER. Πρόκειται για εργαλειοχάλυβα με χημική σύσταση που φαίνεται στο πίνακα 13. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν είναι ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 15mmx13mm.

Ο δεύτερος χάλυβας είναι ο QRO 90 Supreme. Πρόκειται για εργαλειοχάλυβα της ίδιας εταιρίας παραγωγής με τον SLEIPNER, της Uddeholm, και έχει χημική σύσταση που φαίνεται στο πίνακα 14. Τα δοκίμια είναι επίσης ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 15mmx12mm.

**Πίνακας 13 Χημική σύσταση του χάλυβα Sleipner**

Στοιχείο	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Ποσοστό %	0.9	0.9	0.5	7.8	2.5	0.5

**Πίνακας 14 Χημική σύσταση του χάλυβα QRO 90 Supreme**

Στοιχείο	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Ποσοστό %	0.38	0.30	0.75	2.6	2.25	0.9

### 5.3 Κρυογενική κατεργασία

Ένα δοκίμιο για καθέναν από τους παραπάνω χάλυβες κατεργάστηκε κρυογενικά. Για την κατεργασία τους επιλέχθηκε το κρυογενικό προφίλ 3, με διάρκεια 48 ώρες. Με το πέρας αυτής τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε διαδικασία ανόπτησης, δηλαδή θέρμανσή

τους στους 145°C για διάρκεια μιας ώρας. Η ανόπτηση επαναλήφθηκε και δεύτερη φορά. Συνολικά η διαδικασία διήρκεσε 50 ώρες.

## 5.4 Μικροδομή

### 5.4.1 Προετοιμασία δοκιμίων

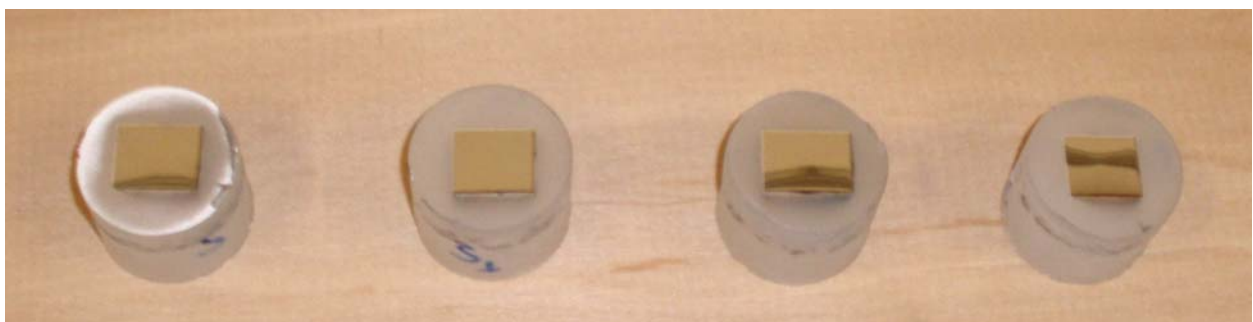
Η διαδικασία ξεκινά με τον εγκιβωτισμό των δοκιμίων σε ρητίνη, σχήμα 26, και τη λείανση τους σε μηχανή λείανσης Struers LaboPol-5, σχήμα 27. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τα τεμάχια προσαρμόζονται στις οπές, που βρίσκονται στο άνω μέρος της μηχανής. Ο βραχίονας κατεβαίνει και τελικά τα τεμάχια ακουμπούν στη περιστρεφόμενο πλατό. Πάνω στη πλατό τοποθετούμε τα γυαλόχαρτα. Χρησιμοποιήσαμε μια σειρά από γυαλόχαρτα Waterproof Silicon Carbide Paper FEPA P # 500, 800, 1000, 1200 και 2400 και τέλος βελούδα με πάστα Alumina κοκκομετρίας 1μm και 0.1μm. Στη συνέχεια, για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τη μικροδομή των χαλύβων στο οπτικό μικροσκόπιο εφαρμόσαμε στα δοκίμια χημική προσβολή. Τα αντιδραστήρια που επιλέξαμε είναι :

Για τον χάλυβα Sleipner :

- Αντιδραστήριο Nital. Διάλυμα νιτρικού οξέος περιεκτικότητας 8% για χρόνο εφαρμογής 10sec.
- Αντιδραστήριο Picral. Διάλυμα πικρικού οξέος περιεκτικότητας 4%, με προσθήκη 3ml HCL, για χρόνο εφαρμογής 6sec.

Για το χάλυβα QRO 90 Supreme :

- Αντιδραστήριο Nital. Διάλυμα νιτρικού οξέος περιεκτικότητας 8% για χρόνο εφαρμογής 25sec.



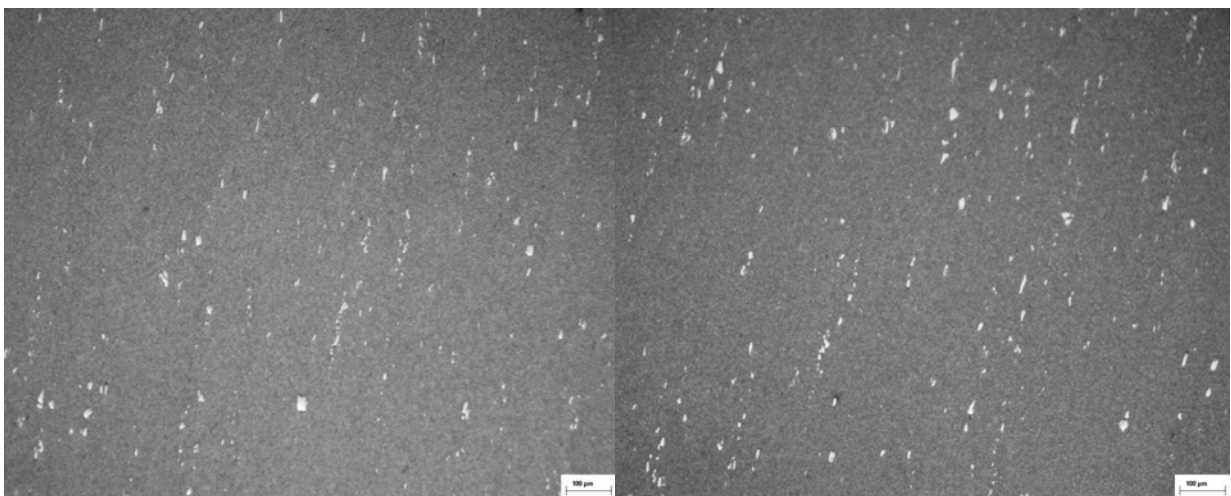
**Σχήμα 26 Δοκίμια μετά τη λείανση.**



Σχήμα 27 Λειαντική μηχανή Struers.

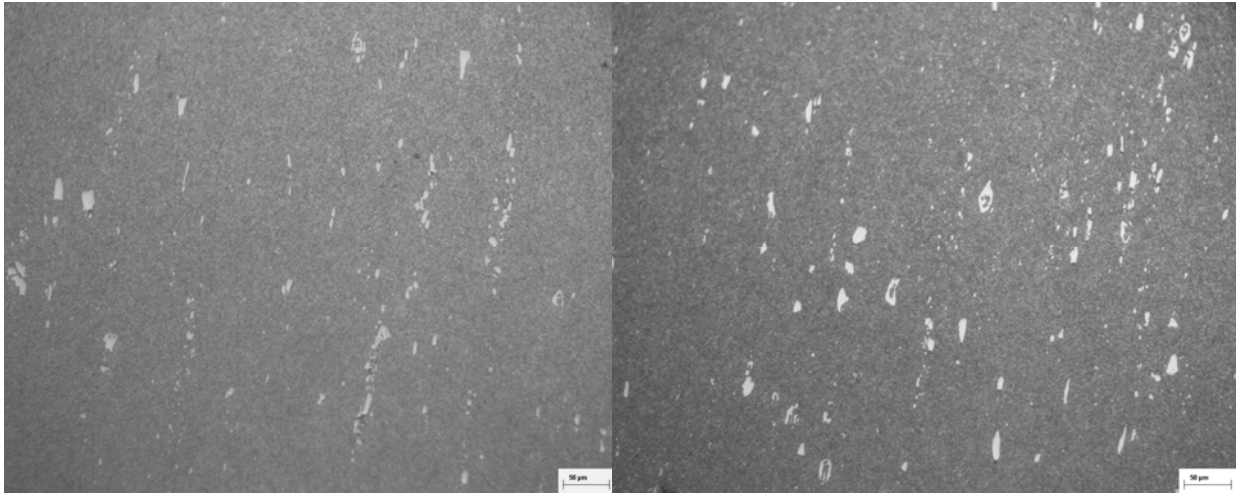
#### 5.4.2 Μεταλλογραφία

Χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο LEICA DMILM. Με τη βοήθεια του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας Image Pro Plus πήραμε φωτογραφίες σε διάφορες μεγεθύνσεις από κάθε δοκίμιο σε συνδυασμό με διαφορετικά αντιδραστήρια, βλ. Σχήματα 28, 29, 30 31,32 και 33.

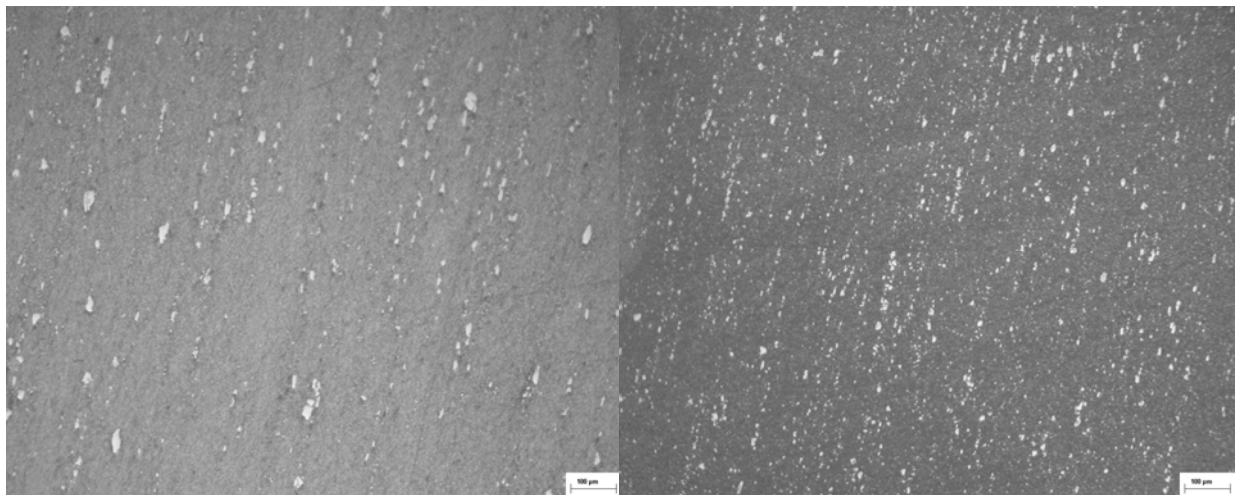


Σχήμα 28 Sleipner, Nital 8%, x10. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

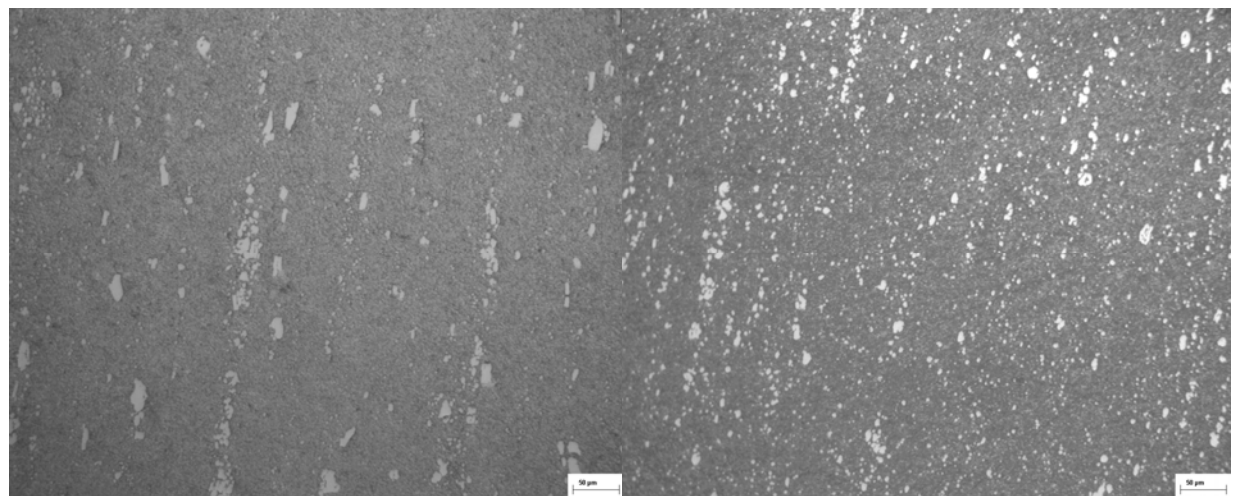




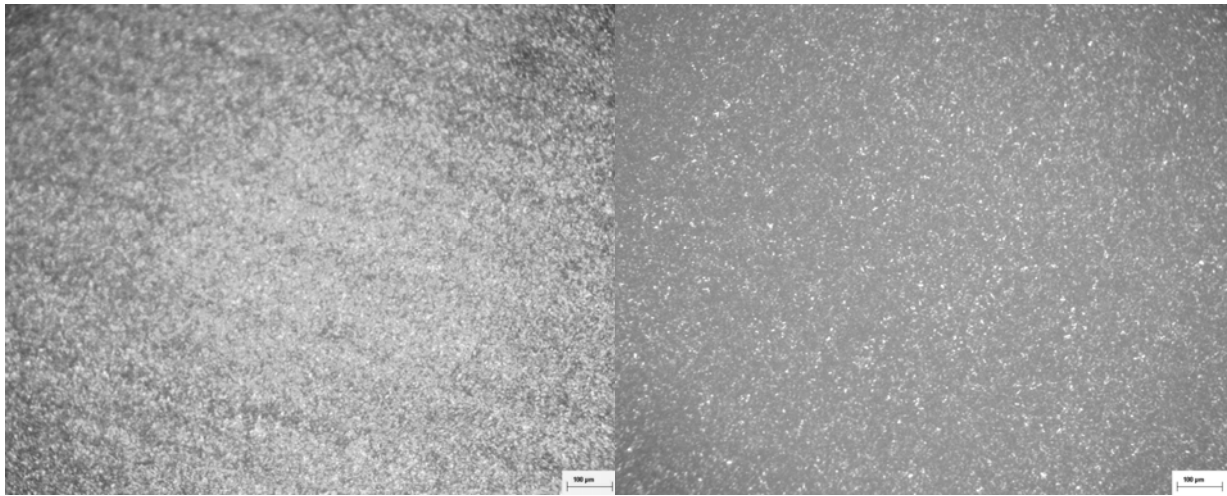
Σχήμα 29 Sleipner, Nital 8%, x20. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



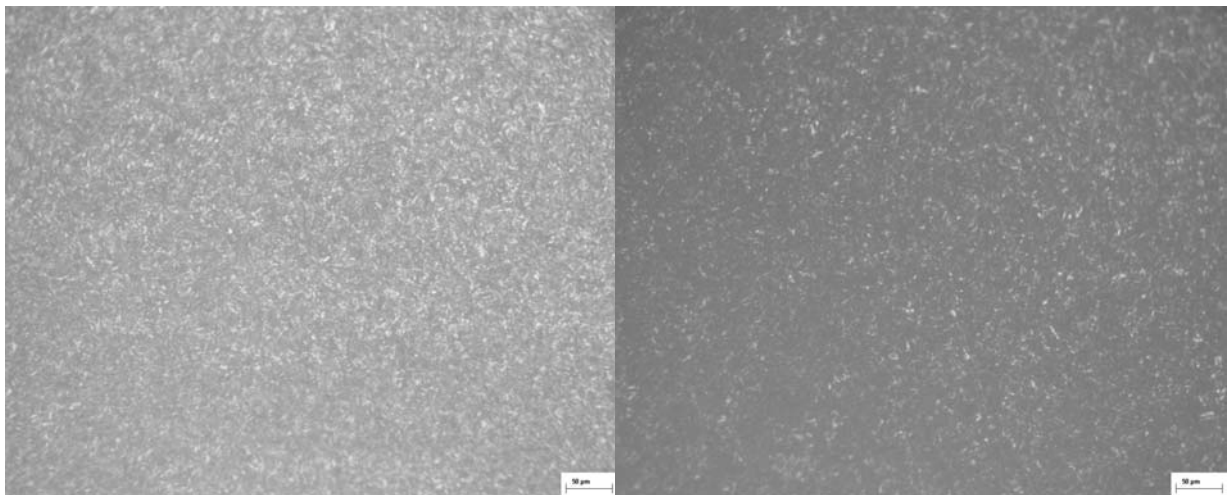
Σχήμα 30 Sleipner, Picral 4%, x10. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



Σχήμα 31 Sleipner, Picral 4%, x20. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



**Σχήμα 32 QRO, Nital 8%, x10. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).**



**Σχήμα 33 QRO, Nital 8%, x20. Απλό δοκίμιο (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).**

Όπως παρατηρούμε στα παραπάνω σχήματα, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένων χαλύβων όσον αφορά τα καρβίδια. Είναι εμφανές, ότι όταν εφαρμόστηκε κρυογενική κατεργασία είχαμε περισσότερα, λεπτότερα και ομοιογενώς κατανεμημένα καρβίδια.

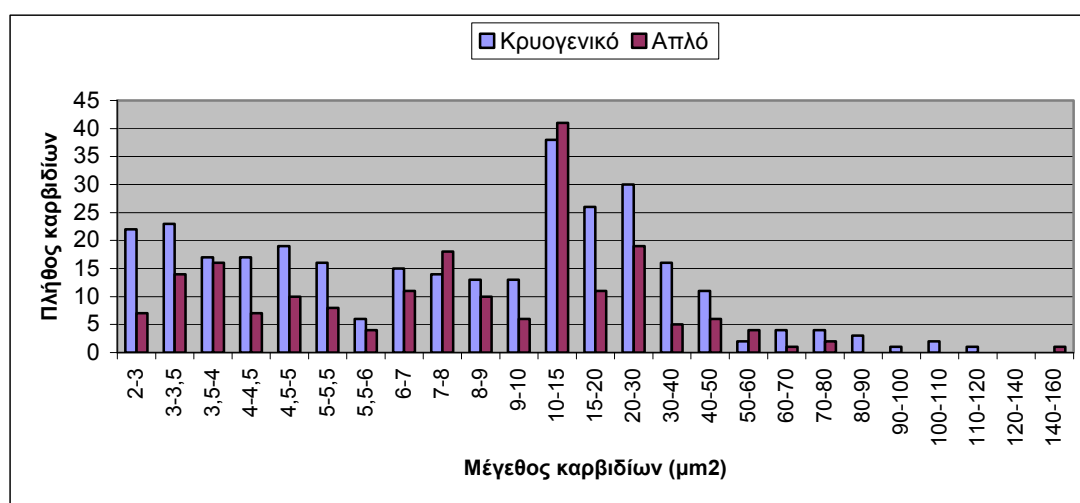
Στη συνέχεια, ποσοτικοποιήσαμε τις μεταβολές αυτές των καρβιδίων. Με τη βοήθεια του προγράμματος Image Pro Plus μετρήσαμε το πλήθος των καρβιδίων, το μέγεθός τους και το ποσοστό επιφάνειας του δοκιμίου που καταλαμβάνουν. Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει ο πίνακας 15. Όπως φαίνεται στο πίνακα υπάρχει μια μεγάλη αύξηση στο πλήθος των καρβιδίων καθώς επίσης και στο ποσοστό της επιφάνειας του υλικού που αυτά καταλαμβάνουν. Η αύξηση αυτή είναι, για τη πρώτη περίπτωση του πίνακα, της τάξης του 55,7% για το πλήθος των καρβιδίων και της τάξης του 80,6% για

το ποσοστό της επιφάνειας του δοκιμίου που καταλαμβάνουν. Για τη δεύτερη περίπτωση, η αύξηση του πλήθους των καρβιδίων είναι της τάξης του 257,2%, που σε ποσοστό επιφανείας μεταφράζεται σε 127,2% και στη τρίτη περίπτωση, για το μεν πλήθος έχουμε αύξηση 244,5% και για το δε ποσοστό επιφανείας 54,7%.

Εκτός από το πλήθος των καρβιδίων και την επιφάνεια που καταλαμβάνουν, ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο που μας ενδιαφέρει είναι το μέγεθός τους. Με βάση το μέγεθος των καρβιδίων προκύπτουν οι κατανομές μεγέθους καρβιδίων που φαίνονται στα σχήματα 34, 35, 36, 37 και 38.

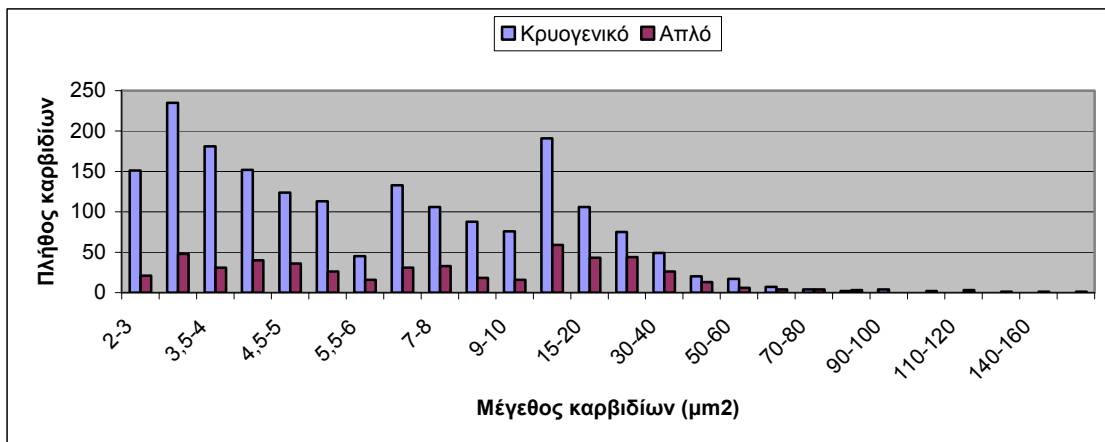
**Πίνακας 15 Αποτελέσματα μετρήσεων για τα καρβίδια.**

Χάλυβας / Αντιδραστήριο	Πλήθος καρβιδίων			Ποσοστό % επιφανείας καρβιδίων		
	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	% Αύξηση	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	% Αύξηση
Sleipner / Nital	201	313	55,7	0,82300621	1,4860744	80,6
Sleipner / Picral	526	1879	257,2	2,3455141	5,3296261	127,2
QRO / Nital	357	1230	244,5	1,3539466	2,0946057	54,7

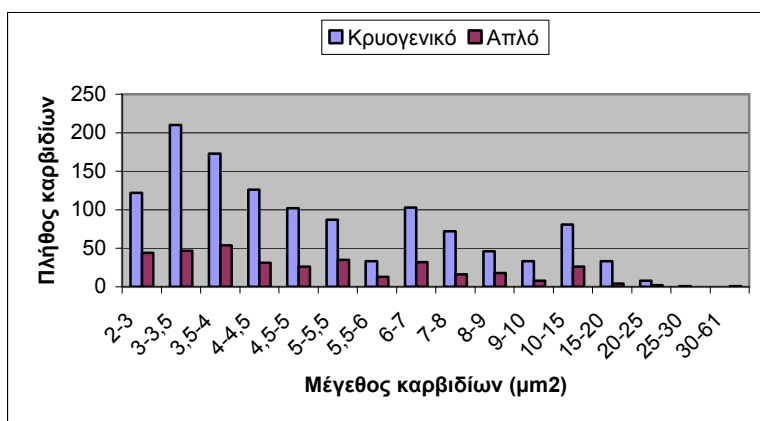


**Σχήμα 34 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων του χάλυβα Sleipner με αντιδραστήριο Nital.**

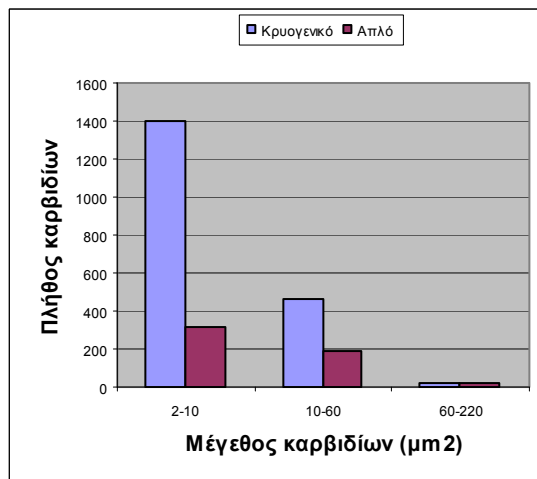
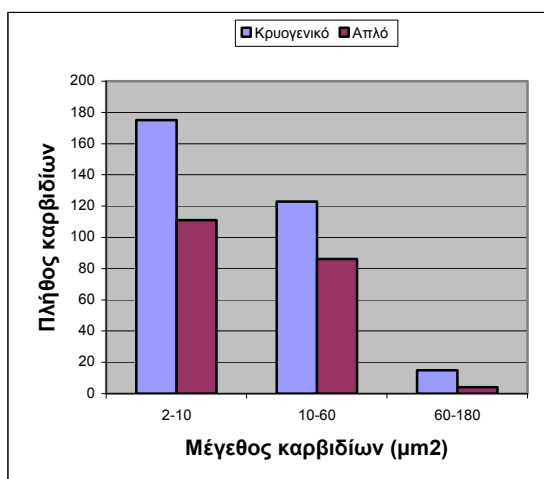




Σχήμα 35 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων του χάλυβα Sleiρner με αντιδραστήριο Picral.



Σχήμα 36 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων για το χάλυβα QRO με αντιδραστήριο Nital.



Σχήμα 37 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων Sleiρner με αντιδραστήριο Nital. Σχήμα 38 Κατανομή μεγέθους καρβιδίων Sleiρner με αντιδραστήριο Picral.

Όπως παρατηρούμε στα ανωτέρω διαγράμματα το μεγαλύτερο ποσοστό των καρβιδίων συγκεντρώνεται στις μικρές και μεσαίες κλάσεις μεγέθους, τόσο για τα κρυογενικά όσο και για τα μη κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια. Στα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια δε, τα ποσοστά αυτά λαμβάνουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχουμε αύξηση και του πλήθους και του ποσοστού επιφανείας των καρβιδίων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι έχουμε κατακρήμνιση νέων πολύ λεπτών καρβιδίων.

## 5.5 Μικροσκληρότητα

### 5.5.1 Εξοπλισμός-διαδικασία

Χρησιμοποιώντας το μικροσκληρόμετρο Leitz Wetzlar 8566 μετρήσαμε τη μικροσκληρότητα των δοκιμίων κατά Vickers με επιβαλλόμενο φορτίο 0,3 Kp και χρόνο επιβολής του φορτίου 15 sec. Σε κάθε δοκίμιο έγιναν 8 μετρήσεις των διαγωνίων  $D_1$  και  $D_2$  και με βάση το τύπο  $HV=1.854 \frac{F}{D^2}$ ,  $D=\frac{D_1+D_2}{2}$  υπολογίζεται η μικροσκληρότητα.

### 5.5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μικροσκληρότητα παρουσιάζονται στο πίνακα 16.

**Πίνακας 16 Μικροσκληρότητα (HV).**

Χάλυβας	Μικροσκληρότητα (HV)	
	Μη Κρυογενικά κατεργασμένος	Κρυογενικά κατεργασμένος
SLEIPNER	509,3	523,9
QRO	516,7	525,0

Όπως προκύπτει από τις τιμές που φαίνονται στον ανωτέρω πίνακα υπάρχει μια μικρή αύξηση της μικροσκληρότητας που είναι της τάξης του 2,87% για το χάλυβα Sleipner και της τάξης του 1,61% για το χάλυβα QRO. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρές και εμπίπτουν εντός των ορίων του πειραματικού σφάλματος της διαδικασίας της μικροσκληρομέτρησης.

## 5.6 Δοκιμές φθοράς-τριβής

### 5.6.1 Εξοπλισμός- διαδικασία

Χρησιμοποιήθηκε τριβόμετρο, τύπου Ball on Disc, CSM instruments tribometer, όπως φαίνεται στο σχήμα 39.

Η δοκιμή έγινε σε κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια, κυκλικής διατομής, διαμέτρου Φ40, των χαλύβων SLEIPNER και QRO.



**Σχήμα 39 Τριβόμετρο, τύπου Ball on Disc, CSM instruments tribometer**

Τα δοκίμια εδράζονται πάνω στη περιστρεφόμενη βάση της διάταξης και με την επιβολή φορτίου το δοκίμιο έρχεται σε επαφή με το ανταγωνιστικό υλικό, με το οποίο και τρίβεται. Ως ανταγωνιστικό υλικό χρησιμοποιήσαμε μπίλια  $Al_2O_3$  διαμέτρου 6mm.

Όσον αφορά τις συνθήκες της δοκιμής, για κάθε χάλυβα είναι οι ακόλουθες.

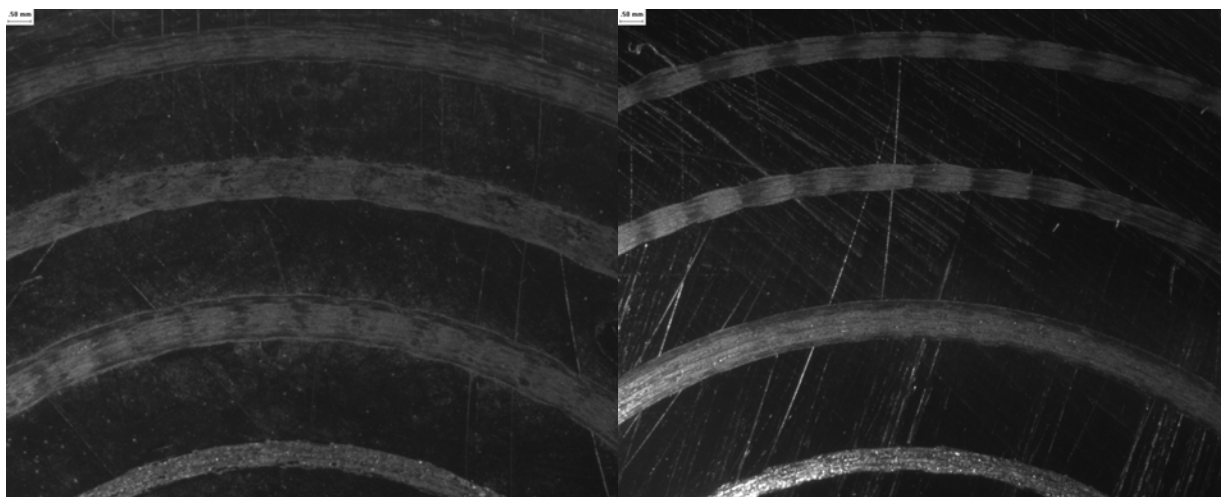
Χάλυβας QRO : Το επιβαλλόμενο φορτίο είναι 10 N, που είναι και η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το συγκεκριμένο τριβόμετρο. Σε κάθε δοκίμιο, κρυογενικό και μη, έγιναν τρεις πίστες (tracks) των 15000 κύκλων η καθεμιά, με γραμμικές ταχύτητες 30, 37,5 και 45cm/s σε ακτίνες 12, 15, και 18mm αντίστοιχα για κάθε πίστα, καθώς και μία πίστα των 500 κύκλων με γραμμική ταχύτητα 37,5cm/s σε ακτίνα 9mm.

Χάλυβας SLEIPNER : Επιβαλλόμενο φορτίο 10 N. Σε κάθε δοκίμιο, κρυογενικό και μη, έγιναν τέσσερις πίστες (tracks) των 15000 κύκλων η καθεμιά, με γραμμικές ταχύτητες 30, 37,5, 45 και 37,5cm/s σε ακτίνες 12, 15, 18 και 9mm αντίστοιχα για κάθε πίστα.

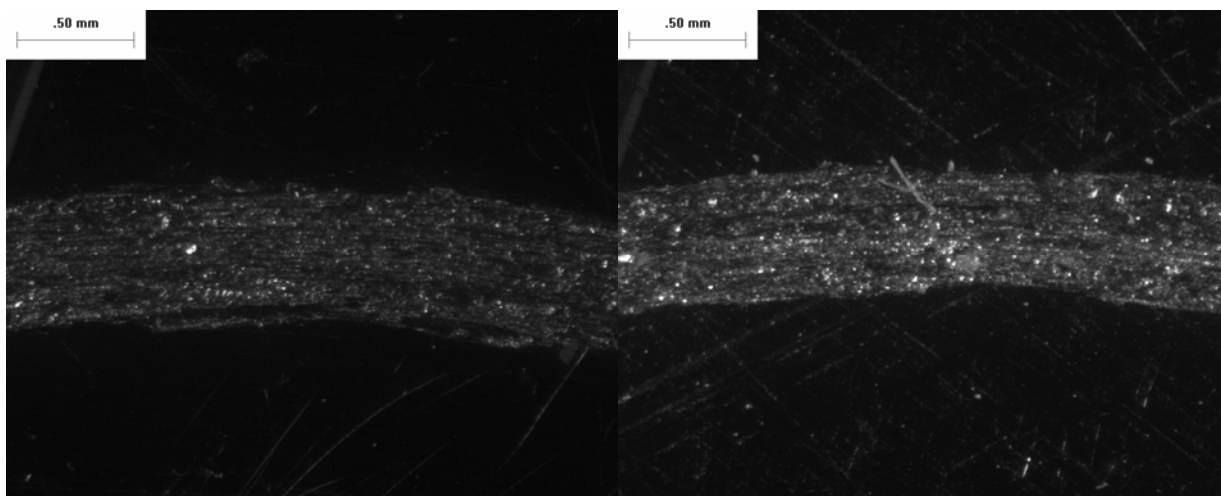
Με την ολοκλήρωση κάθε πίστας απομακρύνουμε το δοκίμιο από το τριβόμετρο και αφού το καθαρίζαμε με τη βοήθεια υπερήχων μετρούσαμε το βάρος του, σε ζυγαριά ακριβείας τεσσάρων δεκαδικών. Το ίδιο κάναμε και για τις μπίλιες  $Al_2O_3$ .

### 5.6.2 Μετρήσεις

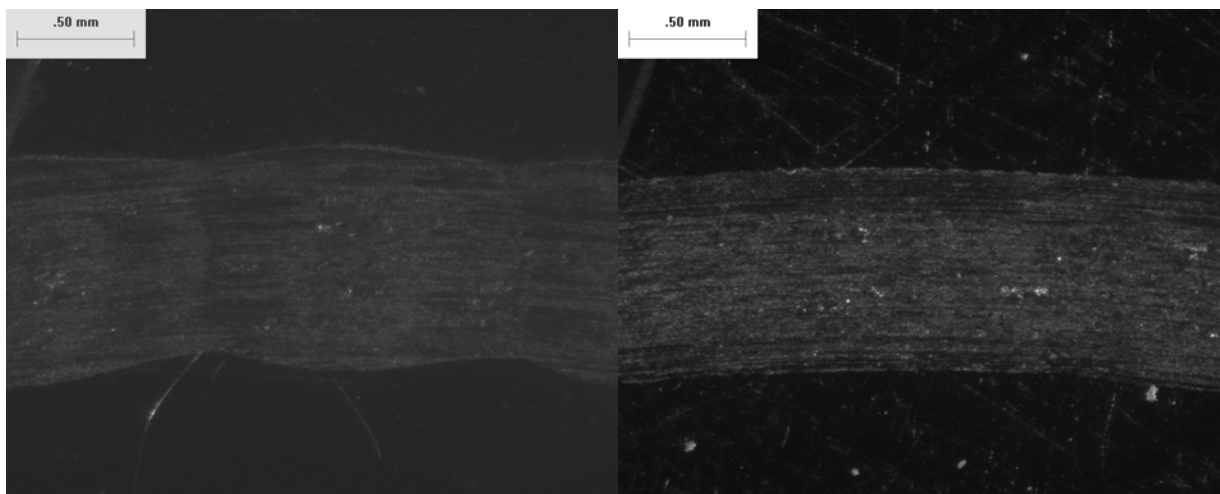
Στα σχήματα 40 έως 49 φαίνονται οι φωτογραφίες που πήραμε για τους χάλυβες QRO και SLEIPNER, μετά την ολοκλήρωση των τριβών, από το στερεοσκόπιο LEICA MZ6. Στους πίνακες 17 και 18 καταγράφονται οι μετρήσεις που πήραμε για το βάρος των χαλύβων QRO και SLEIPNER, αντίστοιχα. Οι μεταβολές στο βάρος της μπίλιας ήταν τόσο μικρές που δεν θα μας απασχολήσουν.



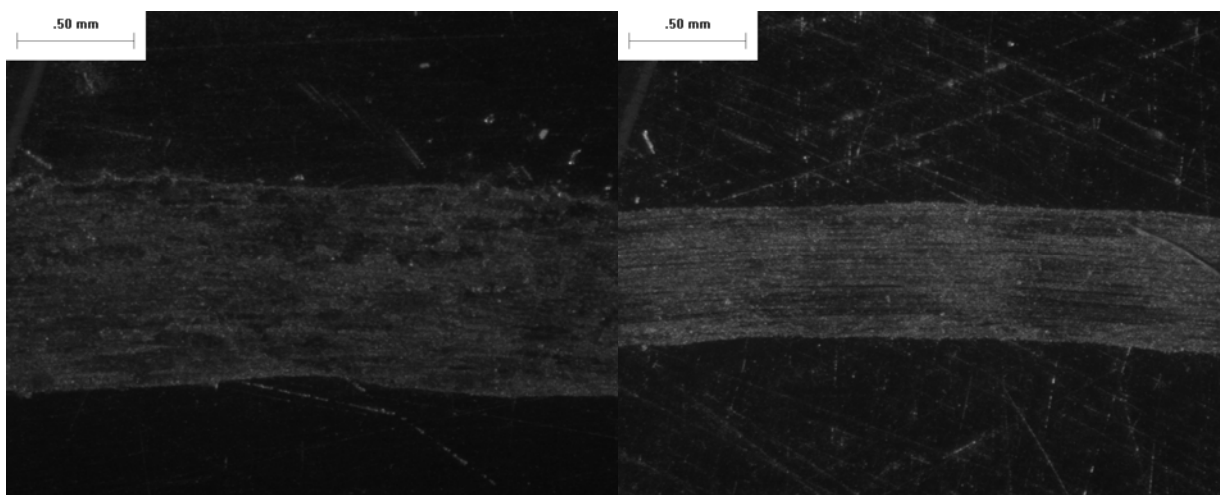
**Σχήμα 40 Πίστες τριβής, χάλυβας QRO. Απλό (αρ.), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).**



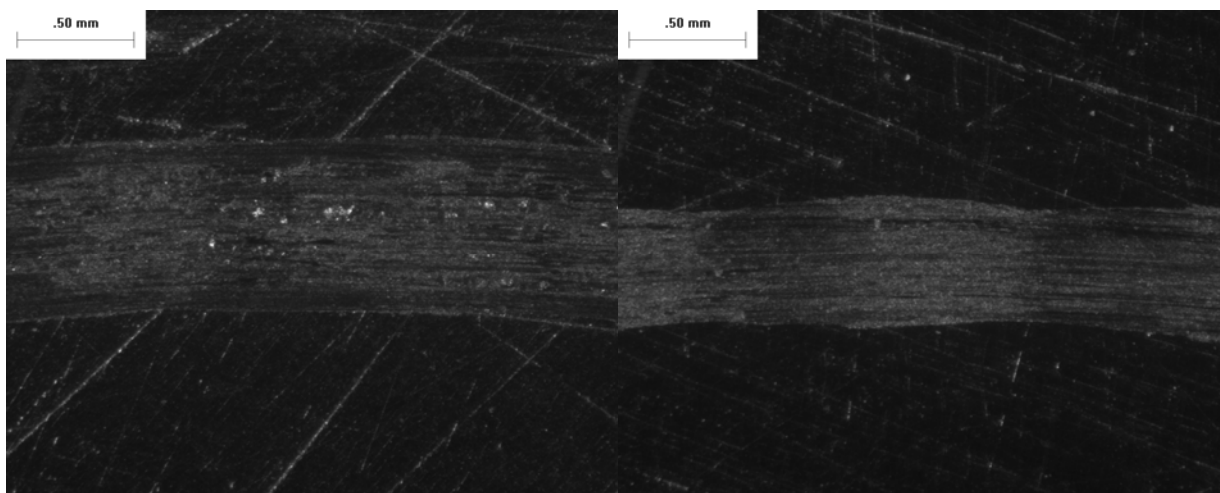
**Σχήμα 41 Πίστα R=9mm, χάλυβας QRO. Απλό (αρ.), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).**



Σχήμα 42 Πίστα R=12mm, χάλυβας QROΑπλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

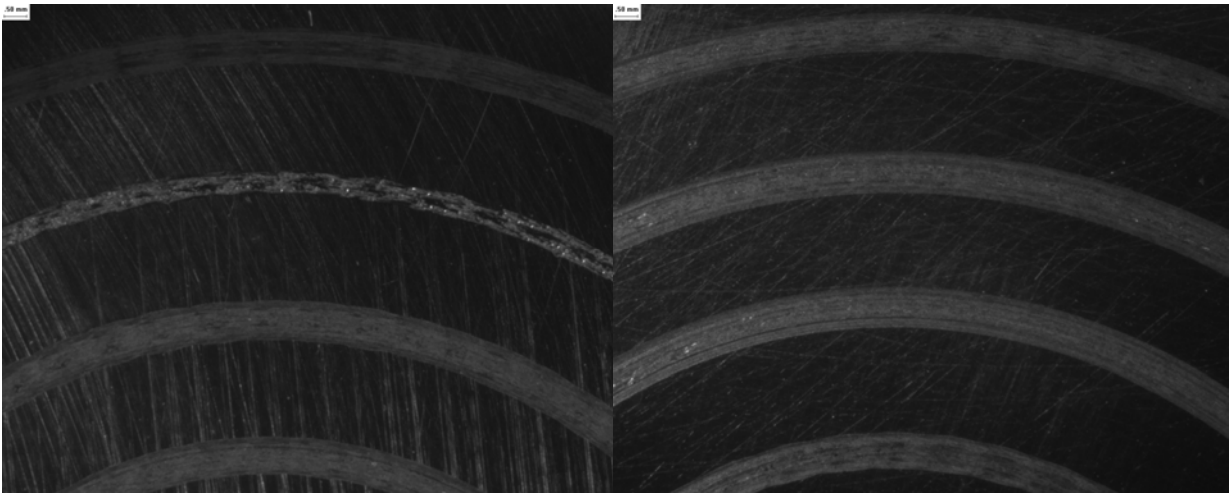


Σχήμα 43 Πίστα R=15mm, χάλυβας QROΑπλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

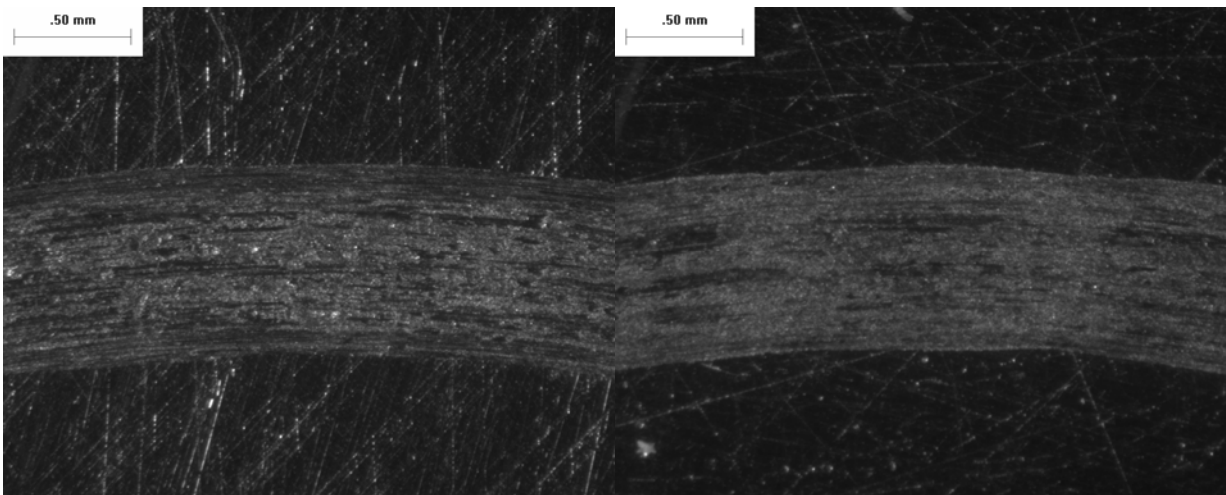


Σχήμα 44 Πίστα R=18mm, χάλυβας QROΑπλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

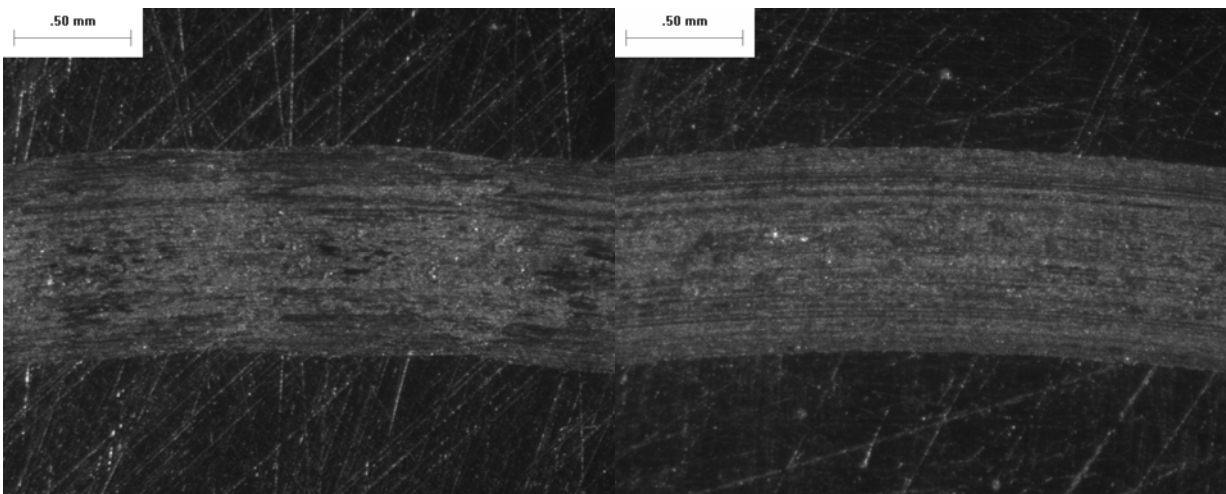




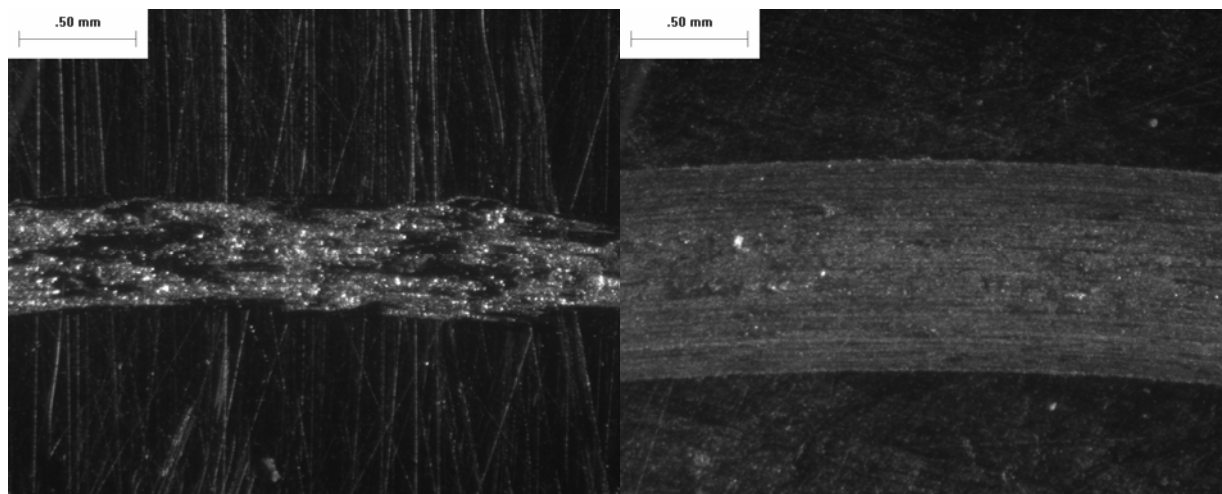
Σχήμα 45 Πίστες τριβής, χάλυβας SLEIPNER.Απλό (αρ.), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



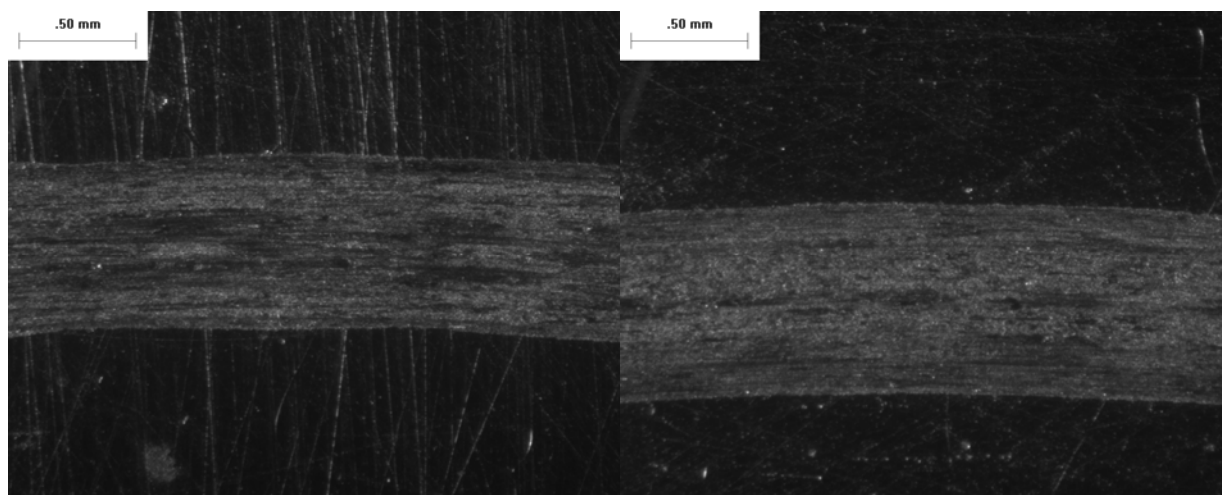
Σχήμα 46 Πίστα R=9mm, χάλυβας SLEIPNER.Απλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



Σχήμα 47 Πίστα R=12mm, χάλυβας SLEIPNER.Απλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



Σχήμα 48 Πίστα R=15mm, χάλυβας SLEIPNER.Απλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



Σχήμα 49 Πίστα R=18mm, χάλυβας SLEIPNER.Απλό (αρ.),Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

Για το χάλυβα SLEIPNER δεν παρατηρείται καμία ουσιαστική διαφορά, ενώ στη περίπτωση του QRO έχουμε μικρότερο πλάτος πίστας στους κρυογενικά κατεργασμένους για κάποιες πίστες, βλ. σχήμα 43, 44. Περιπτώσεις όπως αυτή του σχήματος 48 ερμηνεύονται από τη μη ολοκλήρωση της πίστας για το μη κρυογενικά κατεργασμένο χάλυβα (αριστερά). Η μη ολοκλήρωση μιας πίστας, δηλαδή 15000 κύκλοι, συνδέεται με τη τριβολογική διάταξη και δεν θα διερευνηθεί περαιτέρω.

Πίνακας 17 Μετρήσεις βάρους του χάλυβα QRO.



Πίστα μέτρησης	Μετρήσεις βάρους (gr)		Διαφορά βάρους / track (gr)	
	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος
Αρχικό βάρος	125,7050	125,6036		
1° track	125,6990	125,5997	0,0060	0,0039
2° track	125,6910	125,5978	0,0080	0,0019
3° track	125,6873	125,5937	0,0037	0,0041
4° track	125,6855	125,5917	0,0018	0,0020

**Πίνακας 18 Μετρήσεις βάρους του χάλυβα SLEIPNER.**

Πίστα μέτρησης	Μετρήσεις βάρους (gr)		Διαφορά βάρους / track (gr)	
	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος
Αρχικό βάρος	132,7829	132,6527		
1° track	132,7790	132,6480	0,0039	0,0047
2° track	132,7789	132,6440	0,0001	0,0040
3° track	132,7756	132,6413	0,0033	0,0027
4° track	132,7750	132,6405	0,0006	0,0008

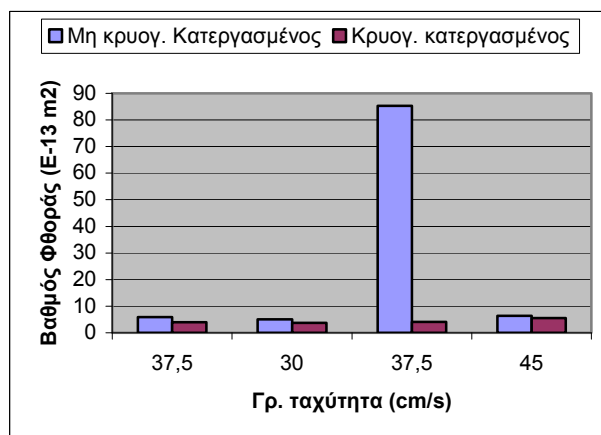
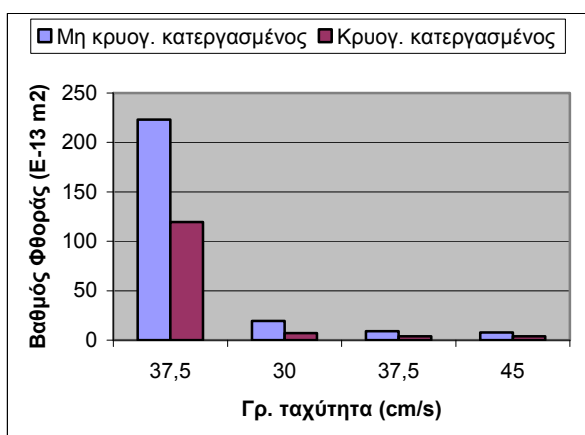
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων βάρους δεν μπορούμε να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα για τη φθορά. Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό της φθοράς χρησιμοποιήσαμε τον τύπο :  $W = \frac{V}{S}$  ,  $W$  ο βαθμός φθοράς (wear rate),  $V = \pi(R^2 - r^2)h$  , με  $R$  την εξωτερική ακτίνα της πίστας τριβής,  $r$  την εσωτερική ακτίνα της πίστας τριβής και  $h$  το ύψος της και  $S$  το sliding distance, δηλαδή το μήκος της κάθε πίστας.

Τις τιμές για τα  $R$ ,  $r$  και  $h$  μετρήσαμε από τα διαγράμματα που πήραμε από το προφιλόμετρο, όπως θα δούμε παρακάτω. Τα αποτελέσματα για τη φθορά φαίνονται στο πίνακα 19 και στο σχήμα 50.

**Πίνακας 19 Φθορά των χάλυβων QRO και SLEIPNER.**

Βαθμός Φθοράς $W$ ( $m^2$ )
-----------------------------

Πίστες	QRO			SLEIPNER		
	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	% Μείωση	Μη κρυογ. κατεργασμένος	Κρυογ. κατεργασμένος	% Μείωση
Πίστα r=9mm	223,009E-13	119,469E-13	86,7	5,865E-13	3,996E-13	46,7
Πίστα r=12mm	19,277E-13	7,206E-13	167,5	5,075E-13	3,769E-13	34,6
Πίστα r=15mm	8,960E-13	4,011E-13	123,4	85,311E-13	4,138E-13	1961,8
Πίστα r=18mm	7,799E-13	3,992E-13	95,4	6,387E-13	5,489E-13	16,4



**Σχήμα 50 Φθορά των χαλύβων QRO (αριστερά), SLEIPNER (δεξιά).**

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές στη περίπτωση των κρυογενικά κατεργασμένων χαλύβων ο βαθμός φθοράς είναι πολύ μικρότερος. Αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπ' όψιν μας τα συμπεράσματά μας για τα καρβίδια. Τα πολυάριθμα και λεπτά καρβίδια που κατακρημνίστηκαν στους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες ευθύνονται για τη μείωση της φθοράς που παρατηρήσαμε.

Χρησιμοποιήσαμε το προφιλόμετρο TR200 TIME για να ελέγξουμε την τραχύτητα των φθαρμένων επιφανειών βλ. Πίνακες 20, 21, 22 και 23. Με το πρόγραμμα συλλογής

δεδομένων από το προφιλόμετρο, Data View for TR200, πήραμε τις ακόλουθες εικόνες για την επιφάνεια των δοκιμίων, βλ. Σχήματα 51,52, 53 και 54.

Πίνακας 20 Τραχύτητα του χάλυβα QRO χωρίς Κρυογ. Κατεργασία.

Parameter		
Ra = 2.607 $\mu\text{m}$	Rq = 3.764 $\mu\text{m}$	Rz = 4.076 $\mu\text{m}$
Ry = 17.45 $\mu\text{m}$	Rt = 29.71 $\mu\text{m}$	Rp = 8.732 $\mu\text{m}$
Rm = 8.727 $\mu\text{m}$	S = 0.7812 mm	Sm = 1.5625 mm
Sk = 0.187		

Πίνακας 21 Τραχύτητα του χάλυβα QRO με Κρυογ. Κατεργασία.

Parameter		
Ra = 1.369 $\mu\text{m}$	Rq = 2.195 $\mu\text{m}$	Rz = 3.367 $\mu\text{m}$
Ry = 11.94 $\mu\text{m}$	Rt = 18.31 $\mu\text{m}$	Rp = 5.699 $\mu\text{m}$
Rm = 6.244 $\mu\text{m}$	S = 0.5681 mm	Sm = 1.2500 mm
Sk = -0.466		

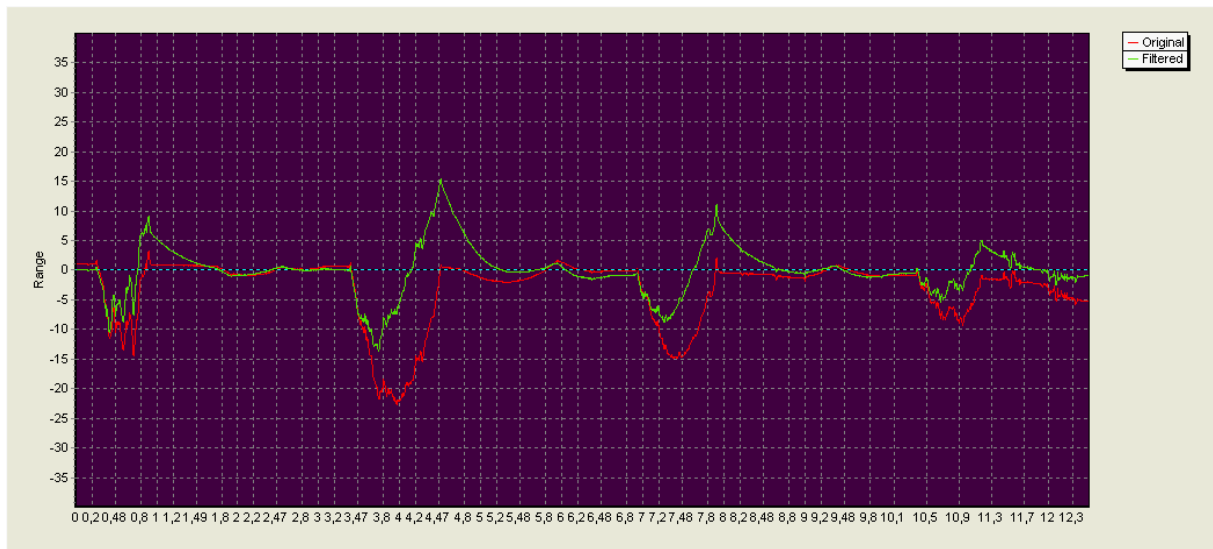
Πίνακας 22 Τραχύτητα του χάλυβα SLEIPNER χωρίς Κρυογ. Κατεργασία.

Parameter		
Ra = 0.845 $\mu\text{m}$	Rq = 1.240 $\mu\text{m}$	Rz = 2.622 $\mu\text{m}$
Ry = 7.195 $\mu\text{m}$	Rt = 10.88 $\mu\text{m}$	Rp = 3.187 $\mu\text{m}$
Rm = 4.007 $\mu\text{m}$	S = 0.3571 mm	Sm = 0.6944 mm
Sk = -0.281		

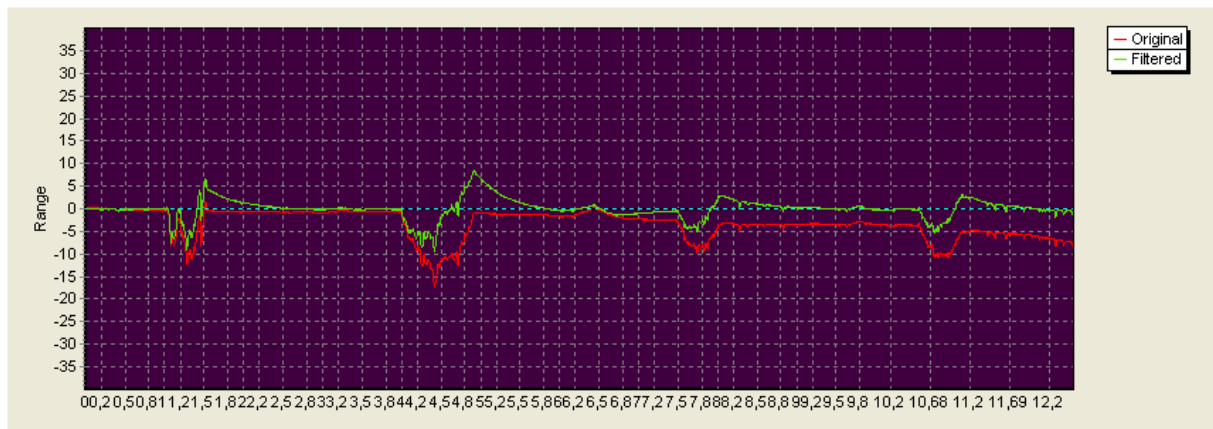
Πίνακας 23 Τραχύτητα του χάλυβα SLEIPNER με Κρυογ. Κατεργασία.

Parameter		
Ra = 1.275 $\mu\text{m}$	Rq = 1.904 $\mu\text{m}$	Rz = 3.730 $\mu\text{m}$
Ry = 10.54 $\mu\text{m}$	Rt = 15.23 $\mu\text{m}$	Rp = 4.808 $\mu\text{m}$
Rm = 5.739 $\mu\text{m}$	S = 0.3571 mm	Sm = 0.9615 mm
Sk = -0.393		

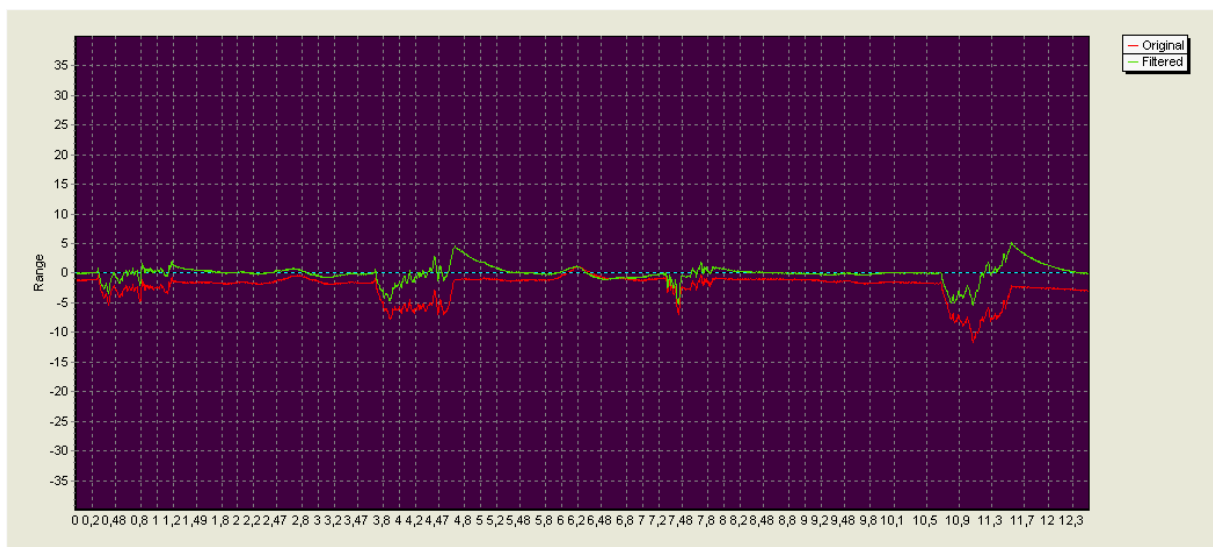
Από τις τιμές στους ανωτέρω πίνακες δεν προκύπτουν ουσιαστικές διαφορές για την τραχύτητα, μεταξύ κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένων χάλυβων και δεν θα διερευνηθεί περαιτέρω.



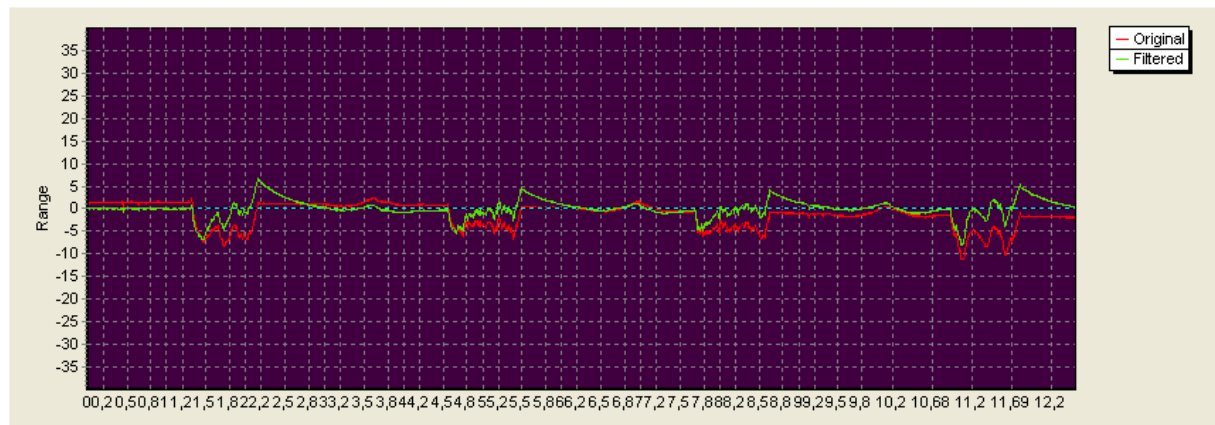
**Σχήμα 51 Επιφάνεια μη Κρυογ. Κατεργασμένου δοκιμίου QRO.**



**Σχήμα 52 Επιφάνεια Κρυογ. Κατεργασμένου δοκιμίου QRO.**



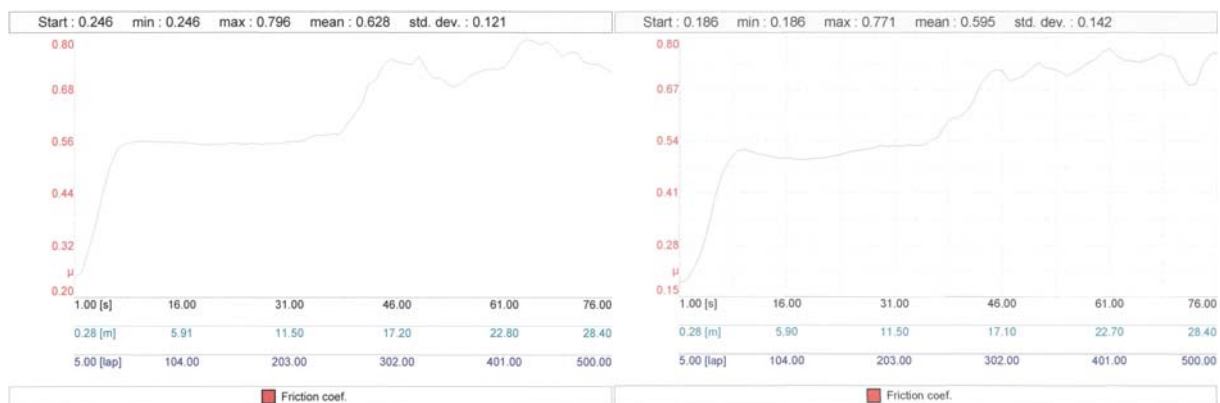
**Σχήμα 53 Επιφάνεια μη Κρυογ. Κατεργασμένου δοκιμίου SLEIPNER.**

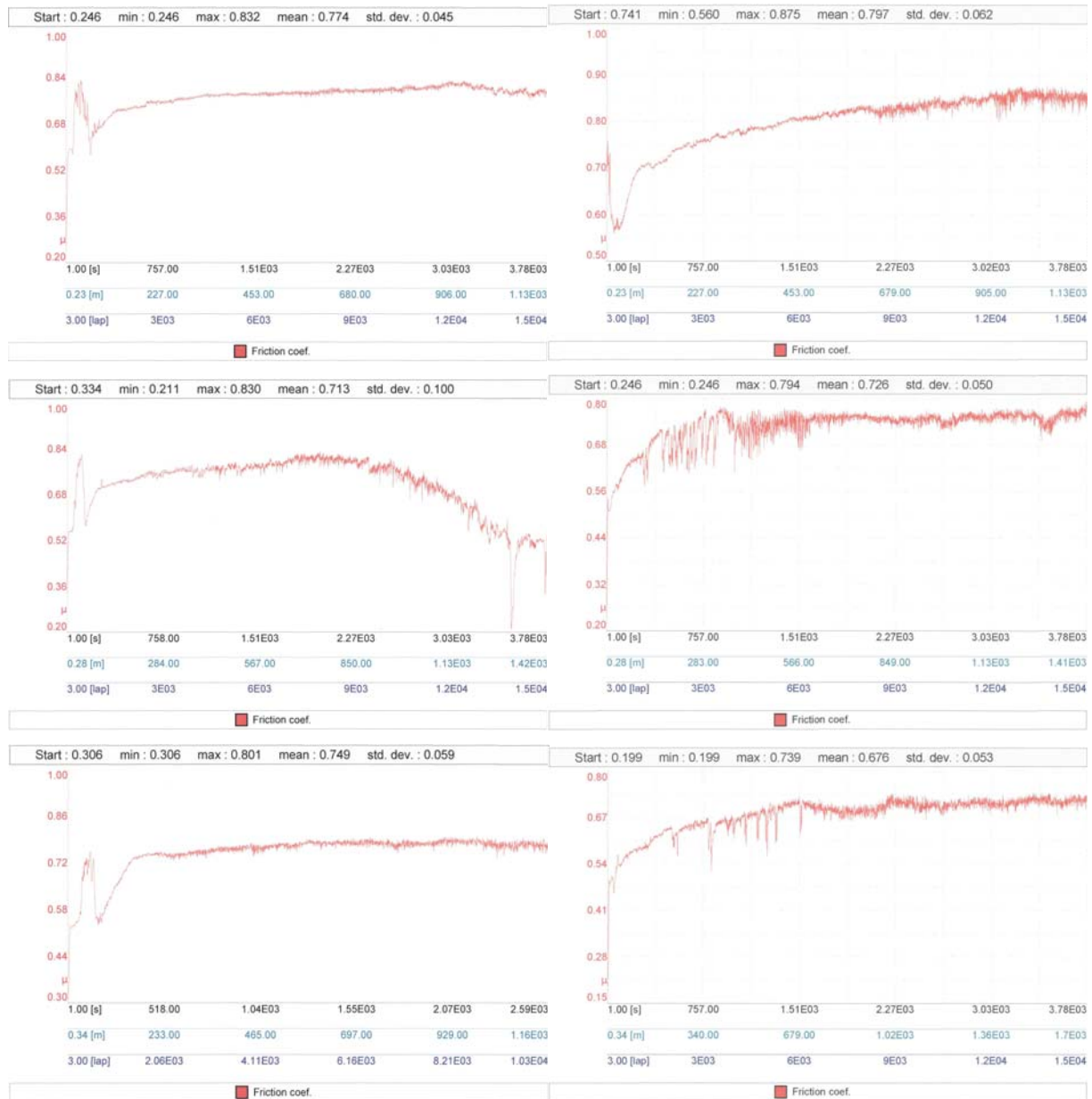


**Σχήμα 54 Επιφάνεια Κρυογ. Κατεργασμένου δοκιμίου SLEIPNER.**

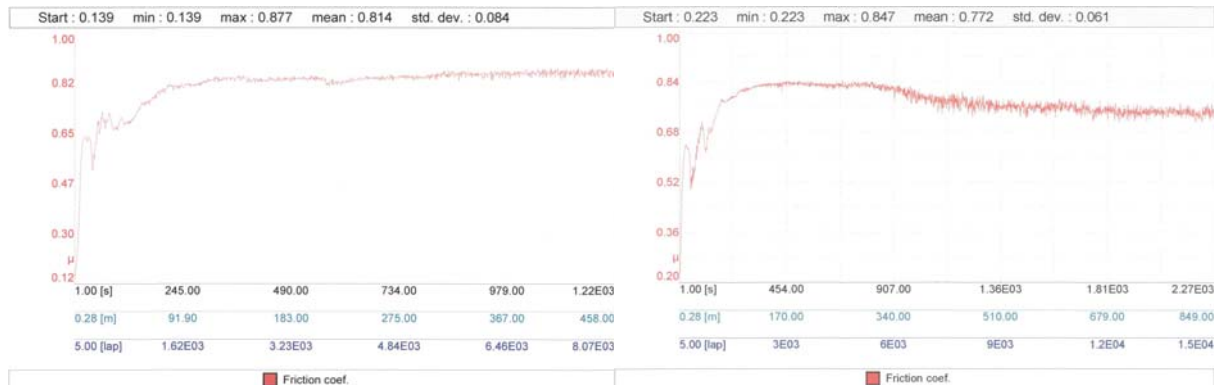
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα, με ελάχιστες εξαιρέσεις, οι πίστες τριβής στους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες έχουν μικρότερο πλάτος αλλά και ύψος.

Με το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων από το τριβόμετρο, είδαμε πως μεταβάλλεται και ο συντελεστής τριβής. Στα σχήματα 55 και 56 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή του συντελεστή τριβής συναρτήσει του χρόνου, του μήκους πίστας και των κύκλων σε κάθε πίστα για τους χάλυβες QRO και SLEIPNER αντίστοιχα. Με βάση τη μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή του συντελεστή προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε πίστα, βλ. Σχήματα 57 έως 64.



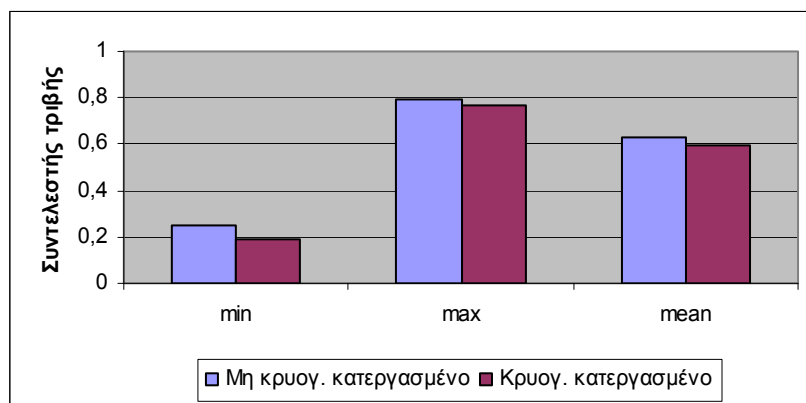


Σχήμα 55 Συντελεστής τριβής για κάθε πίστα, χάλυβας QRO, Απλό (αριστ.), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).



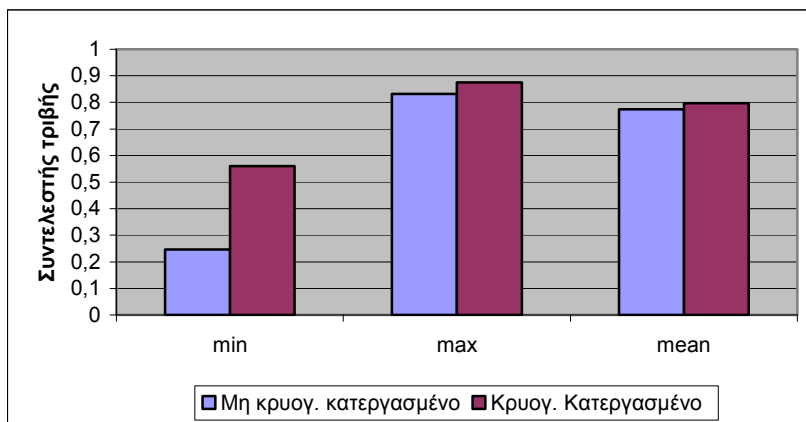


Σχήμα 56 Συντελεστής τριβής για κάθε πίστα, χάλυβας SLEIPNER, Απλό (αριστ.), Κρυογ. Κατεργασμένο (δεξιά).

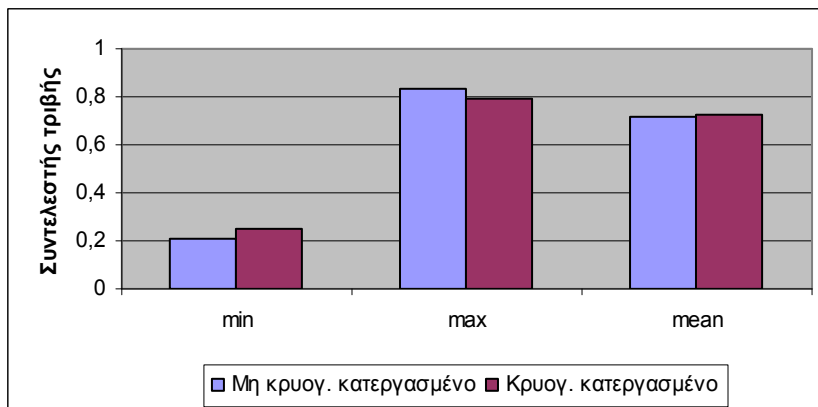




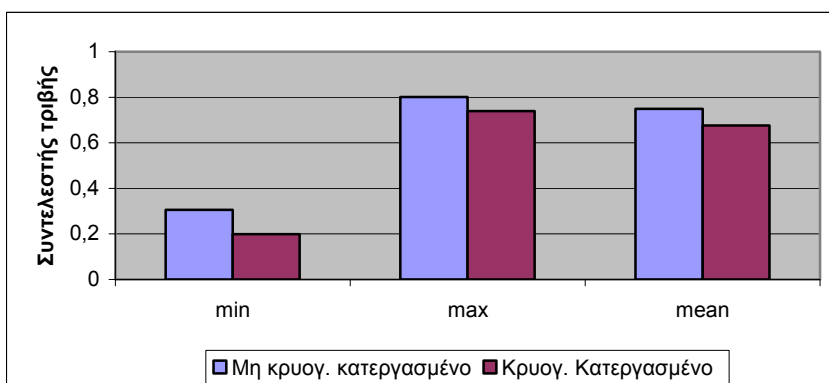
Σχήμα 57 Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R= 9mm, χάλυβας QRO.



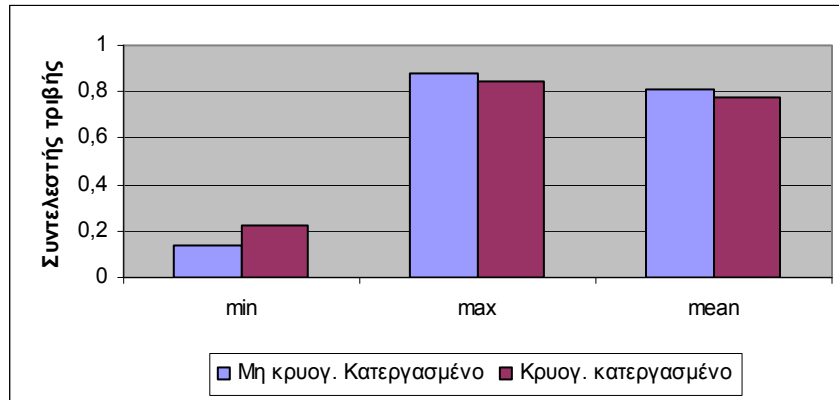
Σχήμα 58 Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R= 12mm, χάλυβας QRO.



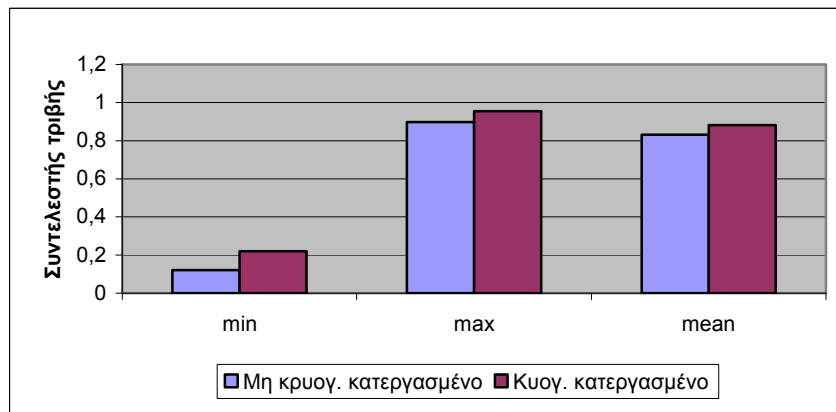
Σχήμα 59 Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R= 15mm, χάλυβας QRO.



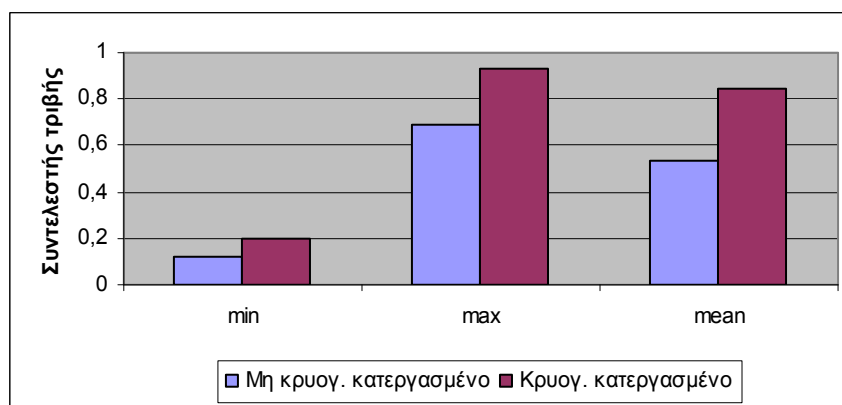
Σχήμα 60 Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R=18 mm, χάλυβας QRO.



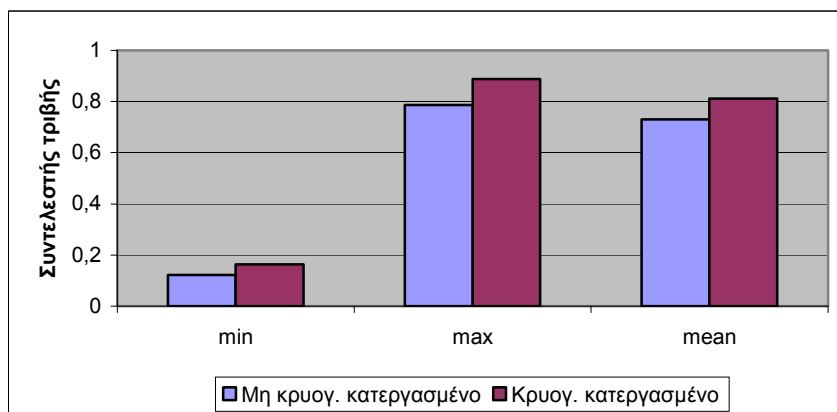
**Σχήμα 61** Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R=9 mm, χάλυβας SLEIPNER.



**Σχήμα 62** Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R=12 mm, χάλυβας SLEIPNER.



**Σχήμα 63** Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R=15 mm, χάλυβας SLEIPNER.



**Σχήμα 64 Min, max και mean του συντελεστή τριβής για πίστα R=18 mm, χάλυβας SLEIPNER.**

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι ο συντελεστής τριβής για το χάλυβα QRO πρακτικά δεν μεταβάλλεται, ενώ για το χάλυβα SLEIPNER παρατηρείται μια μικρή αύξηση του συντελεστή, στους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες για κάποιες πίστες, βλ. Σχήμα 63 και 64.

### 5.7 Συμπεράσματα

Η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας είχε ευεργετικά αποτελέσματα στα καρβίδια. Τόσο για το χάλυβα QRO όσο και για το SLEIPNER σημειώθηκαν μεγάλες αυξήσεις στο πλήθος των καρβιδίων, όπως και στο ποσοστό επιφανείας που καταλαμβάνουν. Πέραν αυτής της αύξησης, διαπιστώθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των καρβιδίων συγκεντρώνεται στις μικρές και μεσαίες κλάσεις μεγέθους, τόσο για τους κρυογενικά όσο και για τους μη κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες. Στη περίπτωση των κρυογενικά κατεργασμένων χαλύβων δε, τα ποσοστά αυτά λαμβάνουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι έχουμε αύξηση και του πλήθους και του ποσοστού επιφανείας των καρβιδίων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πραγματοποιείται διάλυση μεγάλων καρβιδίων και κατακρήμνιση νέων πολύ λεπτών καρβιδίων. Τρίτο, με την εφαρμογή της κρυογενικής κατεργασίας στους χάλυβες QRO και SLEIPNER, διαπιστώθηκε πολύ μεγαλύτερη ομοιογένεια στη διανομή των καρβιδίων στο μαρτενσιτικό πλέγμα.

Υπάρχει μια μικρή αύξηση της μικροσκληρότητας που είναι της τάξης του 2,87% για το χάλυβα SLEIPNER και της τάξης του 1,61% για το χάλυβα QRO 90 Supreme. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρές, για να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα και

εμπίπτουν στα όρια του πειραματικού σφάλματος της διαδικασίας της μικροσκληρομέτρησης

Η φθορά στη περίπτωση των κρυογενικά κατεργασμένων χαλύβων είναι πολύ μικρότερη και για το χάλυβα QRO και για το χάλυβα SLEIPNER. Αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπ' όψιν μας τα συμπεράσματά για τα καρβίδια. Τα πολυάριθμα και λεπτά καρβίδια που σχηματίστηκαν στους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες ευθύνονται για τη μείωση της φθοράς που παρατηρήσαμε. Όσον αφορά τη τραχύτητα δεν σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές. Το ίδιο και για το συντελεστή φθοράς, με κάποιες εξαιρέσεις για το χάλυβα SLEIPNER, όπου παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση. Ωστόσο οι πίστες τριβής εμφανίζουν μικρότερο πλάτος και μικρότερο ύψος για τους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες, στις περισσότερες περιπτώσεις.

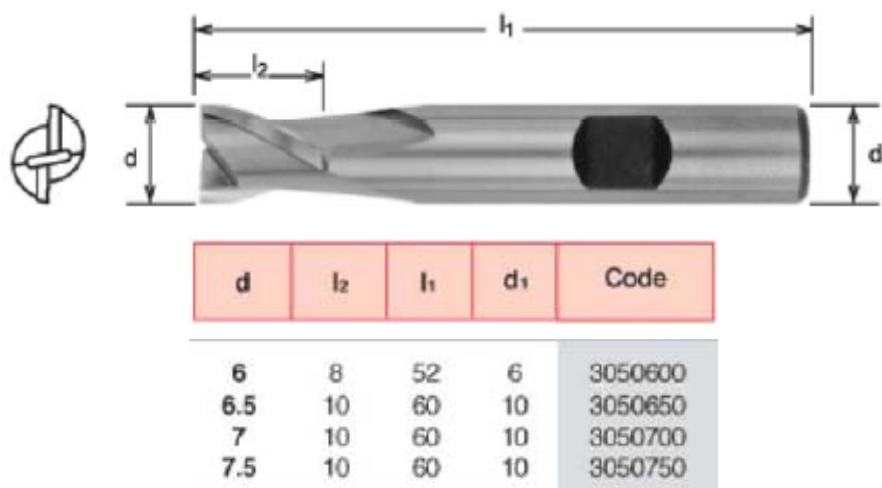
## 6. ΠΕΙΡΑΜ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

### 6.1 Εισαγωγή

Το δεύτερο μέρος της πειραματικής εργασίας αναφέρεται στην κρυογενική κατεργασία κονδυλίων φρεζαρίσματος από ταχυχάλυβα και στην διερεύνηση αρχικά της επίδρασης της στη φθορά και κατ' επέκταση τη διάρκεια ζωής τους. Για το λόγο αυτό κρυογενικά και μη κρυογενικά κατεργασμένα κονδύλια χρησιμοποιήθηκαν για κοπές τεμαχίου από μαλακό χάλυβα και μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά φθοράς τους.

### 6.2 Κονδύλια

Για τη δοκιμή κοπής χρησιμοποιήθηκαν δυο σετ κονδυλίων, το ένα με κρυογενική κατεργασία. Πρόκειται για τα κονδύλια M42 διαμέτρου 6mm της εταιρίας SOMTA, σχήμα 65. Το υλικό κατασκευής τους είναι ταχυχάλυβας, με σκληρότητα 66-68,5 HRC και η χημική τους σύσταση φαίνεται στο πίνακα 24.



Σχήμα 65 Κονδύλι HSS M42.

Πίνακας 24 Χημική σύσταση των κονδυλίων HSS M42.

Στοιχείο	C	Cr	W	Mo	V	Co
Ποσοστό %	1.1	4	1.5	9.5	1	8

### 6.3 Κρυογενική κατεργασία

Για τη κρυογενική κατεργασία των κονδυλίων επιλέχθηκε το κρυογενικό προφίλ 3, με διάρκεια 48 ώρες. Με το πέρας αυτής τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε διαδικασία ανόπτησης, δηλαδή θέρμανσή στους 145°C για διάρκεια μιας ώρας. Η ανόπτηση επαναλήφθηκε και δεύτερη φορά. Συνολικά η διαδικασία διήρκεσε 50 ώρες.

### 6.4 Εργαλειομηχανή

Για τις κοπές χρησιμοποιήθηκε Κέντρο Κατεργασιών, σχήμα 66. Το Κέντρο Κατεργασιών είναι της εταιρείας OKUMA, μοντέλο MX-45VAE. Είναι μηχάνημα CNC, με τρεις άξονες και μονάδα ελέγχου OSP7000M. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της κύριας ατράκτου είναι 7000 rpm και η μέγιστη πρόωση 30 m/min. Οι πλήρεις τεχνικές προδιαγραφές του κέντρου φαίνονται στο πίνακα 25, από το εγχειρίδιο της εταιρείας.



**Σχήμα 66 Κέντρο Κατεργασιών OKUMA.**

Τα κονδύλια M42 προσδένονται στο κέντρο κατεργασιών μέσω ειδικού κώνου – εργαλειοδέτη BT40, που φαίνεται στο σχήμα 67.



Σχήμα 67 Εργαλειοδέτης BT40 με στερεωμένο κονδύλι.

Πίνακας 25 Προδιαγραφές του Κέντρου Κατεργασιών.

	English	Metric
<b>TRAVEL</b>		
X-Axis (Table)	30.00"	762mm
Y-Axis (Saddle)	18.10"	460mm
Z-Axis (Spindle head)	17.70"	450mm
Spindle end to table surface*	6.3" - 24"	160mm - 610mm
<b>TABLE</b>		
Size	39.40" x 20"	1000mm x 510mm
Load capacity	1,500 lb.	680 kg
<b>SPINDLE</b>		
Taper hole	NT 40	
Diameter (front bearing)	2.76"	70mm
Torque (30 min./cont.)	70.2/5.4 ft.-lb.	9.7/7.1 kg.m
Speed range	50-7000 r.p.m.	
Optional spindle speeds	12,000 & 25,000 r.p.m.	
<b>FEEDRATES</b>		
Rapid traverse X/Y axes	1,181 inch/min.	30m/min.
Rapid traverse Z axis	945 inch/min.	24m/min.
Cutting feed X/Y/Z axes	394 inch/min.	10m/min.
<b>MOTORS</b>		
Main spindle motor (30 min./continuous)	10/7.5 h.p.	7.5/5.5 kW
X, Y and Z brushless motors	4 h.p.	3 kW
<b>ATC</b>		
Tool change speed (tool-to-tool)	1.5 seconds	
Tool magazine capacity	20	
Tool shank	CAT V-Flange	MAS BT 40
Pull stud	CAT	MAS II
Max. tool diameter (with adjacent tools)	3.54"	90mm
Max. tool diameter (without adjacent tools)	4.92"	125mm
Max. tool length	15.75"	400mm
Max. tool weight	17.6 lb.	8 kg
<b>ACCURACY</b>		
Positioning accuracy	± 0.00016"	± 0.004mm
Repeatability	± 0.00006"	± 0.0015mm
<b>SPACE REQUIREMENTS</b>		
Machine height	104"	2,650mm
Floor space	87" x 94"	2,200mm x 2,380mm
Machine weight	12,125 lb.	5,500 kg

\*high-column spec., 14.2" - 31.9" (360mm-810mm)



## 6.5 Διαδικασία κοπής

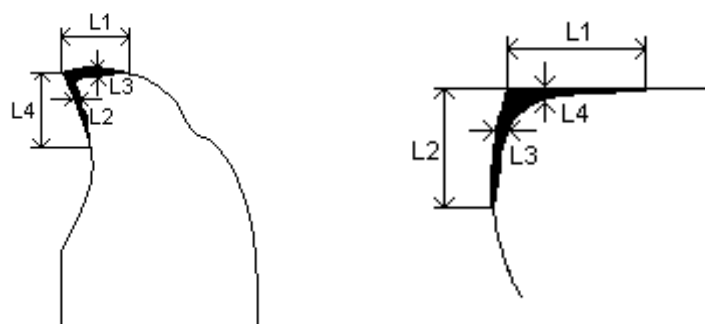
Για τις κοπές χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινο παραλληλεπίπεδο εργοτεμάχιο, St37, διατομής 155mm x 96mm. Οι συνθήκες κοπής διατηρήθηκαν σταθερές και καταγράφονται στο πίνακα 26. Κάθε κονδύλι πραγματοποίησε τέσσερις κοπές, τέσσερα 'πάσα', το καθένα μήκους 155 mm.

**Πίνακας 26 Συνθήκες κοπής.**

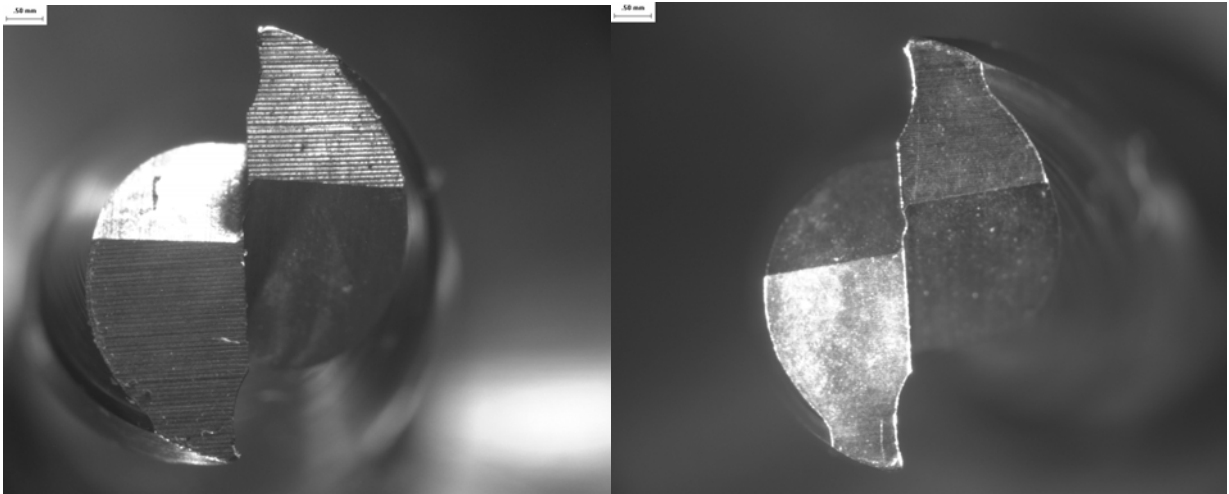
Στροφές	1100 RPM
Πρόωση	20 mm/min
Βάθος κοπής	1mm
Χρόνος κοπής / πάσο	7.75 min
Εμπλοκή διαμέτρου κονδυλίου	85%

## 6.6 Μέτρηση φθοράς

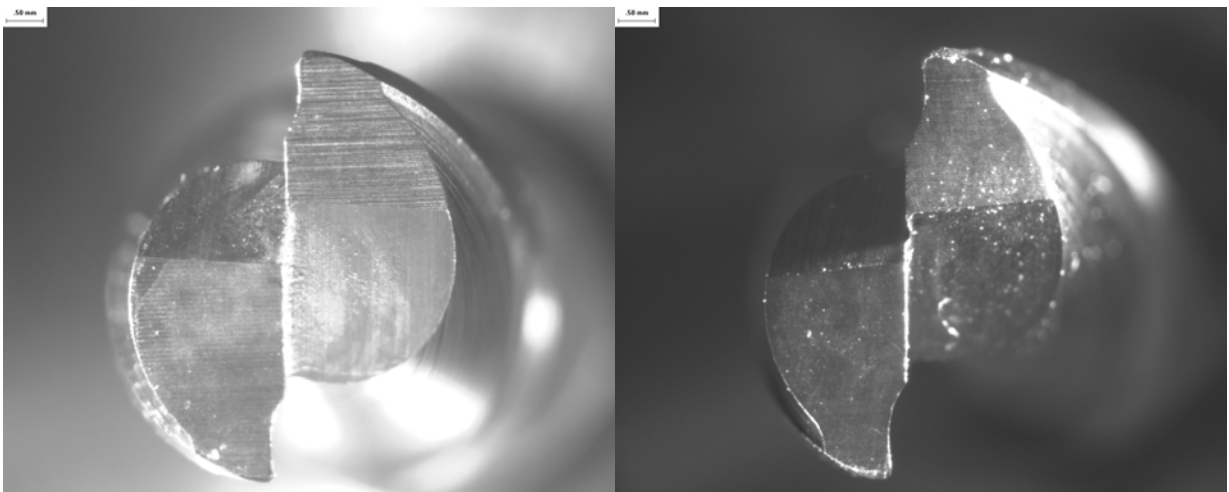
Έπειτα από κάθε πάσο, το κοπτικό εργαλείο, απομακρυνόταν από το Κέντρο Κατεργασιών και με τη βοήθεια στερεοσκοπίου τύπου LEICA MZ6 ελέγχαμε το πεδίο φθοράς και το κρατήρα που είχε δημιουργηθεί. Με το πρόγραμμα Image Pro Plus μετρήθηκαν τα στοιχεία φθοράς σε κάθε κοπτικό εργαλείο. Τα στοιχεία που μετρήθηκαν είναι τα μήκη L1, L2, L3, L4 και η επιφάνεια PG, μαυρισμένη επιφάνεια, για το πεδίο φθοράς και το κρατήρα αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του σχήματος 68. Στα σχήματα 69 έως 76 φαίνονται εικόνες μετά από κάθε πάσο κοπής. Για το χρόνο ζωής του κονδυλίου θεωρήσαμε το κριτήριο  $VB_{Bmax}=0.6mm$  για το πεδίο φθοράς.



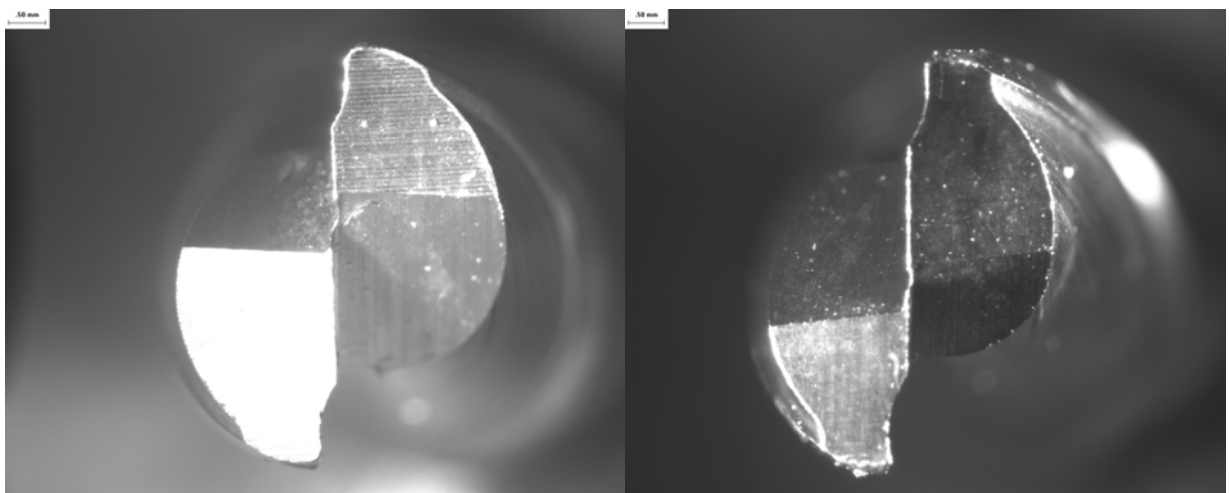
**Σχήμα 68 Στοιχεία φθοράς κοπτικού εργαλείου. Πεδίο φθοράς (αρ.), κρατήρας (δεξιά).**



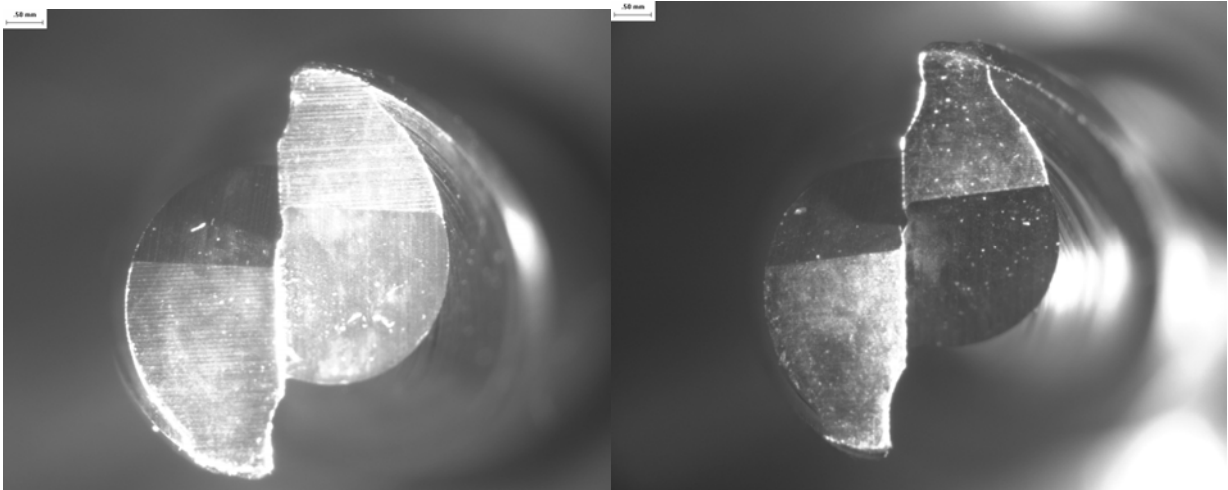
Σχήμα 69 Πεδίο φθοράς 1<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



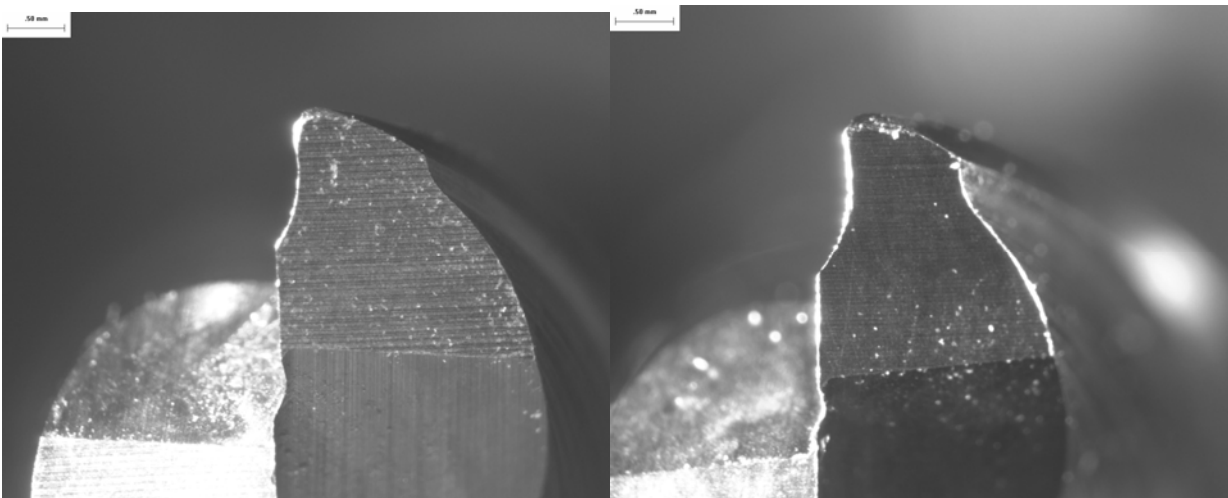
Σχήμα 70 Πεδίο φθοράς 2<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



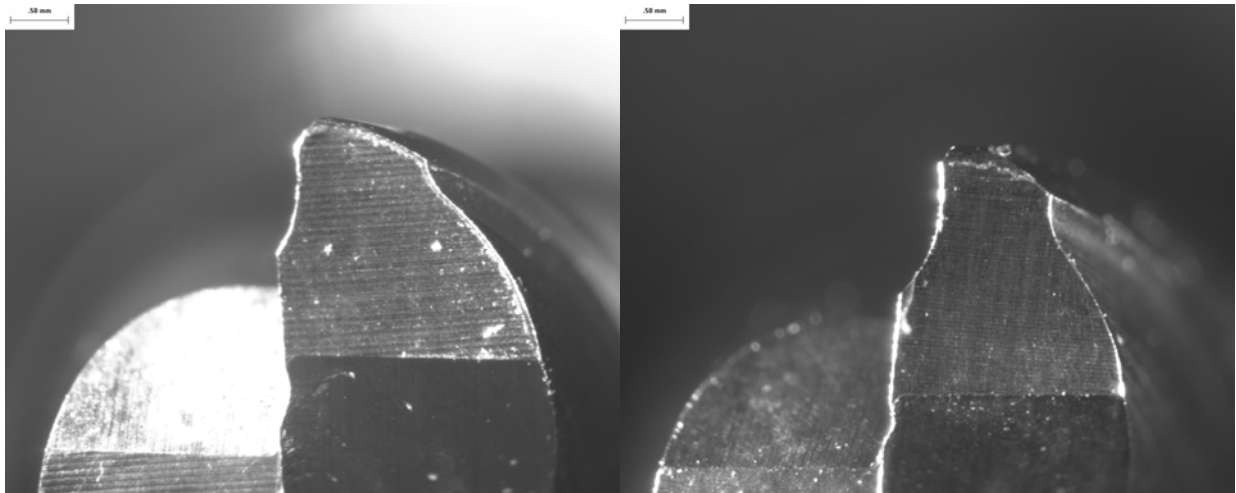
**Σχήμα 71** Πεδίο φθοράς 3<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



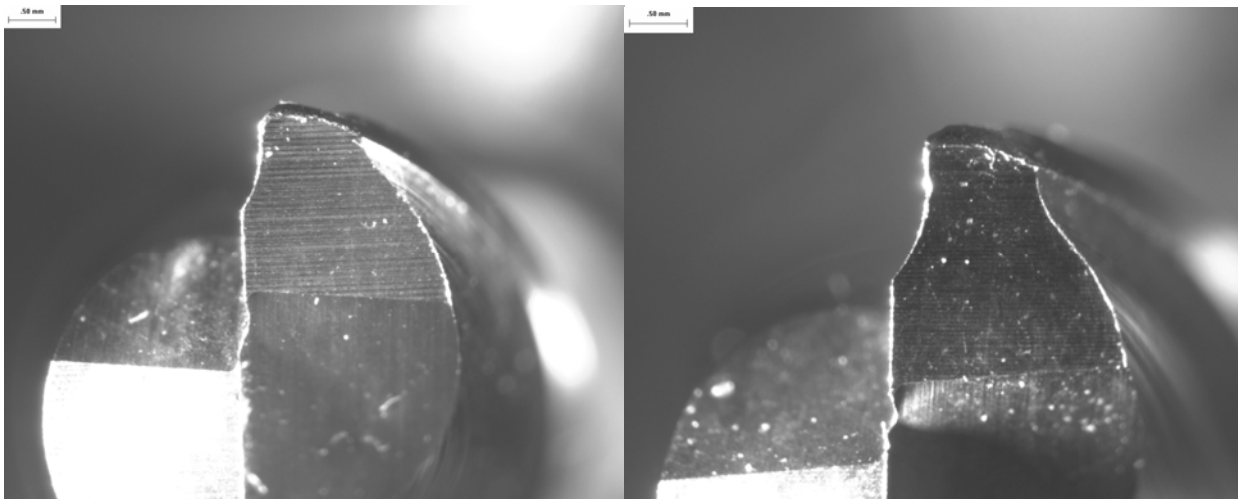
**Σχήμα 72** Πεδίο φθοράς 4<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



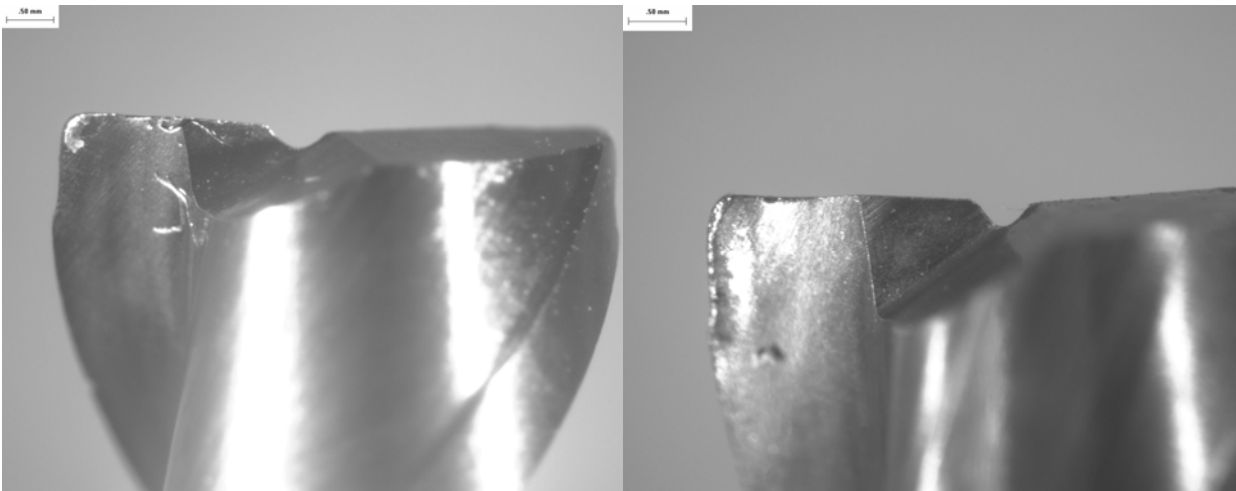
**Σχήμα 73** Πεδίο φθοράς 2<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



**Σχήμα 74** Πεδίο φθοράς 3° πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



**Σχήμα 75** Πεδίο φθοράς 4° πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).



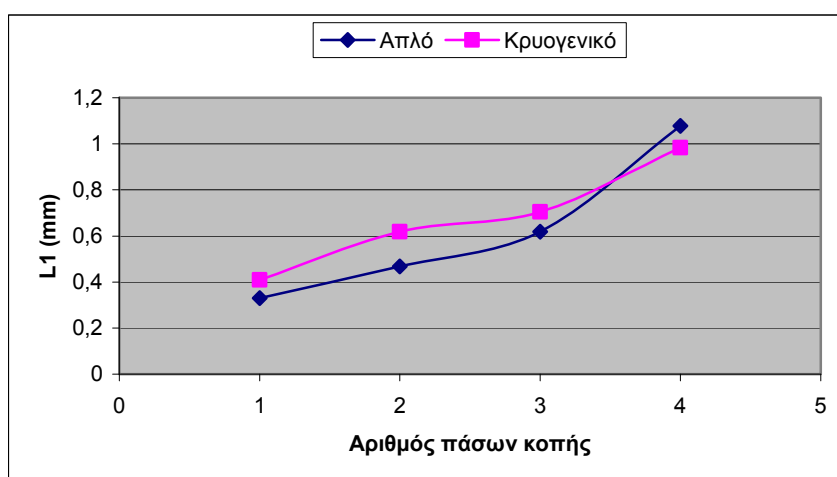
**Σχήμα 76 Κρατήρας 4<sup>ο</sup> πάσο κοπής, μη Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (αριστερά), Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι (δεξιά).**

**6.7 Αποτελέσματα**

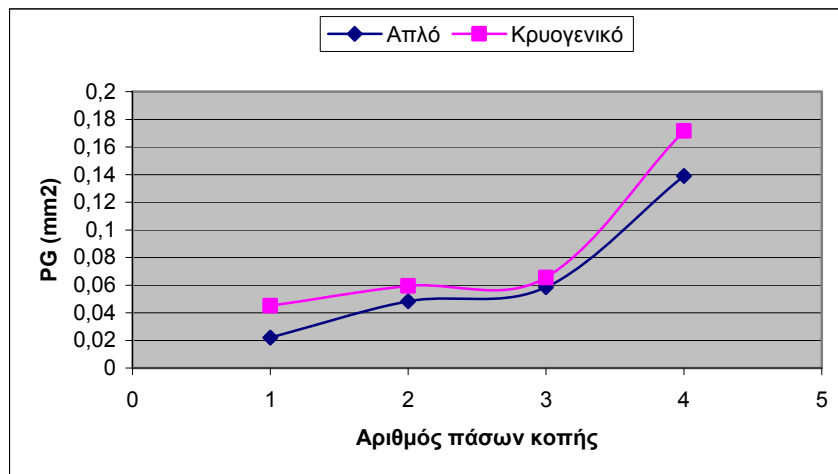
Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων αντιμετωπίσαμε ένα σημαντικό πρόβλημα. Λόγω της φθοράς του κοπτικού εργαλείου μετατοπιζόταν συνεχώς το σημείο έναρξης των μετρήσεών μας. Μη έχοντας τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τη φθορά, που είναι αποτέλεσμα της απώλειας υλικού, συγκριτικά κάθε φορά με τη προηγούμενη κοπή και κατ' επέκταση με την αρχική μορφολογία του κονδυλίου, κρίνουμε ότι οι μετρήσεις μας εμπεριέχουν μεγάλο σφάλμα ανάγνωσης, γεγονός που τις καθιστά ανακριβείς. Θα παρουσιάσουμε λοιπόν μόνο τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα στοιχεία φθοράς L1 και PG του πεδίου φθοράς, που κατά την εκτίμησή μας αποτελούν τις πιο ασφαλείς μετρήσεις. Οι μετρήσεις καταγράφονται στο πίνακα 27 και απεικονίζονται γραφικά στα σχήματα 77 και 78.

**Πίνακας 27 Μετρήσεις στοιχείων φθοράς.**

Στοιχείο φθοράς	ΠΕΔΙΟ ΦΘΟΡΑΣ							
	Μη κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι				Κρυογ. Κατεργασμένο κονδύλι			
	1ο πάσο	2ο πάσο	3ο πάσο	4ο πάσο	1ο πάσο	2ο πάσο	3ο πάσο	4ο πάσο
L1 (mm)	0,33000	0,46696	0,61814	1,07743	0,40969	0,61846	0,70430	0,98407
PG (mm <sup>2</sup> )	0,02203	0,04840	0,05859	0,13894	0,04514	0,05943	0,06550	0,17161



**Σχήμα 77 Γραφική απεικόνιση του στοιχείου L1 για το πεδίο φθοράς.**



Σχήμα 78 Γραφική απεικόνιση του στοιχείου PG για το πεδίο φθοράς.

## 6.8 Συμπεράσματα

Με βάση τα διαγράμματα, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της Κρυογενικής Κατεργασίας, είναι μη αναμενόμενα καταρχήν. Πιο συγκεκριμένα, για τη μέτρηση του μήκους L1 στα τρία πρώτα πάσα, το κρυογενικά κατεργασμένο κονδύλι εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερο πεδίο φθοράς, ενώ στο τέταρτο πάσο ελαφρώς μικρότερο από το αντίστοιχο μη κρυογενικά κατεργασμένο. Οι μετρήσεις της επιφάνειας PG παρουσιάζουν το μη κρυογενικά κατεργασμένο κονδύλι ελαφρώς καλύτερο, σε κάθε περίπτωση. Αν θεωρηθεί ως κριτήριο διάρκειας ζωής  $VB_{Bmax}=0.6mm$ , όπως ορίζεται και κατά ISO, η διάρκεια ζωής για το μη κρυογενικά κατεργασμένο κονδύλι αντιστοιχεί σε περίπου ένα πάσο, ενώ για το κονδύλι χωρίς κρυογενική κατεργασία σε δύο πάσα. Αν όμως υιοθετηθεί  $VB_{Bmax}=0.8 mm$  η διάρκεια ζωής και των δύο κονδυλίων είναι ίδια, δηλαδή αντιστοιχεί σε περίπου 3.5 πάσα. Για ακόμη μεγαλύτερο όριο φθοράς, η διάρκεια ζωής του κρυογενικά κατεργασμένου κονδυλίου είναι μεγαλύτερη αυτής του μη κατεργασμένου.



## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ

Στο κεφάλαιο 5 εξετάστηκε η επίδραση της Κρυογενικής Κατεργασίας στη μικροδομή εργαλειοχαλύβων, τη μικροσκληρότητα και την αντίστασή τους σε φθορά-τριβή.

Στα πλαίσια της μικροδομής των εργαλειοχαλύβων ασχοληθήκαμε με τη συμπεριφορά των καρβιδίων και τα αποτελέσματά μας ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι με εφαρμογή της Κρυογενικής Κατεργασίας κατακρημνίζονται νέα καρβίδια, οπότε, αυξάνεται το πλήθος των καρβιδίων και έχουμε καρβίδια μικρού μεγέθους τα οποία διανέμονται με μεγάλη ομοιογένεια. Τα συμπεράσματα αυτά συμπίπτουν με συμπεράσματα προγενέστερων μελετών, [2], [14] οι οποίες παρουσιάζονται στην ανασκόπηση του κεφαλαίου 3. Δεν έχει εξακριβωθεί πως ακριβώς η Κρυογενική Κατεργασία προάγει τη κατακρήμνιση καρβιδίων στο μαρτενσίτη και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Στη περίπτωση της μικροσκληρότητας των εργαλειοχαλύβων παρατηρήσαμε μια μικρή αύξηση για τους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες, που είναι όμως τόσο μικρή ώστε να θεωρούμε πως εμπίπτει στα όρια του πειραματικού σφάλματος της διαδικασίας της μικροσκληρομέτρησης. Παρ' όλα αυτά μια πιθανή αιτία της μικρής αυτής αύξησης, που χρειάζεται διερεύνηση είναι η μετατροπή ενός μικρού μέρους του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Και σε αυτή τη περίπτωση της μικροσκληρότητας τα συμπεράσματα συμφωνούν με συμπεράσματα αντίστοιχων μελετών [9], [5], [16].

Όσον αφορά τη φθορά τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά. Σε κάθε περίπτωση ο βαθμός φθοράς προέκυπτε μικρότερος για τους κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες και σε κάποιες περιπτώσεις η μείωση ήταν δραματικά μεγάλη. Αντίστοιχα καλά αποτελέσματα σημειώνονται και σε άλλες μελέτες [2], [9], [16], που χρησιμοποίησαν παρόμοιες διατάξεις τριβής-φθοράς όπως π.χ. διάταξη pin-on-disc.

Στο κεφάλαιο 6 εξετάστηκε η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στη φθορά και τη διάρκεια ζωής κονδυλίων φρεζαρίσματος.

Στη περίπτωση των κονδυλίων τα αποτελέσματά δεν μαρτυρούν κάποια ευεργετική επίδραση λόγω κρυογενικής κατεργασίας. Βέβαια όπως εξηγήσαμε είμαστε επιφυλακτικοί για τις μετρήσεις μας και χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση. Συμφωνούμε όμως με τη μελέτη [6], για τη περίπτωση κονδυλίων με επικάλυψη TiN 3μm, όπου κι εκεί τα μη κρυογενικά κατεργασμένα κονδύλια παρουσιάζουν μικρότερο μέσο πεδίο φθοράς και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αντίθετα σε μελέτες που έχουν γίνει



για άλλα κοπτικά εργαλεία όπως πλακίδια και τρυπάνια η Κρυογενική Κατεργασία δρα ευεργετικά. Στις εργασίες [6], [15] όπου εξετάζεται η φθορά και η διάρκεια ζωής τρυπανιών, αλλά και στις εργασίες [8], [20] αντίστοιχα για πλακίδια σημειώνεται μείωση του πεδίου φθοράς και αύξηση της διάρκειας ζωής των κρυογενικά κατεργασμένων κοπτικών εργαλείων σε κάθε περίπτωση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cryogenics#Definitions\\_and\\_distinctions](http://en.wikipedia.org/wiki/Cryogenics#Definitions_and_distinctions)
- [2] J.D. Darwin, D. Mohan Lal, G. Nagarajan  
“Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method”  
Journal of Materials Processing Technology, 2008, VOL.195, pp. 241–249
- [3] LIU Hao-huai, WANG Jun, YANG Hong-shan, SHEN Bao-luo, GAO She-ji, HUANG Si-jiu  
“Effect of Cryogenic Treatment on Property of 14Cr2Mn2V High Chromium Cast Iron Subjected to Subcritical Treatment”  
Journal of Iron and Steel Research International, 2006, VOL.13, No 6, pp. 43-48
- [4] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan, A. Kalanidhi  
“Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels”  
Cryogenics, 2001, VOL.41, pp.149-155
- [5] S. Zhirafar, A. Rezaeian, M. Pugh  
“Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel”  
Journal of Materials Processing Technology, 2007, VOL.186 pp. 298–303
- [6] Flavio J. da Silva, Sinesio D. Franco, Alisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu, Antonio M. Souza Jr.  
“Performance of cryogenically treated HSS tools”  
Wear, 2006, VOL.261, pp. 674–685
- [7] Yakup Yildiz, Muammer Nalbant  
“A review of cryogenic cooling in machining processes”  
International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, VOL.48, pp. 947–964
- [8] A.Y.L. Yong, K.H.W. Seah, M. Rahman  
“Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning”  
International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, VOL.46, pp. 2051–2056
- [9] R.F. Barron  
“Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance”  
Cryogenics, 1982, pp. 409-413
- [10] <http://georgepehli.googlepages.com/cryogenics4upload.pdf>
- [11] [http://cryogenics.gr/gr/tech\\_2.html](http://cryogenics.gr/gr/tech_2.html)
-

- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cryogenics#Cryogenic\\_processing](http://en.wikipedia.org/wiki/Cryogenics#Cryogenic_processing)
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_Cryogenic\\_Treatment](http://en.wikipedia.org/wiki/Deep_Cryogenic_Treatment)
- [14] J.Y. Huang, Y.T. Zhu, X.Z. Liao, I.J. Beyerlein, M.A. Bourke, T.E. Mitchell  
“Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel“  
Materials Science and Engineering, 2003, VOL.339, pp. 241–244
- [15] V. Firouzdar, E. Nejati, F. Khomamizadeh  
“Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill“  
Journal of Materials Processing Technology, 2008, VOL.206, pp. 467–472
- [16] N.B. Dhokey, S. Nirbhavne  
“Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel“  
Journal of Materials Processing Technology, 2008
- [17] A.Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini, K.H. Stiasny  
“Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels“  
Journal of Materials Processing Technology, 2001, VOL.118, pp. 350-355
- [18] [http://cryogenics.gr/gr/tech\\_1.html](http://cryogenics.gr/gr/tech_1.html)
- [19] <http://cryogenics.gr/gr/proc2.html>
- [20] T.V. SreeramaReddy, T. Sornakumar, M. VenkataramaReddy, R. Venkatram  
“Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts“  
International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2008
- [21] [http://cryogenics.gr/gr/tech\\_3.html](http://cryogenics.gr/gr/tech_3.html)
- [22] <http://cryogenics.gr/gr/divis.html>
- [23] <http://www.cryogenicsinternational.com/applicat.htm>
- [24] <http://www.300below.com/cryo-processing.html>
- [25] [http://www.cryogenicsociety.org/education/careers\\_in\\_cryogenics/](http://www.cryogenicsociety.org/education/careers_in_cryogenics/)