



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ):

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΛΕΙΑΝΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Κ. ΖΥΓΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ):

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΛΕΙΑΝΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Κ. ΖΥΓΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

Πρόλογος

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», με σκοπό την πειραματική μελέτη της επιφανειακής σκλήρυνσης μεταλλικών υλικών με τη διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης, ελέγχοντας τις διαφόρους παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας..

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και την στήριξη του και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Κάρκαλο για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πειραματικό μέρος της εργασίας και τέλος όλο το τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου και ιδιαίτερα τον Νίκο Μελισσά για την βοήθειά του κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η μελέτη της επιφανειακής σκλήρυνσης, καθώς και του βάθους διείδυσης της σκλήρυνσης σε μεταλλικά αντικείμενα τα οποία έχουν υποστεί Σκλήρυνση με Λείανση, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας (παράμετροι διεργασίας, χαρακτηριστικά λειαντικού τροχού) και τα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος (γεωμετρία, υλικό).

Η κατεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης είναι μία επιφανειακή θερμική κατεργασία στην οποία οι παράμετροι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να παράγεται σημαντική ποσότητα θερμότητας στην περιοχή της λείανσης. Η θερμότητα αυτή θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε το υλικό να υποστεί θερμική κατεργασία. Ο κύριος μηχανισμός παραγωγής θερμότητας είναι η τριβή στην διεπιφάνεια κόκκου-δοκιμίου.

Για την διερεύνηση των παραμέτρων που οδηγούν σε σκλήρυνση της επιφάνειας των δοκιμίων, διεξήχθησαν πειράματα με τρεις διαφορετικές τιμές βάθους κοπής (0.3-0.5 mm), τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας πρόωσης (11.7-22.6 m/min) και φορά λείανσης ομόρροπη και αντίρροπη σε χαλύβδινα δοκίμια δύο διαφορετικών ειδών.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση μπορεί να αυξήσει σε μεγάλο βαθμό την επιφανειακή σκληρότητα χαλύβδινων αντικειμένων, καθώς και το βάθος σκλήρυνσης αυτών ανάλογα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι με αυξανόμενο το βάθος κοπής, αυξάνει η παραγόμενη θερμότητα και κατά συνέπεια και το βάθος σκλήρυνσης. Επίσης, αύξηση της ταχύτητας πρόωσης οδηγεί σε μείωση του βάθους σκλήρυνσης και μάλιστα όταν η τιμή της ταχύτητας ξεπεράσει κάποιο όριο δεν είναι πια δυνατή η επίτευξη σκλήρυνσης.

Abstract

The aim of the current thesis is the study of surface hardening as well as the hardness depth in metallic workpieces which are processed by Grind-hardening machining process, regarding the process characteristics (process parameters, characteristics of grinding wheel) and the workpiece characteristics (geometry, material properties).

Grind-hardening machining process is a surface thermal process in which machining parameters are chosen so that a significant amount of heat in the grinding area is produced. This amount of heat must be sufficient to lead to a thermal process of the workpiece material. The main mechanism of heat production is friction in the interface of abrasive grains and workpiece.

Grinding tests were conducted with three different depth of cut values (0.3-0.5 mm), three different workpiece feed values (11.7-22.6 m/min) as well as two types of grinding (up grinding and down grinding) on steel workpieces made from 2 different steel types, in order to investigate the effect of machining parameters in surface hardening of these workpieces.

From the experimental findings, it was shown that Grind-hardening machining process can increase the surface hardness and hardness depth of steel workpiece to a significant degree, according to the range of machining parameters employed. Specifically, it was observed that an increase in depth of cut leads to increasing amount of heat produced and consequently to an increase in the hardness depth as well. Furthermore, an increase in workpiece feed leads to decrease of hardness depth values and in the case of large workpiece feed no significant hardening of the workpiece surface is observed.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	iii
Abstract	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	1
1.2 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	1
1.3 Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ – ΛΥΣΗ	3
1.4 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
1.5 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ- Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	8
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	8
2.1.1 ΕΙΔΗ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	8
2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	9
2.1.3 ΛΕΙΑΝΤΙΚΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	9
2.1.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΑΝΤΙΚΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	9
2.1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ- ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ	13
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ	13
3.1.1 ΧΑΛΥΒΕΣ - ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΑΛΥΒΩΝ - ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ.....	13
3.1.1.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ.....	14
3.2 ΣΙΔΗΡΟΣ – ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ	15
3.2.1 ΕΙΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Fe-C.....	16
3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	18
3.3.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΩΣΤΕΝΙΤΗ ΣΕ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗ.....	19
3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤTT ΚΑΙ CCT	20
3.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	22
3.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΜΕ ΛΕΙΑΝΣΗ	27
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	27
4.1.1 ΠΡΩΤΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	28
4.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	29
4.1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	30

4.1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΑΝΤΙΚΟΥ ΤΡΟΧΟΥ.....	31
4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	32
4.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ	37
4.3.1 Γενικά περί σκλήρυνσης.....	37
4.3.2 Μηχανισμός σκλήρυνσης.....	38
4.4 ΑΛΛΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	46
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	46
5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	54
5.3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	56
5.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	57
5.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματισμός και η μελέτη της διεργασίας που ονομάζεται Σκλήρυνση με Λείανση. Στην εργασία αυτή αφού γίνει μια σύντομη περιγραφή της διεργασίας, των εφαρμογών και των προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τη χρήση της, θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία και η μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά την οποία γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων με βάση τις θεωρητικές προσεγγίσεις των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

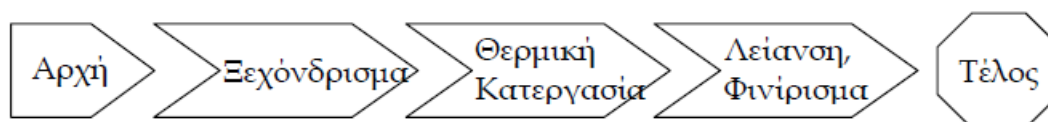
1.2 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η Σκλήρυνση και η Λείανση είναι δύο παραγωγικές διεργασίες οι οποίες είναι απαραίτητες για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας και ποιότητας.

Η Σκλήρυνση είναι αυτή που δίνει στο εξάρτημα υψηλή αντοχή σε κόπωση για να μπορεί να διατηρεί την ποιότητα της επιφάνειάς του όταν συνεργάζεται με άλλα εξαρτήματα. Η Λείανση είναι απαραίτητη για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας στο σχήμα, τις διαστάσεις καθώς και της επιφανειακής ποιότητας του εξαρτήματος.

Η τυπική σειρά των διεργασιών στις οποίες υπόκειται ένα τέτοιο εξάρτημα είναι:

ΑΡΧΗ - ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑ - ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ - ΛΕΙΑΝΣΗ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ- ΤΕΛΟΣ



Σχ. 1. Φάσεις επεξεργασίας μεταλλικού εξαρτήματος με συμβατικό τρόπο (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

Μετά τις διάφορες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (π.χ. φρεζάρισμα, τórνευση κ.α.) για την βασική μορφοποίηση της γεωμετρίας του αντικειμένου, ακολουθεί η θερμική κατεργασία, η οποία αποτελεί ένα από τα τελευταία στάδια επεξεργασίας του εξαρτήματος. Η ψύξη του εξαρτήματος κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας λόγω του υψηλού ρυθμού μεταβολής θερμότητας προκαλεί πλαστικές παραμορφώσεις.

Για την επίτευξη λοιπόν της απαιτούμενης ακρίβειας στη γεωμετρία και τις διαστάσεις καθώς και της απαιτούμενης επιφανειακής ποιότητας του εξαρτήματος, σχεδόν πάντα η θερμική κατεργασία ακολουθείται από λείανση.

Στο βιομηχανικό περιβάλλον, οι τρεις αυτές διαφορετικές φάσεις συνήθως λαμβάνουν χώρα σε ξεχωριστά τμήματα ενός παραγωγικού συστήματος, λόγω των διαφορετικών εγκαταστάσεων και εξοπλισμού που χρειάζονται για την πραγματοποίηση της κάθε φάσης. Έτσι, συνήθης πρακτική είναι η μεταφορά των εξαρτημάτων από τμήμα σε τμήμα ακολουθώντας τη σειρά των τριών φάσεων της κατασκευής των εξαρτημάτων. Η πρακτική αυτή όμως δημιουργεί σημαντικό φόρτο εργασίας σχετικά με τη διαχείριση των εξαρτημάτων. Έτσι, οι διαδικασίες διαχείρισης των εξαρτημάτων μέσα σε ένα παραγωγικό σύστημα αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα του κόστους παραγωγής, καθώς οι διαδικασίες αυτές είναι κατ' αρχήν χρονοβόρες, αλλά και απαιτούν εξοπλισμό, ανθρωποώρες και έλεγχο.

Ιδιαίτερα, διεργασίες όπως οι θερμικές κατεργασίες οι οποίες έχουν συνήθως σκοπό την επιφανειακή σκλήρυνση του εξαρτήματος, έχουν σημαντικό κόστος από πλευράς διαχείρισης των εξαρτημάτων (μεταφορά εξαρτημάτων από και προς τους κλιβάνους, τοποθέτηση των εξαρτημάτων σε ειδικές διατάξεις ώστε να εισαχθούν στο κλίβανο) καθώς επίσης και από πλευράς χρόνου (διεργασίες σκλήρυνσης σε κλίβανο έχουν συνήθως συνολική διάρκεια της τάξης των μερικών ωρών). Όσον αφορά στις διεργασίες αφαίρεσης υλικού, η ανάγκη μετακίνησης των εξαρτημάτων αυξάνει τις διαδικασίες πρόσδεσης και αφαίρεσής τους από τις εργαλειομηχανές, πράγμα που κοστίζει σε παραγωγικό χρόνο, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εξαρτήματα ακριβείας που απαιτούν ειδικές διαδικασίες πρόσδεσης.

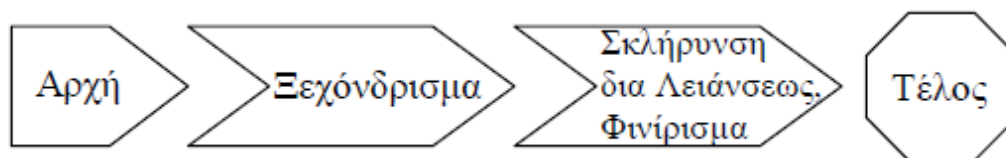
Έτσι τα προϊόντα επιβαρύνονται με σημαντικό κόστος διαδικασιών, μερικές από τις οποίες είναι και μη παραγωγικές, όπως είναι οι διαδικασίες διαχείρισης.

Ένας ακόμη επιβαρυντικός παράγοντας για τις διαδικασίες αυτές είναι και οι σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από αυτές. Εκτός από το περιβαλλοντικό φορτίο που δημιουργούν οι δευτερεύουσες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη διαχείριση των εξαρτημάτων μέσα στο παραγωγικό σύστημα, οι ίδιες οι διεργασίες σκλήρυνσης είναι πολλές φορές ιδιαίτερα επιβαρυντικές για το περιβάλλον. Διεργασίες όπως η βύθιση των εξαρτημάτων σε μπάνιο τηγμένων αλάτων και ο καθαρισμός των εξαρτημάτων με χημικά δημιουργούν σημαντικές εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια της διεργασίας (ατμοί, υγρά απόβλητα) όσο και στο τέλος της (διαχείριση και διάθεση των αποβλήτων). Έτσι δημιουργείται σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, αλλά και κίνδυνοι για την υγεία των εργαζομένων που ασχολούνται με τις διαδικασίες αυτές.

1.3 Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ – ΛΥΣΗ

Με στόχο τη δραστική μείωση του κόστους και του χρόνου επεξεργασίας των εξαρτημάτων, τη γενικότερη εξοικονόμηση χρόνου αλλά και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής εικόνας των διεργασιών παραγωγής μεταλλικών εξαρτημάτων, έχει προταθεί από ορισμένους ερευνητές (Brinksmeier E, Brockhoff T, 1996), (Τσίρμπας, 2002), (Σαλωνίτης, 2006) η εφαρμογή μιας σύνθετης διεργασίας λείανσης που ονομάζεται Σκλήρυνση με Λείανση. Κατά την εφαρμογή της διεργασίας αυτής, το επεξεργαζόμενο εξάρτημα υπόκειται σε επιφανειακή σκλήρυνση ταυτόχρονα με τη λείανση, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για ξεχωριστό στάδιο θερμικής κατεργασίας, καθώς και για όλες τις σχετικές εργασίες διαχείρισης.

ΑΡΧΗ-ΞΕΧΟΝΔΡΙΣΜΑ-ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΛΕΙΑΝΣΗ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ-ΤΕΛΟΣ



Σχ. 2. Φάσεις επεξεργασίας μεταλλικού εξαρτήματος με τη διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

Συγκρίνοντας την αλυσίδα των φάσεων κατεργασίας ενός τυπικού μεταλλικού εξαρτήματος που φαίνονται στα Σχ. 1. και 2, είναι προφανές ότι το όφελος από τη χρήση της διεργασίας Σκλήρυνσης με Λείανση είναι σημαντικό. Όλες οι διαδικασίες διαχείρισης, οι σχετικές με τη διεργασία της θερμικής κατεργασίας, εξαλείφονται μαζί με την ίδια τη διεργασία, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας.

Είναι επίσης ευνόητο ότι εξαλείφονται όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν τόσο από τις εργασίες διαχείρισης των εξαρτημάτων, όσο και από τις διεργασίες σκλήρυνσης αυτές καθαυτές.

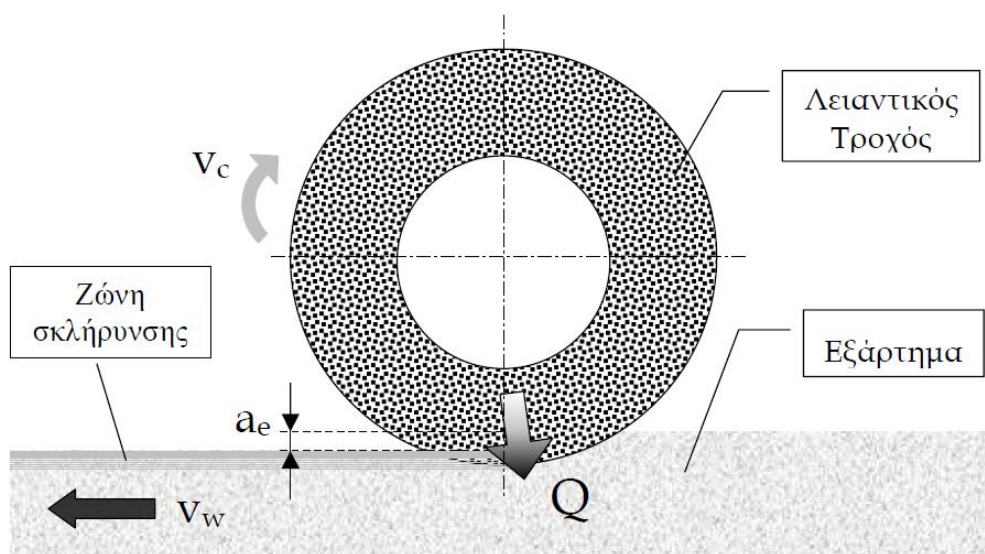
Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, και ταυτόχρονα το σημείο καινοτομίας της διεργασίας Σκλήρυνσης με Λείανση που επιτρέπει την ταυτόχρονη λείανση και θερμική κατεργασία του εξαρτήματος, είναι η εκμετάλλευση της θερμότητας που παράγεται στην περιοχή αφαίρεσης υλικού κατά τη λείανση για τη θερμική κατεργασία του εξαρτήματος. Με τη διεργασία αυτή είναι δυνατή η επιφανειακή σκλήρυνση όλων των υλικών που επιδέχονται θερμική κατεργασία ενώ μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μεγάλες επιφάνειες όσο και σημειακά πάνω σε προεπιλεχθέντα σημεία πάνω στο επεξεργαζόμενο εξάρτημα.

1.4 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση μοιάζει κατ' αρχήν με τη συνήθη διεργασία της λείανσης. Η διεργασία πραγματοποιείται σε μια επιφανειακή ή κυλινδρική λειαντική μηχανή, η οποία όμως θα πρέπει να έχει αυξημένη στιβαρότητα, λόγω των υψηλών δυνάμεων κοπής που εμφανίζονται κατά τη

διεργασία. Ο λειαντικός τροχός αφαιρεί υλικό από το επεξεργαζόμενο εξάρτημα, έχοντας όμως τις παραμέτρους της διεργασίας ρυθμισμένες έτσι ώστε να δημιουργείται η απαιτούμενη θερμότητα στην περιοχή κοπής (Σχ. 3).

Καθώς ο τροχός αφαιρεί υλικό, η θερμότητα που παράγεται στην περιοχή της κοπής δημιουργεί τοπική θερμική κατεργασία στο εξάρτημα, αφήνοντας πίσω της μια ζώνη συγκεκριμένου πλάτους με αυξημένη σκληρότητα, σε σχέση με τη σκληρότητα που είχε το εξάρτημα προ της επεξεργασίας. Η εικόνα που παρουσιάζει η διεργασία στην πραγματικότητα εμφανίζεται στο Σχ. 4:



Σχ. 3. Διάταξη διεργασίας Σκλήρυνσης με Λείανση (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).



Σχ. 4. Σκλήρυνση με Λείανση (ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ 2006).

1.5 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εισαγωγή της διεργασίας Σκλήρυνσης με Λείανση στην βιομηχανική πρακτική εξαρτάται από την δυνατότητα της διεργασίας αυτής να έχει επιθυμητό αποτέλεσμα, αλλά κυρίως από την δυνατότητα να ελέγχεται το αποτέλεσμα της διεργασίας, δηλαδή η επιφανειακή σκληρότητα και το βάθος της σκλήρυνσης που επιτυγχάνεται.

Η σκληρότητα και το βάθος σκλήρυνσης επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής, οι ιδιότητες του υλικού και ο τύπος του λειαντικού τροχού.

Η γνώση αυτών των παραμέτρων είναι αναγκαία για να μπορεί να προγραμματισθεί η εργασία και να μπορεί να προβλεφθεί το αποτέλεσμα πριν πραγματοποιηθεί. Έτσι μπορεί η διεργασία να χρησιμοποιηθεί σε μία ποικιλία εφαρμογών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σε βάθος μελέτη μεταλλικών εξαρτημάτων τα οποία έχουν υποστεί Σκλήρυνση με Λείανση, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της διεργασίας (παραμέτροι διεργασίας, χαρακτηριστικά λειαντικού τροχού) και τα χαρακτηριστικά του εξαρτήματος (γεωμετρία, υλικό).

Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η εφαρμογή της κατεργασίας Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης σε δοκίμια δύο ειδών χάλυβα, για διάφορους συνδυασμούς βάθους κοπής, ταχύτητας πρόωσης και φοράς λείανσης (ομόρροπη, αντίρροπη) με μία συμβατική μηχανή λείανσης για να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατή η επίτευξη των επιθυμητών στόχων μέσω αυτής της μηχανής στις διάφορες περιπτώσεις που μελετώνται. Η διαφοροποίηση από τις προϋπάρχουσες εργασίες είναι κυρίως η χρήση υψηλότερων ταχυτήτων πρόωσης για την κατεργασία, σε μια συμβατική μηχανή λείανσης (ρεκτιφιέ) και η διερεύνηση της απαιτούμενης τιμής των υπολοίπων παραμέτρων της κατεργασίας ώστε να επιτύχουμε σκλήρυνση στα δοκίμια που μελετούμε. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα εξεταστούν και σε σχέση με θεωρητικές προσεγγίσεις που έχουν γίνει στη βιβλιογραφία για να ερμηνευθούν βάσει των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ- Η ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

Λείανση είναι η κατεργασία αποβολής υλικού με κοπτικό εργαλείο τον λειαντικό τροχό, ο οποίος περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Είναι κατεργασία διαμόρφωσης ακρίβειας και κυρίως αποπεράτωσης μεταλλικών υλικών.

Χρησιμοποιείται κυρίως για επιφάνειες με μεγάλη ακρίβεια μορφής και διαστάσεων. Κατεργάζονται πολύ σκληρά μεταλλικά υλικά, έχει πολύ υψηλό βαθμό λειότητας του κατεργαζόμενου υλικού και υψηλή απόδοση κοπής.

Κατά την κατεργασία της λείανσης αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα, πάνω από κάποια θερμοκρασία, να αλλοιώνεται η κρυσταλλική δομή του υλικού.

2.1.1 ΕΙΔΗ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

α) **Επίπεδη λείανση** (surface grinding)

Χρησιμοποιείται για λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερειακή και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια.

β) **Κυλινδρική λείανση.**

Χρησιμοποιείται για την κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών και διακρίνεται σε εσωτερική και εξωτερική κυλινδρική λείανση.

γ) **Άκεντρη λείανση.**

δ) **Λείανση μορφής.**

ε) **Αποκοπή υλικού με λειαντικό δίσκο.**

στ) **Σκλήρυνση μέσω λείανσης.**

2.1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

α) **Ομόρροπη λείανση.** Κατά την κατεργασία αυτή η επιφάνεια λείανσης γυαλίζει, γιατί οι πόροι του τροχού γεμίζουν με απόβλητα. Εφαρμόζεται κυρίως για ξεχόνδρισμα.

β) **Αντίρροπη λείανση.** Η επιφάνεια παρουσιάζει πολύ υψηλό βαθμό λειότητας. Εφαρμόζεται κυρίως κατά την αποπεράτωση.

2.1.3 ΛΕΙΑΝΤΙΚΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Αποτελούνται από:

-Τους λειαντικούς κόκκους που είναι από πολύ σκληρό υλικό και παίζουν το ρόλο μικροσκοπικών κοπτικών εργαλείων.

-Τον δεσμό που είναι το συνδετικό υλικό που συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους και καθορίζει την γεωμετρική μορφή και την υφή του τροχού.

-Το πορώδες που είναι το σύνολο των κενών που σχηματίζουν στο εσωτερικό του τροχού και διευκολύνουν την απομάκρυνση των αποβλήτων και την πρόσβαση του υγρού κοπής στη θέση εργασίας.

2.1.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΑΝΤΙΚΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

α) Υλικά κόκκου (Abrasive type)

-Φυσικό ή τεχνητό κορούνδιο (συμβολίζεται με A) και είναι το Al_2O_3 . Λαμβάνεται με φυσικό τρόπο από το ορυκτό σμύριδα ή παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο από βωξίτη. Χρησιμοποιείται για λείανση σκληρών και συνεκτικών υλικών.

-Ανθρακοπυρίτιο SiC (συμβολίζεται με C). Παράγεται τεχνητά σε ηλεκτρική κάμινο με πρώτες ύλες χαλαζιακή άμμο και C. Είναι σκληρότερο από το κορούνδιο. Οι τροχοί ανθρακοπυρίτιου χρησιμοποιούνται για όλα τα ψαθυρά υλικά καθώς επίσης και για πολύ μαλακά υλικά.

-Διαμάντι (συμβολίζεται με D). Είναι σκληρότερο και ακριβότερο από τα προηγούμενα. Χρησιμοποιείται για σκληρά και ψαθυρά υλικά (κεραμικά, γυαλί).

-Κυβικός βοριοιτιρίτης (CBN) (συμβολίζεται με BN). Είναι περισσότερο σκληρό και πολύ ακριβό. Χρησιμοποιείται για συγκεκριμένα μέταλλα εργαλείων.

β) Κόκκωση (Grain size)

Καθορίζει το μέσο μέγεθος των κόκκων του λειαντικού τροχού και εκφράζεται με το αντίστοιχο μέγεθος κόσκινου από το οποίο περνούν οι κόκκοι. Κόσκινο Νο Χ σημαίνει ότι αυτό φέρει Χ συρματίδια ανά in.

Πίνακας 1: Κοκκώσεις λειαντικών τροχών

Χαρακτηρισμός τροχού	Κόκκωση τροχού				
Πολύ χονδρόκοκκος	8	10	12		
Χονδρόκοκκος	<u>14</u>	<u>16</u>	20	<u>24</u>	<u>30</u>
Μέσης κόκκωσης	36	40	<u>46</u>	50	<u>60</u>
Λεπτόκοκκος	70	80	90	100	120
Πολύ λεπτόκοκκος	150	<u>180</u>	200	220	<u>240</u>
Κόκκωση τύπου κόνεως	<u>260</u>	300	400	<u>500</u>	600

Πίνακας 1: Κοκκώσεις λειαντικών τροχών (Σημειώσεις - ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

γ) Σκληρότητα (Grade).

Εκφράζει τη σχετική δύναμη συγκράτησης του κόκκου από το δεσμό και όχι τη σκληρότητα του κόκκου. Η σκληρότητα των λειαντικών τροχών χαρακτηρίζεται από την κλίμακα Norton σύμφωνα με τον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Σκληρότητες λειαντικών τροχών

Χαρακτηρισμός τροχού	Σκληρότητα
Εξαιρετικά μαλακός	A, B, C, D
Πολύ μαλακός	E, F, G
Μαλακός	H, I, J, K
Μέσης σκληρότητας	L, M, N, O
Σκληρός	P, Q, R, S
Πολύ σκληρός	T, U, V, W
Εξαιρετικά σκληρός	X, Y, Z

Πίνακας 2 : Σκληρότητες λειαντικών τροχών (Σημειώσεις - ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

δ) Υφή (Structure).

Αναφέρεται στο πορώδες της κατασκευής του λειαντικού τροχού και χαρακτηρίζεται με βάση την κλίμακα των αριθμών 0-9 σύμφωνα με τον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Υφή λειαντικών τροχών

Χαρακτηρισμός τροχού	Υφή
Πολύ πυκνή υφή	0, 1
Πυκνή υφή	2, 3
Μέση υφή	4, 5
Ανοικτή υφή	6, 7
Πολύ ανοικτή υφή	8, 9

Πίνακας 3: Υφή λειαντικών τροχών (Σημειώσεις - ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

ε) Συνδετικό υλικό (Bonding material)

Το συνδετικό υλικό συγκρατεί τους κόκκους μεταξύ τους μέχρι αυτοί να στομώσουν οπότε και αποσπώνται. Θα πρέπει επίσης να αντέχει σε φυγόκεντρες δυνάμεις, σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σε ξαφνικά φορτία.

στ) Σήμανση, τυποποίηση λειαντικών τροχών.

Για τον καθορισμό του μεγέθους ενός λειαντικού τροχού απαιτούνται η εξωτερική διάμετρος D , η διάμετρος κεντρικής οπής d , και το πλάτος b .

Η σήμανση του λειαντικού τροχού κατά ISO φαίνεται στο Σχ. 5.

Σχήμα και διαστάσεις				Υλικό					
1	—	450 x 100 x 127	—	A	60	K	8	V	35
Βασική μορφή κατά ISO	—	Εξωτερική διάμετρος	—	Κοπτικό υλικό	—	Κόκκωση	—	Βαθμός σκληρότητας (μαλακός)	—
	—	Πλάτος	—		—		—	Χαρακτηριστικός αριθμός υφής	—
	—	Διάμετρος οπής	—		—		—	Συνδετικό υλικό (ν: κεραμικό)	—
	—		—		—		—	Επιτρεπόμενη μέγιστη περιφερειακή ταχύτητα (m/s)	—

Σχ.5. Σήμανση λειαντικού τροχού κατά ISO (Σημειώσεις- ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

2.1.4 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

Ταξινόμηση Εργαλειομηχανών Λείανσης

- α) Λειαντική μηχανή επίπεδων επιφανειών.
- β) Λειαντική μηχανή εξωτερικών και εσωτερικών κυλινδρικών επιφανειών.
- γ) Λειαντική μηχανή για άκεντρη λείανση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ- ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνειά του με συγκεκριμένη δύναμη και ορισμένη χρονική διάρκεια.

Η αρχή λειτουργίας των δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος που δημιουργεί το ξένο σώμα στην επιφάνεια του υλικού. Αν το αποτύπωμα είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διείσδυση και άρα είναι σκληρό, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό αντιστέκεται λιγότερο και επομένως είναι λιγότερο σκληρό.

3.1.1 ΧΑΛΥΒΕΣ - ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΑΛΥΒΩΝ - ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι αλλοτροπικές μορφές του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων.

Τα καθαρά μέταλλα είναι πιο μαλακά και λιγότερο στιβαρά από τα κράματά τους. Τα ξένα άτομα κραμάτωσης (αντικατάστασης ή προσθήκης) προκαλούν παραμορφώσεις και εισάγουν τασικά πεδία στο μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα. Η σκλήρυνση είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ διαταραχών και ξένων ατόμων κραμάτωσης. Η ισχυροποίηση με κραμάτωση είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των τασικών πεδίων που εισάγονται στο υλικό από τις διαταραχές και τα ξένα άτομα κραμάτωσης.

Η ισχυροποίηση που επιτυγχάνεται στα κράματα αντικατάστασης είναι σχετικά μικρή και πιο έντονη στην κραμάτωση με μικρότερης διαμέτρου ξένα άτομα, ενώ η ελάχιστη ισχυροποίηση παρατηρείται σε κραμάτωση με ξένα άτομα ισομεγέθη προς τα μητρικά.

Αντίθετα τα ξένα άτομα παρεμβολής δημιουργούν μη συμμετρικά τασικά πεδία, τα οποία αλληλεπιδρούν και με τα υδροστατικά και με τα διατμητικά τασικά πεδία των διαταραχών, επιτυγχάνοντας έτσι μεγάλη ισχυροποίηση.

Αποτέλεσμα της ισχυροποίησης με κραμάτωση είναι η αύξηση της σκληρότητας, η αύξηση της αντοχής, η αύξηση του ορίου διαρροής και η μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

3.1.1.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Είναι τα κράματα που βρίσκουν ευρείες εφαρμογές στην πράξη και διακρίνονται σε:

-ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ: Χάλυβες, χυτοσίδηροι.

-ΜΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑ ΚΡΑΜΑΤΑ: Κράματα Cu (ορείχαλκος, μπρούτζος κ.α), κράματα ελαφρών μετάλλων (Al,Mg,Ti) κράματα Zn κ.α.

Όσον αφορά τα σιδηρούχα κράματα, και συγκεκριμένα τους χάλυβες, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία, μπορεί να γίνει μια περαιτέρω ταξινόμηση τους:

α)Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση διακρίνονται σε κοινούς ή ανθρακούχους και σε κραματωμένους χάλυβες.

β) Ανάλογα με τον προορισμό τους διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες.

γ) Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε χάλυβες κατασκευών, εργαλειοχάλυβες, ανοξειδωτους χάλυβες, πυρίμαχους χάλυβες και χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.

Οι κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες είναι κράματα Fe-C με μικρές ποσότητες P,S, και Mn.Το σημαντικότερο όμως στοιχείο στους χάλυβες είναι ο C ο οποίος συμβάλει σημαντικά και στην ισχυροποίησή τους.

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε C διακρίνονται σε:

-Ευτηκτοειδείς: Με ποσοστό C=0,80%

-Υπερευτηκτοειδείς: Με ποσοστό C από 0,80% έως 2,0%

-Υποευτηκτοειδείς: Με ποσοστό C< 0,80%

Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα αυξάνονται η σκληρότητα, η αντοχή και εμβαπτότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα.

Η αλληλεπίδραση των κραματικών στοιχείων και η συνεργατική τους δράση επηρεάζει τόσο την θερμοδυναμική όσο και την κινητική των μετασχηματισμών των φάσεων στους χάλυβες, καθώς επίσης και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

3.2 ΣΙΔΗΡΟΣ – ΑΛΛΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Ο σίδηρος σχηματίζει στερεά διαλύματα παρεμβολής, με τον άνθρακα να είναι το σημαντικότερο στοιχείο παρεμβολής.

Ο σίδηρος ανάλογα με το σημείο τήξης (1539°C) παρουσιάζει τις παρακάτω αλλοτροπικές μορφές:

-Μέχρι τη θερμοκρασία των 910°C χαρακτηρίζεται ως Fe-α και κρυσταλλώνεται στο σύστημα bcc.

-Στη θερμοκρασιακή περιοχή από 910°C έως 1400°C χαρακτηρίζεται ως Fe-γ και κρυσταλλώνεται στο σύστημα fcc.

- Στη θερμοκρασιακή περιοχή από 1400°C έως 1539°C χαρακτηρίζεται ως Fe-δ και κρυσταλλώνεται στο σύστημα bcc .

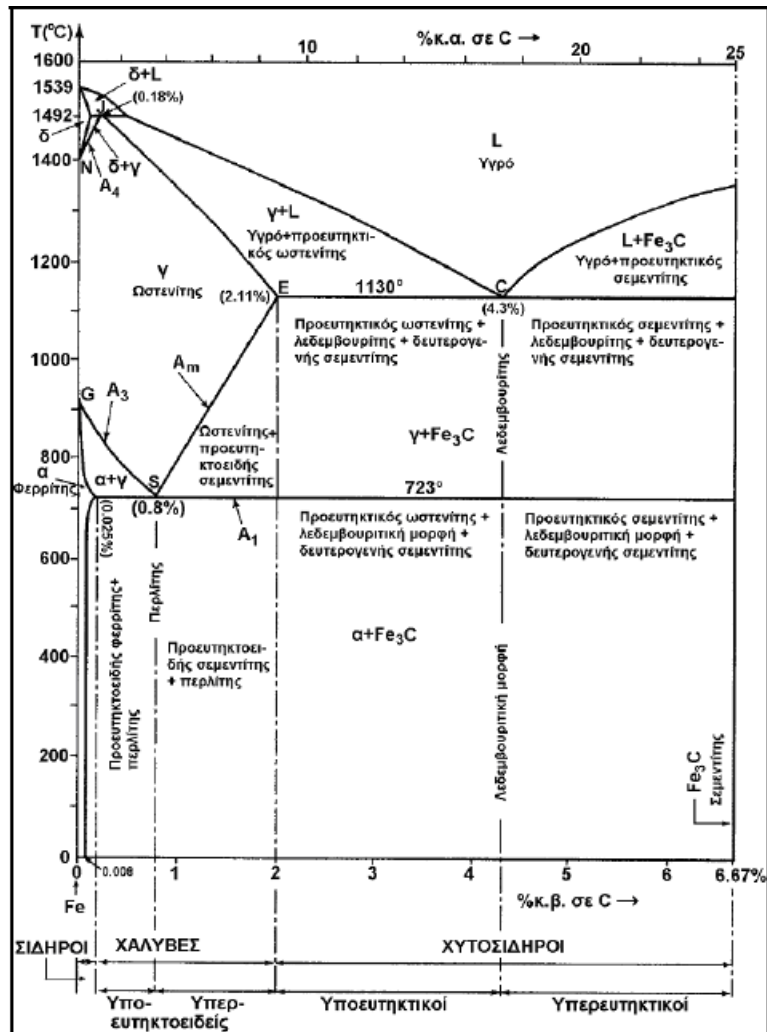
Οι ανωτέρω μεταβολές επηρεάζονται από τα στοιχεία με τα οποία ο Fe σχηματίζει τα διάφορα κράματα. Επίσης παρατηρούνται μεταβολές των ιδιοτήτων του Fe σε διάφορες θερμοκρασίες.

Το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-C είναι το πιο σημαντικό διάγραμμα διμερούς συστήματος, λόγω της τεράστιας χρηστικότητας των κραμάτων που περιγράφει (χάλυβες και χυτοσίδηροι).

3.2.1 ΕΙΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Fe-C

Το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C απεικονίζεται με δύο τρόπους:

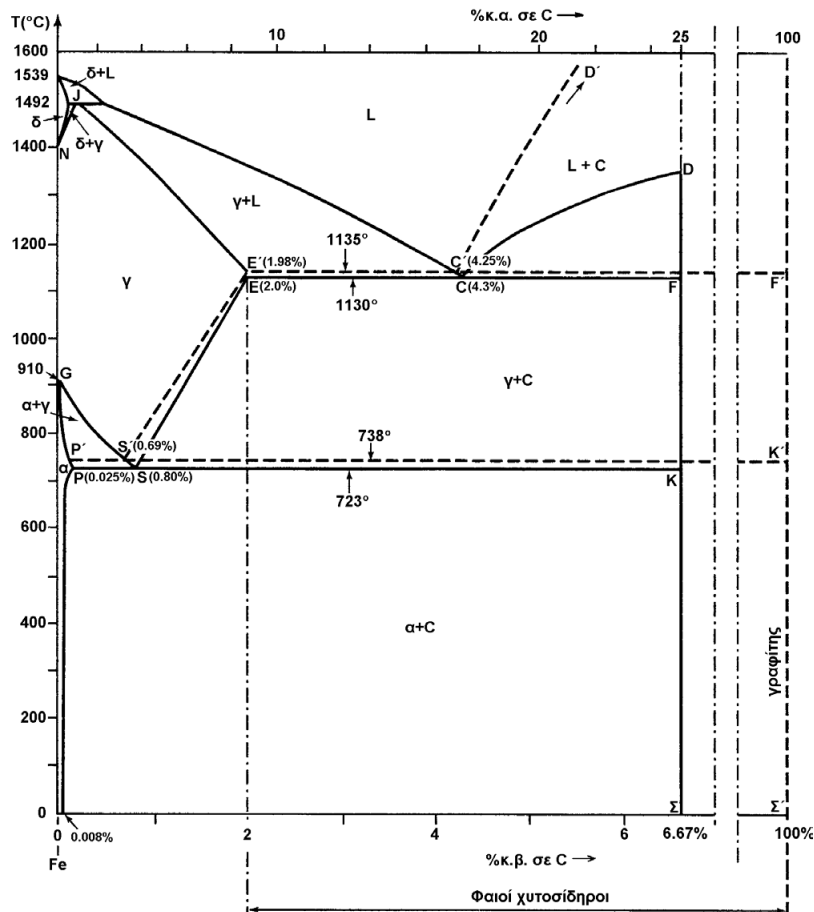
(α) Ως μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C (σιδήρου-σεμεντίτη) (η ονομασία προέκυψε από το γεγονός ότι ο σεμεντίτης είναι ένωση μετασταθής, δηλ. θερμοδυναμικά ασταθής), βλ. Σχ. 6:



Σχ. 6. Το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe₃C (Σημειώσεις- ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

(β) Ως ευσταθές διάγραμμα Fe-C (σιδήρου-γραφίτη) (η ονομασία προέκυψε από το γεγονός ότι ο γραφίτης είναι σταθερός), βλ. Σχ. 7

Στον παρακάτω πίνακα 4 φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των δύο διαγραμμάτων και στα Σχήματα 6 και 7 παρατίθενται τα διαγράμματα και η σύγκριση μεταξύ τους (Σημειώσεις Μανωλάκου).



Σχ. 7. Σύγκριση ευσταθούς και μετασταθούς διαγράμματος ισορροπίας Fe-C (Σημειώσεις-ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

Κατά κανόνα, χρησιμοποιείται το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας, παρόλο που δεν είναι ένα πραγματικό διάγραμμα ισορροπίας (αλλά μετασταθές), διότι παρέχει την ευχέρεια καλλίτερης παρακολούθησης των μεταλλογραφικών μετασχηματισμών κατά τη θέρμανση ή την ψύξη ενός κράματος Fe-C.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Διαφορές μεταξύ των διαγραμμάτων ισορροπίας Fe-C

1. Η ταχύτητα απόψυξης στο ευσταθές διάγραμμα είναι πολύ μικρότερη από αυτή του μετασταθούς.
2. Η ευτηκτική θερμοκρασία στο ευσταθές διάγραμμα είναι 1135°C, ενώ στο μετασταθές 1130°C.
3. Η ευτηκτική περιεκτικότητα σε C στο ευσταθές διάγραμμα είναι 4.25%, ενώ στο μετασταθές 4.30%.
4. Η ευτηκτοειδής θερμοκρασία στο ευσταθές διάγραμμα είναι 738°C, ενώ στο μετασταθές 723°C.
5. Η ευτηκτοειδής περιεκτικότητα σε C στο ευσταθές διάγραμμα είναι 0.69%, ενώ στο μετασταθές 0.80%.
6. Οι χυτοσίδηροι του ευσταθούς διαγράμματος ονομάζονται *φαιοί χυτοσίδηροι* και έχουν κύριο συστατικό γραφίτη υπό μορφή φυλλιδίων και περιεκτικότητα σε πυρίτιο $\pi(\text{Si}) > 0.7\%$ κ.β., ενώ οι χυτοσίδηροι του μετασταθούς διαγράμματος ονομάζονται *λευκοί χυτοσίδηροι*, έχουν κύριο συστατικό το σεμεντίτη υπό μορφή δενδριτικής και $\pi(\text{Si}) < 0.5\%$ κ.β.

Πίνακας 4: Διαφορές μεταξύ των διαγραμμάτων ισορροπίας Fe – C (Σημειώσεις-ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΕ ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα κραματικά στοιχεία συμπεριφέρονται ως σταθεροποιητές της ωστενιτικής ή της φερριτικής φάσης, επηρεάζουν την κινητική των μετασχηματισμών αφού απαιτείται η διάχυσή τους για την πραγματοποίηση ενός μετασχηματισμού.

Η μεγαλύτερη ποικιλία μικροδομών στους χάλυβες σχηματίζεται κατά τον μετασχηματισμό του ωστενίτη όταν αυτός ψύχεται. Έτσι ανάλογα με τη θερμοκρασία μετασχηματισμού ή το ρυθμό ψύξης είναι δυνατόν να σχηματιστεί προευθηκτοειδής φερρίτης, περλίτης μπαινίτης ή μαρτενσίτης. Η κινητική των μετασχηματισμών αυτών αποτυπώνεται στα διαγράμματα TTT και CCT,

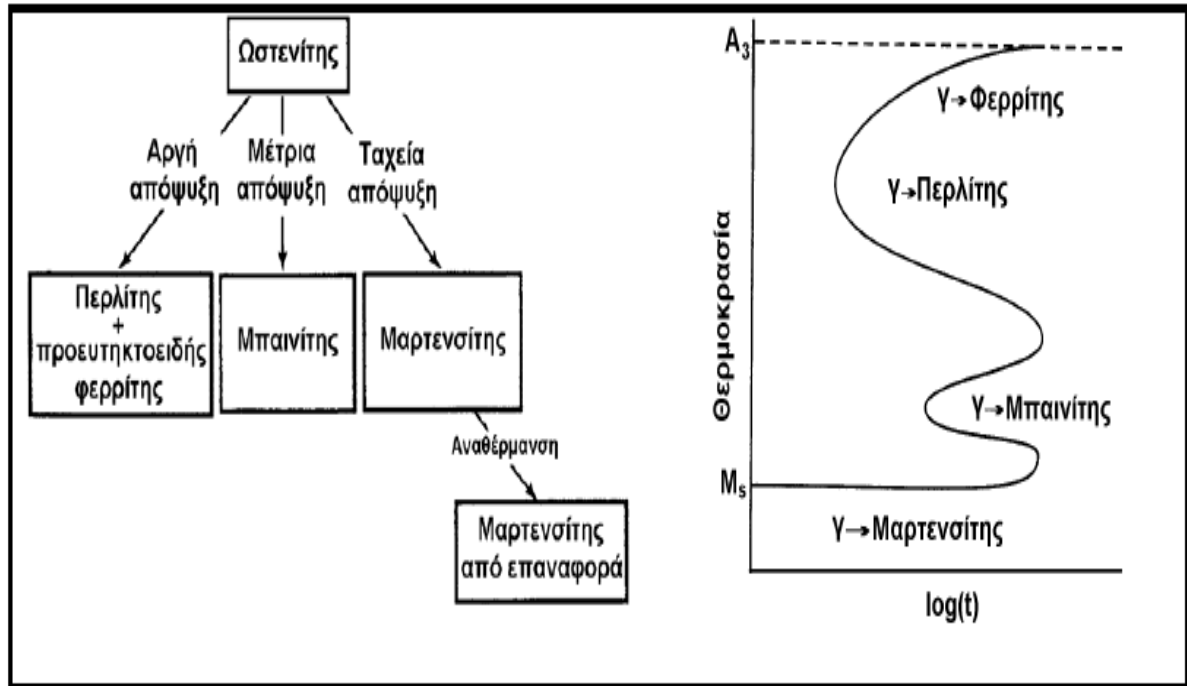
Όπως σε όλα τα μεταλλικά κράματα, έτσι και στους χάλυβες, οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από την μικροδομή τους. Με τον όρο μικροδομή εννοούμε κυρίως τις διαφορετικές φάσεις από τις οποίες αποτελείται ο χάλυβας. Η διαμόρφωση της μικροδομής πραγματοποιείται μέσω μετασχηματισμών των φάσεων, που λαμβάνουν χώρα κατά τις θερμικές κατεργασίες των χάλυβων. Τις περισσότερες φορές η μικροδομή διαμορφώνεται κατά την ψύξη του χάλυβα από την ωστενιτική περιοχή.

Οι μετασχηματισμοί που λαμβάνουν χώρα σε στερεά κατάσταση χαρακτηρίζονται από:

α) Την παρουσία του φαινομένου της διάχυσης (περλιτικός μετασχηματισμός).

β) Την πλήρη απουσία της διάχυσης (μαρτενσιτικός μετασχηματισμός).

γ) Ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των δύο προηγούμενων μετασχηματισμών (μπαινιτικός μετασχηματισμός). Σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη και εξέλιξη ενός μετασχηματισμού σε στερεά κατάσταση έχει ο ρυθμός απόψυξης του κράματος όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 8.



Σχ. 8 Επίδραση της ταχύτητας απόψυξης στους μετασχηματισμούς χάλυβα σε στερεά κατάσταση (Σημειώσεις- ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

Οι μετασχηματισμοί μπορεί να είναι είτε ισόθερμοι (TTT) είτε συνεχούς ψύξης (CCT). Στους ισόθερμους μετασχηματισμούς ο χάλυβας φέρεται σε μία χαμηλότερη θερμοκρασία και ο ωστενίτης (γ) μετασχηματίζεται ισόθερμα σε φερρίτη (α), περλίτη ή μπαινίτη. Το ποια φάση θα σχηματιστεί εξαρτάται από τη θερμοκρασία του μετασχηματισμού.

Όσον αφορά τον μαρτενσίτη, αυτός μπορεί να σχηματιστεί μόνο με συνεχή ψύξη του ωστενίτη και αφού ισχύουν και άλλες προϋποθέσεις. Η ακριβής απεικόνιση των μετασχηματισμών πραγματοποιείται με τα διαγράμματα ισόθερων μετασχηματισμών (διαγράμματα TTT) και τα διαγράμματα μετασχηματισμών συνεχούς ψύξης (διαγράμματα CCT) και τα οποία θα μελετήσουμε παρακάτω.

3.3.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΩΣΤΕΝΙΤΗ ΣΕ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗ

Η μέγιστη αύξηση της σκληρότητας επιτυγχάνεται με την απότομη ψύξη του χάλυβα. Η σημαντική αυτή σκλήρυνση οφείλεται στο σχηματισμό μαρτενσίτη. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι ο σημαντικότερος μετασχηματισμός στους χάλυβες με μεγάλες τεχνολογικές εφαρμογές.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι τα εξής:

-Ο μετασχηματισμός αυτός είναι μετατοπιστικός, δηλαδή πραγματοποιείται με συνεργατική μετατόπιση όλων των ατόμων του πλέγματος, έτσι ώστε να διατηρείται πλήρης αντιστοιχία μεταξύ αρχικών και τελικών πλεγματικών θέσεων.

-Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μη διαχυτικός, αφού δεν προϋποθέτει διάχυση για την πραγματοποίησή του. Στην ουσία ο μαρτενσίτης σχηματίζεται με διάτμηση της μητρικής φάσης (ωστενίτης). Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται κατά την απότομη ψύξη του ωστενίτη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται βαφή των χαλύβων. Η ταχύτητα βαφής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη (πάνω από μία κρίσιμη τιμή), ώστε να μην προλάβουν να ενεργοποιηθούν άλλοι διαχυτικοί μετασχηματισμοί (π.χ. σχηματισμός φερρίτη, περλίτη, ή μπαινίτη).

Η κρίσιμη ταχύτητα ψύξης εξαρτάται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε κραματικά στοιχεία και από το μέγεθος του ωστενιτικού κόκκου. Το ποσοστό του μαρτενσίτη δεν αυξάνεται με το χρόνο, αλλά αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας κατά την ψύξη σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασιακή περιοχή που καθορίζεται από τις θερμοκρασίες έναρξης και λήξης του μετασχηματισμού.

Ο σχηματισμός του μαρτενσίτη στους χάλυβες προκαλεί μεγάλη αύξηση της σκληρότητας, γεγονός που δεν παρατηρείται σε μαρτενσιτικούς μετασχηματισμούς άλλων κραματικών συστημάτων.

Οπωσδήποτε η σκληρότητα του μαρτενσίτη στους χάλυβες οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην παρουσία του άνθρακα, σε θέσεις παρεμβολής στο κρυσταλλικό πλέγμα του μαρτενσίτη, το οποίο είναι τετραγωνικό χωροκεντρωμένο.

3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ TTT ΚΑΙ CCT

Τα διαγράμματα TTT είναι διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου (συνήθως λογαριθμικής κλίμακας), στα οποία αποτυπώνεται η έναρξη και η λήξη των ισόθερμων μετασχηματισμών των χαλύβων. Είναι χρήσιμα για την κατανόηση της κινητικής του μετασχηματισμού ενός κράματος, το οποίο αποψύχεται σε σταθερή θερμοκρασία.

Στην περίπτωση των χαλύβων, τα διαγράμματα TTT παρουσιάζουν τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε άλλες φάσεις, γεγονός που μας επιτρέπει να καθορίσουμε την σχέση μεταξύ θερμικής κατεργασίας και ανάπτυξης συγκεκριμένης μικροδομής,

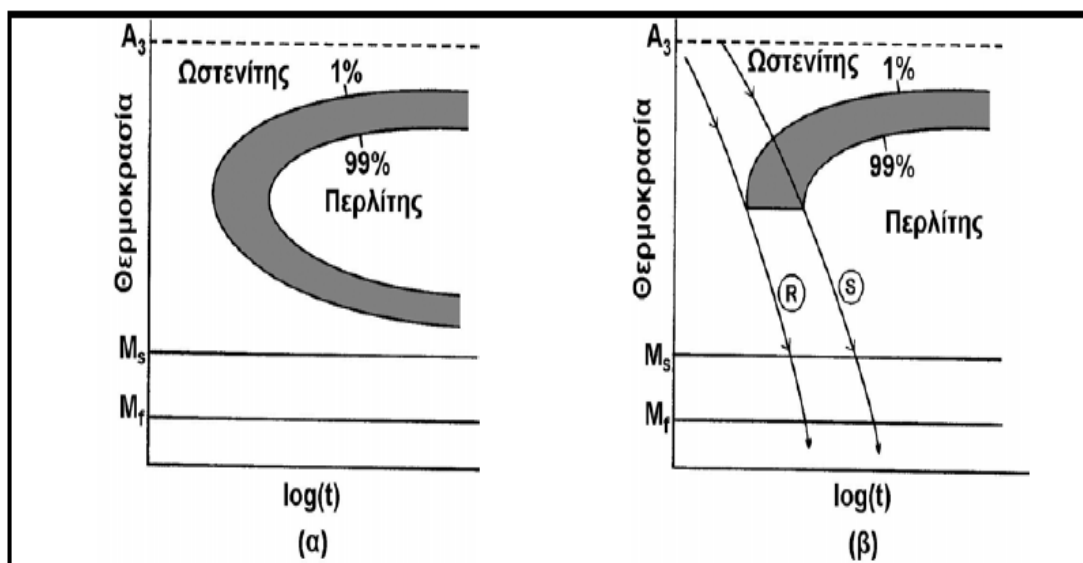
Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ένα διάγραμμα TTT ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού είναι έγκυρο μόνο για συγκεκριμένη σύσταση ενός κράματος και ότι για διαφορετικές συγκεντρώσεις τα διαγράμματα θα έχουν διαφορετική μορφή. Στην περίπτωση λοιπόν που ο χάλυβας ψύχεται με χαμηλούς ρυθμούς ψύξης, τα άτομα του άνθρακα, μέσω διαδικασιών διάχυσης έχουν το χρόνο να επανέλθουν στις φάσεις από τις οποίες προήλθε ο ωστενίτης δηλαδή ο χάλυβας επανέρχεται στη δομή φερρίτη – σεμεντίτη.

Τα διαγράμματα CCT είναι διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου, στα οποία αποτυπώνεται η έναρξη και η λήξη κατά τη συνεχή απόψυξη των χαλύβων. Είναι χρήσιμα για την επιλογή της ταχύτητας απόψυξης, σε μία θερμική κατεργασία, έτσι ώστε το μέταλλο να αποκτήσει την απαιτούμενη τελική δομή. Ανάλογα με τις απαιτούμενες τελικές ιδιότητες επιλέγεται μία κατάλληλη ταχύτητα απόψυξης, που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό συγκεκριμένης μικροδομής που αντιστοιχεί στις επιθυμητές ιδιότητες.

Στις διεργασίες σκλήρυνσης ο χάλυβας, ξεκινώντας από την ωστενιτική κατάσταση, ψύχεται με υψηλούς ρυθμούς απορρόφησης θερμότητας, μη αφήνοντας περιθώριο εξέλιξης στα φαινόμενα διάχυσης των ατόμων του άνθρακα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα άτομα του άνθρακα να παγιδευτούν στην κρυσταλλική δομή του και έτσι να προκύψει η δομή που ονομάζεται μαρτενσίτης.

Όπως είναι λοιπόν αντιληπτό, ο ρυθμός ψύξης του ωστενίτη παίζει σημαντικό ρόλο στην κρυσταλλική δομή που θα αναπτύξει ο χάλυβας κατά την πτώση της θερμοκρασίας του. Ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης ο ωστενίτης μπορεί να αποκτήσει μία ποικιλία κρυσταλλικών δομών όπως ο φερρίτης, ο σεμεντίτης, ο περλίτης, ο βαινίτης, και ο μαρτενσίτης.

Χαρακτηριστικά διαγράμματα TTT και CCT για ευτηκτοειδείς χάλυβες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 9.



Σχ. 9. (α) Διάγραμμα TTT, (β) Διάγραμμα CCT για ευτηκτοειδείς χάλυβες. (Σημειώσεις – ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ).

3.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Με τον όρο θερμικές κατεργασίες, εννοούμε την ελεγχόμενη θέρμανση και ψύξη του χάλυβα για την μεταβολή της μικροδομής του με στόχο την διαμόρφωση των ιδιοτήτων του.

Σχεδόν όλα τα χαλύβδινα μηχανολογικά στοιχεία (άξονες, οδοντώσεις, έδρανα κ.λ.π.) υπόκεινται σε κάποιου είδους θερμική κατεργασία, είτε ως ενδιάμεσο είτε ως τελικό στάδιο της παραγωγής.

Οι λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται οι θερμικές κατεργασίες είναι:

- Χαλάρωση των παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται από άλλες θερμικές ή μηχανικές κατεργασίες και συγκολλήσεις.
- Για να μαλακώσει το υλικό και να αποκτήσει πλαστικότητα για περαιτέρω μηχανική κατεργασία διαμόρφωσης.
- Για αύξηση της δυσθραυστότητας, ώστε να μπορεί το υλικό να αντέχει σε υψηλά μηχανικά φορτία.
- Για τροποποίηση της επιφάνειας με ή χωρίς προσθήκη κραματικών στοιχείων ώστε να βελτιωθεί η αντοχή στη φθορά, στην κόπωση και τη διάβρωση.

Με βάση τους παραπάνω λόγους γίνεται μία γενική ταξινόμηση των θερμικών κατεργασιών. Μία από αυτές τις κατηγορίες είναι και οι βασικές θερμικές κατεργασίες που αφορούν στην ισχυροποίηση των χαλύβων. Στους χάλυβες οι κατεργασίες ισχυροποίησης πραγματοποιούνται κυρίως για τον σχηματισμό μαρτενσίτη ή και μπαινίτη. Για τον σχηματισμό του μαρτενσίτη, ο χάλυβας θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία. Στη θερμοκρασία αυτή παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να υποστεί ωστενιτοποίηση. Στη συνέχεια ο χάλυβας αποψύχεται ταχύτατα σε κάποιο μέσο (αέρας, λάδι, ή νερό) και σχηματίζεται ο μαρτενσίτης ο οποίος είναι σκληρός αλλά παρουσιάζει χαμηλή ολκιμότητα. Η ανωτέρω διαδικασία της θέρμανσης του χάλυβα και εν συνεχεία της απότομης ψύξης καλείται **βαφή**.

Σκοπός της βαφής, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, είναι η σκλήρυνση και η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων καθώς και η αύξηση της ανθεκτικότητάς τους στη φθορά, με συνέπεια την επιμήκυνση του χρόνου ζωής των διαφόρων εξαρτημάτων. Έτσι ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 150-250 HV μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω 750 HV μετά τη διαδικασία της βαφής.

Η βαφή αποτελείται από το στάδιο της ωστενιτοποίησης και στη συνέχεια της ταχείας απόψυξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αρχικά το εξάρτημα θερμαίνεται έως την θερμοκρασία βαφής και παραμένει στη θερμοκρασία αυτή μέχρι να θερμανθεί σε όλο του το βάθος. Στη συνέχεια αποψύχεται με αποτέλεσμα ο χάλυβας να γίνεται σκληρός μεν αλλά και ψαθυρός και εύθραυστος

Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες κυμαίνεται μεταξύ 830-900⁰C, για τους υπερευτηκτοειδείς στους 750-780⁰C, ενώ σε χάλυβες που περιέχουν μεγάλα ποσοστά άλλων στοιχείων κραματοποίησης (π.χ. Cr, Mo, Ni κ.λ.π.) η θερμοκρασία ενδέχεται να υπερβεί τους 1000⁰C. Ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής του υλικού στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες, πράγμα που εξαρτάται από τη χημική σύσταση του χάλυβα, αλλά και από το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Η ταχύτητα απόψυξης είναι καθοριστική τόσο για το βαθμό σκλήρυνσης, όσο και για τις αστοχίες (ρωγματώσεις) που μπορούν να εμφανιστούν λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του υλικού, με άμεσο επακόλουθο τη μείωση της δυσθραυστότητας. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από την δραστικότητα του μέσου απόψυξης και αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά:

Αέρας < Λάδι < Νερό < Αλατόνερο

3.6 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Σκοπός των επιφανειακών κατεργασιών στα χαλύβδινα αντικείμενα είναι η αύξηση της αντοχής στα διάφορα φαινόμενα που επιδρούν στην επιφάνειά τους (φθορά, διάβρωση, οξειδωση κ.λ.π.). Μία από αυτές είναι και η θερμική κατεργασία, η οποία σκοπό έχει την αποτελεσματική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Χαρακτηριστικό της θερμικής κατεργασίας είναι η επιβολή συνδυασμένων κύκλων θέρμανσης – ψύξης, με μεταβολή μόνο της κρυσταλλικής δομής της επιφάνειας, χωρίς να αλλάζει η χημική της σύσταση. Επειδή η αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε διαρροή και εφελκυσμό συνοδεύεται από μία ελάττωση της τιμής της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας, είναι αναγκαίο να βρεθεί ένας αποδεκτός συνδυασμός μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων.

Η θερμική κατεργασία των διαφόρων εξαρτημάτων με σκοπό την αύξηση του χρόνου ζωής τους αποτελεί μία από τις πιο συχνές εφαρμογές των θερμικών κατεργασιών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου θερμικής κατεργασίας ενός εξαρτήματος στηρίζεται σε παραμέτρους, όπως η γεωμετρία του αντικειμένου, η κατανομή της μάζας του καθώς και η χημική σύσταση του χάλυβα, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο (περιεκτικότητα σε άνθρακα και υπόλοιπα κραματικά στοιχεία).

Το κύριο στοιχείο των καθαρά θερμικών κατεργασιών είναι η θέρμανση και η απόψυξη των χαλύβων, χωρίς άλλες συμπληρωματικές εργασίες.

Μία από τις κατηγορίες θερμικών κατεργασιών είναι και η βαφή κατά την οποία ο ωστενιτοποιημένος χάλυβας αποψύχεται ταχύτατα με αποτέλεσμα το

σχηματισμό μαρτενσίτη, σε αντίθεση με τις θερμικές κατεργασίες των ανοπτήσεων, στις οποίες η απόψυξη πραγματοποιείται με βραδύτερους ρυθμούς και καταλήγουν στο σχηματισμό των φάσεων ισορροπίας φερρίτη και σεμεντίτη και στη μικρογραφική δομή του περλίτη, όπως αυτές προβλέπονται από τα διαγράμματα ισορροπίας Fe-C.

Η επιφανειακή βαφή των χαλύβων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σκληρής και ανθεκτικής στη φθορά επιφάνειας, ενώ ο πυρήνας του αντικειμένου παραμένει συνεκτικός και όλκιμος. Εφαρμόζεται σε αντικείμενα και εξαρτήματα που η εξωτερική τους επιφάνεια πρέπει να είναι ανθεκτική στη φθορά, ενώ ταυτόχρονα υφίσταται κρουστικές και εναλλασσόμενες φορτίσεις.

Οι τεχνικές επιφανειακής βαφής συνίστανται στην ωστενιτοποίηση επιφανειακών μόνο στρωμάτων του υλικού, με τοπική θέρμανση σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, ακολουθούμενη από απόψυξη, ενώ ο πυρήνας του υλικού παραμένει ψυχρός. Με τη βαφή το επιφανειακό στρώμα του υλικού αποκτά μαρτενσιτική δομή, ενώ στη υπόλοιπη μάζα του υλικού δεν συμβαίνει κανένας μετασχηματισμός στη δομή του.

Οι σύγχρονες μέθοδοι θερμικών κατεργασιών με σκοπό την τοπική επιφανειακή σκλήρυνση είναι:

α) Η **φλογοβαφή** (επιφανειακή σκλήρυνση με φλόγιστρο). Εφαρμόζεται κυρίως στην επιφανειακή σκλήρυνση μεγάλων επιφανειών ή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας και μικρού αριθμού παραγωγής, καθώς επίσης και σε περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι συμφέρουσα η μέθοδος των επαγωγικών ρευμάτων. Η θέρμανση γίνεται με τη χρήση φλόγιστρων. Η φλόγα προέρχεται από την καύση με οξυγόνο ενός καυσίμου, συνήθως προπανίου ή ασετιλίνης. Η κατεργαζόμενη επιφάνεια, ταυτόχρονα με τη θέρμανση, ψύχεται αμέσως με ψεκασμό της με ψυκτικό υγρό.

β) Η **επαγωγική επιφανειακή σκλήρυνση**. Εφαρμόζεται κυρίως για την επιφανειακή σκλήρυνση εξαρτημάτων μικρών διαστάσεων, απλής σχετικά γεωμετρίας και για μεγάλη σειρά παραγωγής (άξονες κιβωτίου ταχυτήτων) . Το προς κατεργασία υλικό τοποθετείται ως πυρήνας στο εσωτερικό ενός επαγωγικού πηνίου που διαρρέεται από υψίσυχο ρεύμα. Το αναπτυσσόμενο

ισχυρό μαγνητικό πεδίο επάγει στο τεμάχιο επιφανειακά δινορεύματα Foucault, που μεταφέρουν θερμότητα joule και θερμαίνουν το μέταλλο. Το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων μειώνεται με αύξηση της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας του πηνίου.

γ)Βομβαρδισμός της επιφάνειας με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας. Κατά την τεχνική αυτή εφαρμόζονται δέσμες ηλεκτρονίων ή ιόντων και δέσμες Laser. Η υψηλής ενεργειακής πυκνότητας δέσμη εστιάζεται μέσω ειδικών διατάξεων εστίασης σε πολύ μικρές επιφάνειες ($>100 \mu\text{m}^2$), ενώ επιτυγχάνεται η δυνατότητα τοπικής κατεργασίας μικρού πάχους επιφανειακών στρωμάτων. Η ψύξη της επιφάνειας είναι ταχεία και εξασφαλίζεται με αγωγή της θερμότητας μέσα από τον κύριο όγκο του αντικειμένου (αυτοβαφή της επιφάνειας). Η δέσμη ηλεκτρονίων και ιόντων εκπέμπεται υπό κενό και απορροφάται εύκολα από τη μεταλλική επιφάνεια. Η δέσμη Laser δεν απαιτεί εφαρμογή κενού και αντανακλάται εύκολα από ανοιχτόχρωμες και λείες επιφάνειες. Για αύξηση της απορροφητικής ικανότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας επιβάλλεται αμβολή της ή επικάλυψή της με γραφίτη πριν από την εφαρμογή της δέσμης Laser.

δ)Σκλήρυνση με Λείανση: Παραγωγή θερμότητας με λείανση του υλικού και στη συνέχεια απορρόφηση της θερμότητας και ψύξη του υλικού από το ίδιο το σώμα του. Η μέθοδος αυτή θα παρουσιαστεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΛΕΙΑΝΣΗ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η θερμική κατεργασία χαλύβων με στόχο την επιφανειακή τους σκλήρυνση είναι ένα ερευνητικό αντικείμενο που έχει σχεδόν εξαντληθεί. Όμως η τοπική επιφανειακή σκλήρυνση με σύγχρονες μεθόδους, είναι διεργασίες που βρίσκονται υπό συνεχή έρευνα. Όλες αυτές οι διεργασίες συγγενεύουν μεταξύ τους καθώς το μόνο σημείο διαφοροποίησης είναι ο τρόπος παραγωγής της θερμότητας. Εφόσον η θερμότητα παραχθεί και εισαχθεί στο υλικό τα υπόλοιπα μεταλλουργικά φαινόμενα είναι τα ίδια σε κάθε περίπτωση.

Σχετικά με τις αλλαγές φάσης στις οποίες υπόκειται ο χάλυβας σε συνθήκες απότομης θέρμανσης και ακολούθως απότομης ψύξης μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα από τις διεργασίες της τοπικής επιφανειακής σκλήρυνσης με σύγχρονες μεθόδους θερμικής κατεργασίας.

Η θερμική κατεργασία ενός μετάλλου μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτά στάδια. Αρχικά με αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται η δημιουργία ωστενιτικής φάσης και στη συνέχεια με ταχεία ψύξη, ο μετασχηματισμός αυτής της φάσης σε μαρτενσίτη με συνέπεια να αυξάνεται η σκληρότητα του μετάλλου.

Συγκεντρωτικά τα παραπάνω φαινόμενα αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως «κάψιμο λείανσης» (grinding burn). Στις διάφορες εργασίες, οι συγγραφείς, ασχολούνται με τη δημιουργία των μαρτενσιτικών σχηματισμών και με τη φύση των μετασχηματισμών που οδηγούν σε αυτές τις μορφές. Σημασία δίνεται στην πολύ μικρή χρονική διάρκεια έκθεσης του υλικού σε αυτή τη θερμοκρασία πριν από την απότομη ψύξη του.

4.1.1 ΠΡΩΤΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Αρκετές αναφορές έχουν γίνει για την διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση. Υπάρχουν όμως αρκετά περιθώρια θεωρητικής προσέγγισης και ανάλυσης της διεργασίας αυτής.

Η διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση παρουσιάστηκε από τους Brinksmeier και Brockhoff, πριν από πολλά χρόνια (Brinksmeier και Brockhoff, 1996). Πρόκειται ουσιαστικά για διεργασία λείανσης στην οποία χρησιμοποιείται μεγάλο βάθος κοπής και σχετικά χαμηλή ταχύτητα πρόωσης του υπό κατεργασία εξαρτήματος. Η διεργασία χρησιμοποίησε τη θερμότητα που αναπτύχθηκε λόγω τριβής μεταξύ λειαντικού τροχού και κατεργαζόμενου κομματιού για τη δημιουργία θερμοκρασιακού πεδίου στην επιφάνειά του, κατάλληλου να οδηγήσει στην επιφανειακή του σκλήρυνση.

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία είχαν αρκετό όγκο έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η διάχυση της θερμότητας από την ίδια τη μάζα του υπό κατεργασία εξαρτήματος. Με τη νέα αυτή διεργασία επιτυγχάνεται επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού με μικρότερο κόστος και σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Το κύριο πλεονέκτημα της διεργασίας αυτής, που παρουσιάστηκε στη εργασία αυτή, είναι το γεγονός ότι η προτεινόμενη αυτή μέθοδος να μπορεί να εφαρμοστεί στη γραμμή παραγωγής με ελάχιστες μετατροπές του υπάρχοντος εξοπλισμού και ταυτόχρονα να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τα ενδιάμεσα στάδια που είναι απαραίτητα για την ολοκλήρωση του κύκλου παραγωγής.

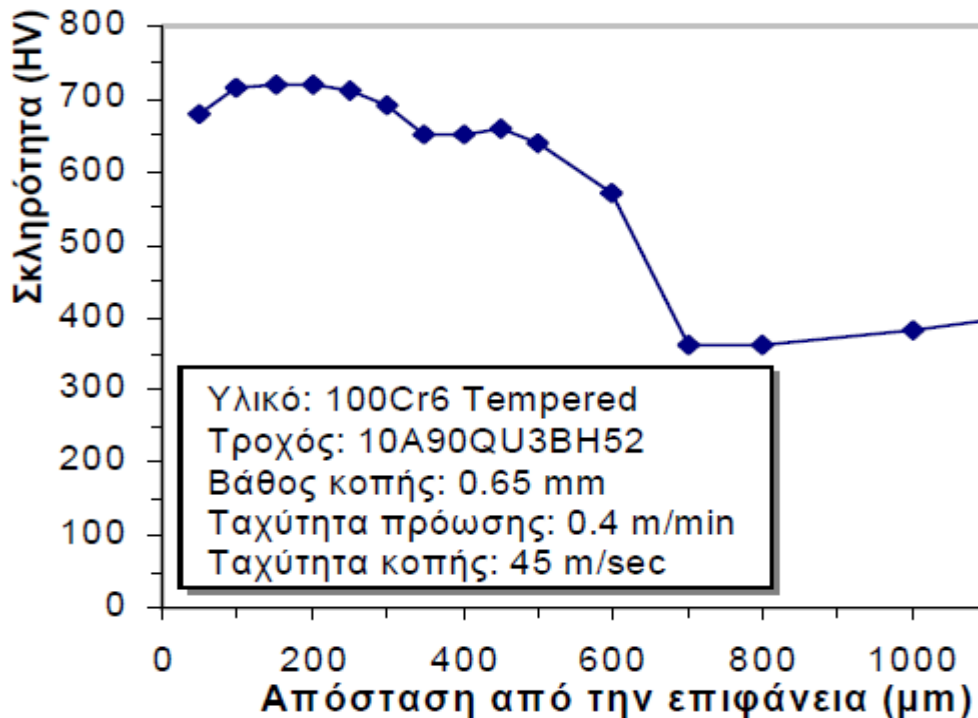
4.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση βασίζεται στη σωστή επιλογή των παραμέτρων της διεργασίας έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για τη θερμική κατεργασία του υπό επεξεργασία εξαρτήματος.

Οι κύριες παράμετροι της διεργασίας είναι η ταχύτητα πρόωσης του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος, το βάθος κοπής και η ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού τροχού. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι το αποτέλεσμα της διεργασίας εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του λειαντικού τροχού, την παρουσία του ψυκτικού υγρού και το υλικό του υπό κατεργασία εξαρτήματος. Το αποτέλεσμα της διεργασίας συμπεριλαμβάνει την σκληρότητα που επιτυγχάνεται μέσω της διεργασίας, το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης και την κατανομή των υπομενουσών τάσεων.

Μία περιληπτική πειραματική μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας στο βάθος σκλήρυνσης παρουσιάστηκε από τον Brockhoff (Brockhoff, 1999). Στη συγκεκριμένη εργασία αποδείχτηκε ότι το βάθος σκλήρυνσης μπορεί να φτάσει τα 1,8 mm για την περίπτωση της ξηρής διεργασίας, ενώ πάντα συνοδεύεται από θλιπτικές υπομένουσες τάσεις στην επιφάνεια της επεξεργασμένης ζώνης.

Η επίδραση του βάθους κοπής, της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής του λειαντικού τροχού μελετήθηκε επίσης πειραματικά για την περίπτωση της ξηρής σκλήρυνσης μέσω λείανσης και στην εργασία των Chryssolouris et al (Σαλωνίτης 2006).



Σχ.10. Σκληρότητα σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

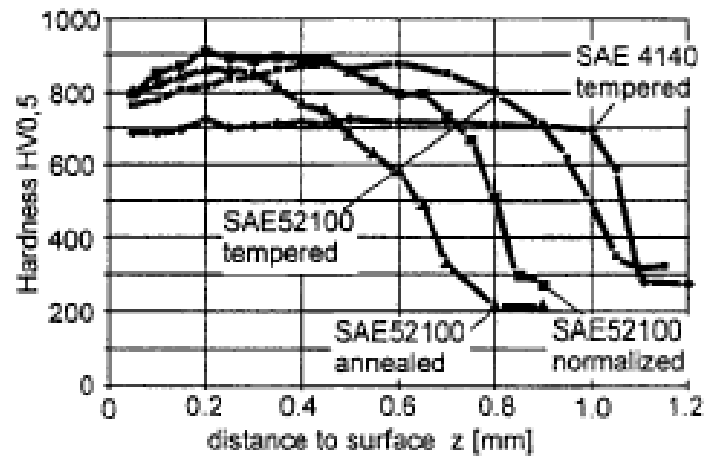
Η μικροδομή και η κατανομή των ατόμων του άνθρακα στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη που δημιουργείται από την διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση μελετήθηκε στην εργασία των Zaroudi & Zhang (2002) καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μικροδομή που προκύπτει από την διεργασία αυτή, εκτός της αυξημένης σκληρότητας παρουσιάζει και αυξημένη αντοχή σε επιφανειακή φθορά και σε κόπωση.

4.1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ

Η περιεκτικότητα ενός μετάλλου σε άνθρακα και σε δευτερεύοντα κράματα επηρεάζει σημαντικά τη δυνατότητα αυτού του υλικού να υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση με την μέθοδο της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης. Η σημασία της σύστασης του μετάλλου στους μηχανισμούς σκλήρυνσης έχει μελετηθεί και για άλλες επιφανειακές μεθόδους θερμικής κατεργασίας (όπως π.χ. σκλήρυνση με επαγωγή, με φλόγα, με δέσμη laser). Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για την περίπτωση της σκλήρυνσης μέσω λείανσης.

Πειραματικά αποδείχτηκε (Brockoff, 1999 & Chryssolouris *et al.*, 2001) ότι για την περίπτωση της σκλήρυνσης μέσω λείανσης, τα κομμάτια τα οποία έχουν

υποστεί ήδη κάποια θερμική κατεργασία παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκολία στην επιφανειακή τους σκλήρυνση (Σαλωνίτης 2006).

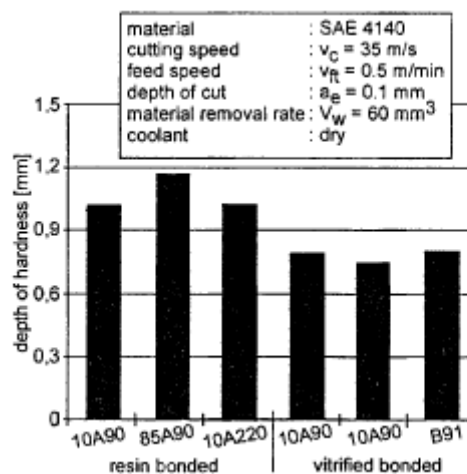


Σχ.11 Επίδραση υλικού τεμαχίου στο βάθος σκλήρυνσης (Brockhoff, 1999).

4.1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΑΝΤΙΚΟΥ ΤΡΟΧΟΥ

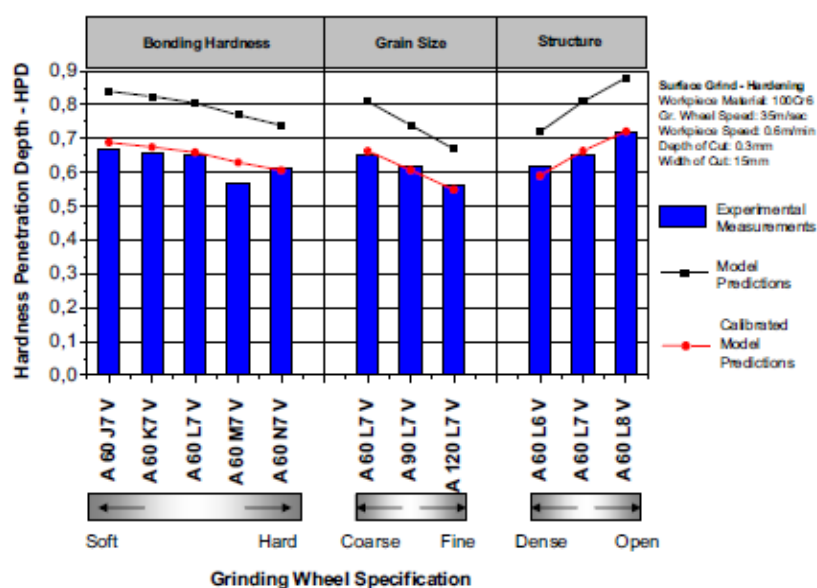
Στις πρώτες μελέτες για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στη διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης δεν είχε μελετηθεί εκτενώς η επίδραση του λειαντικού τροχού στη διεργασία αυτή. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί η απαραίτητη βαρύτητα στη μελέτη της επίδρασης του λειαντικού τροχού (σύσταση, υλικό) στην επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού.

Στην συνοπτική μελέτη του Brockhoff (1999) και στην αντίστοιχη πειραματική εργασία των Chryssolouris *et al.* (2001) παρατηρήθηκε πειραματικά ότι οι συμβατικοί λειαντικοί τροχοί κορουνδίου που έχουν ρητινικό υλικό ως συνδετικό είναι ιδανικότεροι από τους αντίστοιχους λειαντικούς τροχούς με κεραμικό υλικό λόγω της μικρότερης ψαθυρότητας του συνδετικού υλικού.



Σχ. 12 Επίδραση παραμέτρων λειαντικού τροχού στο βάθος σκλήρυνσης (Brockhoff, 1999).

Οι Chryssolouris και Salonitis (2004) και οι Salonitis et al. (2008) μελέτησαν την επίδραση της σύστασης του λειαντικού τροχού στην θερμότητα που αναπτύσσεται μεταξύ του τροχού και του κομματιού. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του κόκκου και το πορώδες του τροχού. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 13, τροχοί με μαλακότερο συνδετικό υλικό, χονδρόκοκοι (coarse – grained) και ανοικτής δομής παρουσιάζουν μεγαλύτερα βάθη σκλήρυνσης.



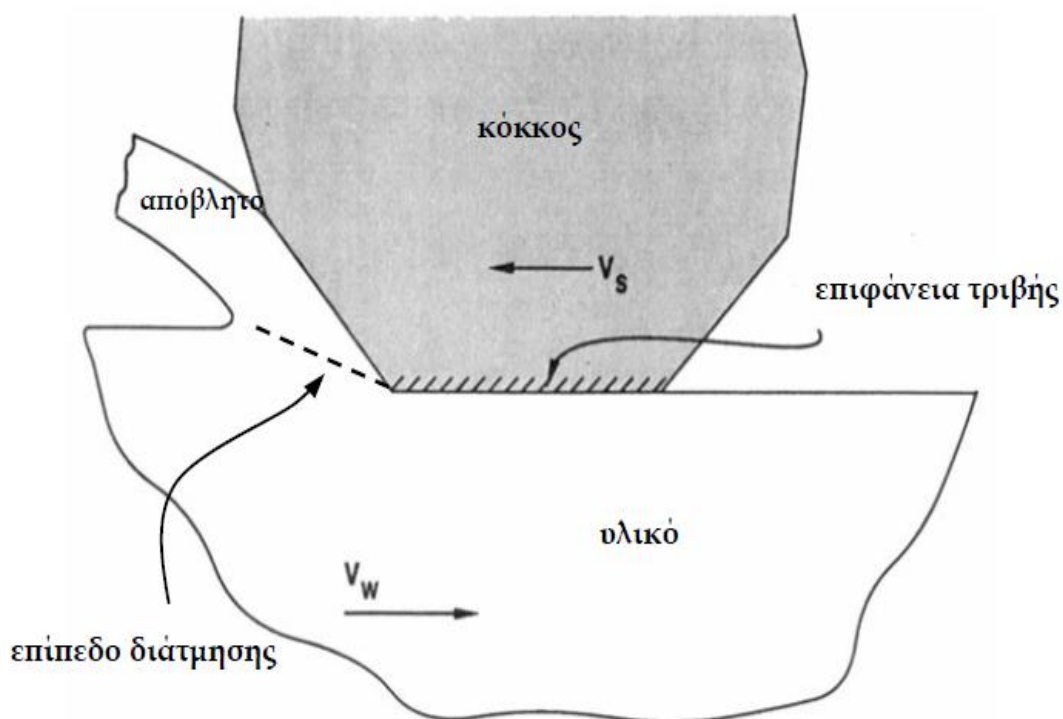
Σχ. 13 Επίδραση παραμέτρων λειαντικού τροχού στο βάθος σκλήρυνσης (Salonitis 2008).

4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης είναι μία διεργασία λείανσης στην οποία οι παράμετροι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να παράγεται σημαντική ποσότητα θερμότητας στην περιοχή της κοπής. Η θερμότητα αυτή θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε το υλικό να υποστεί θερμική κατεργασία για να αυξηθεί η σκληρότητά του.

Στις συνήθεις εργασίες λείανσης, ο στόχος είναι να μειωθεί κατά το δυνατόν η παραγόμενη θερμότητα και το ποσό αυτής που εισέρχεται στο υλικό ώστε να αποφευχθούν τυχόν βλάβες της κρυσταλλικής δομής του υλικού, από υπερβολική έκθεση σε θερμικά φορτία. Αντίθετα στη διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης επιδιώκεται η δημιουργία και η διάχυση της θερμότητας στο υλικό με σκοπό τη θερμική κατεργασία.

Για να μελετήσει κανείς το φαινόμενο της δημιουργίας θερμότητας κατά τη λείανση, πρέπει να εστιάσει στους μηχανισμούς που την παράγουν.



Σχ. 14. Μηχανισμός αφαίρεσης υλικού κατά τη λείανση (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

Η παραγόμενη λοιπόν θερμότητα αποδίδεται σε τρεις μηχανισμούς (Σχ.14).

-Στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των λειαντικών κόκκων και του υλικού του κατεργαζόμενου εξαρτήματος.

-Στην πλαστική παραμόρφωση, στο επίπεδο διάτμησης, κατά τη διάρκεια απομάκρυνσης του αποβλήτου.

- Στην πλαστική παραμόρφωση του υλικού του εξαρτήματος χωρίς αφαίρεση υλικού.

Ο κύριος μηχανισμός παραγωγής θερμότητας είναι η τριβή στην διεπιφάνεια κόκκου-εξαρτήματος.

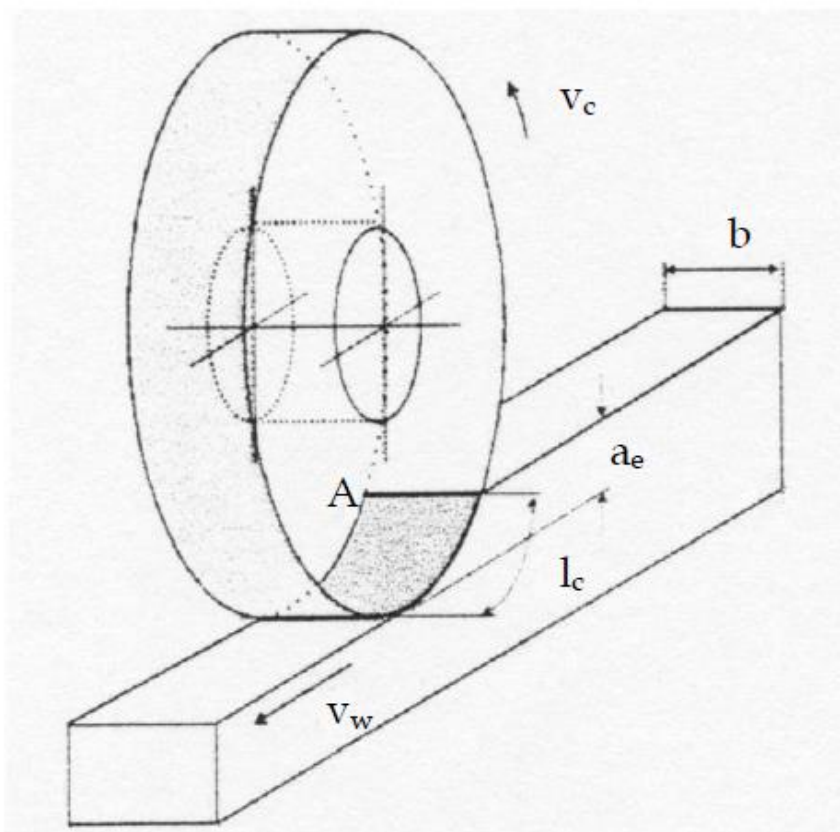
Η Lavine (1991,2000) μελέτησε την παραγωγή θερμότητας εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης στο επίπεδο διάτμησης και κατέληξε πως το ποσό θερμότητας που παράγεται είναι αμελητέο για την περίπτωση λείανσης με λειαντικούς τροχούς με μεγάλους και αμβλείς κόκκους, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης.

Ο Malkin (1989) αντίστοιχα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για τη λείανση με μεγάλο ρυθμό αφαίρεσης υλικού, όπως είναι η περίπτωση της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης, η ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη θερμότητα που παράγεται με την τριβή.

Για το λόγο αυτό θεωρούμε πως στην διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης, η παραγωγή θερμότητας στην περιοχή της κοπής οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στα φαινόμενα τριβής που εμφανίζονται μεταξύ του υλικού και της επιφάνειας τριβής του κάθε κόκκου.

Στο Σχ. 15 φαίνεται η γεωμετρία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης και οι βασικές διαστάσεις. Η συγκεκριμένη διεργασία θεωρείται ότι έχει βάθος κοπής a_e , πρόωση V_w , και ταχύτητα περιστροφής λειαντικού τροχού V_c . Το πλάτος κοπής είναι b , το μήκος του τόξου εμπλοκής τροχού και επεξεργαζόμενου εξαρτήματος είναι l_c και η επιφάνεια επαφής $A=b \cdot l_c$.

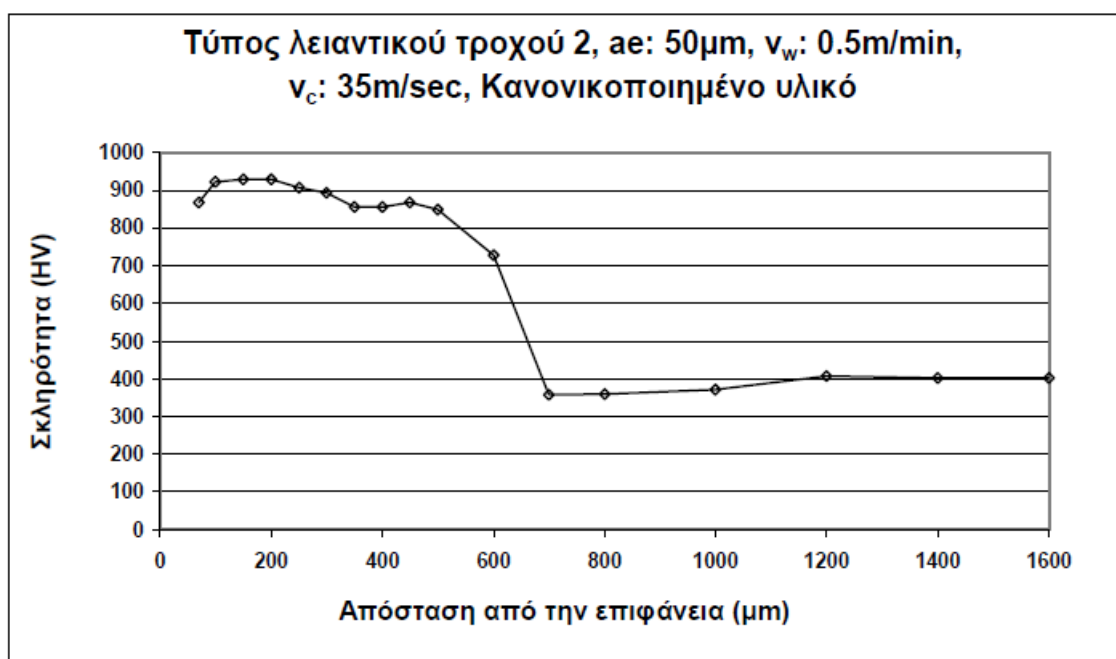
Η ποσότητα Q που παράγεται στην περιοχή της κοπής μοιράζεται στα διάφορα σώματα που συμμετέχουν στη διεργασία της κοπής, με τρόπο που εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού και του τροχού αλλά και από την ταχύτητα κοπής και την πρόωση.



Σχ. 15. Βασικές διαστάσεις της γεωμετρίας της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

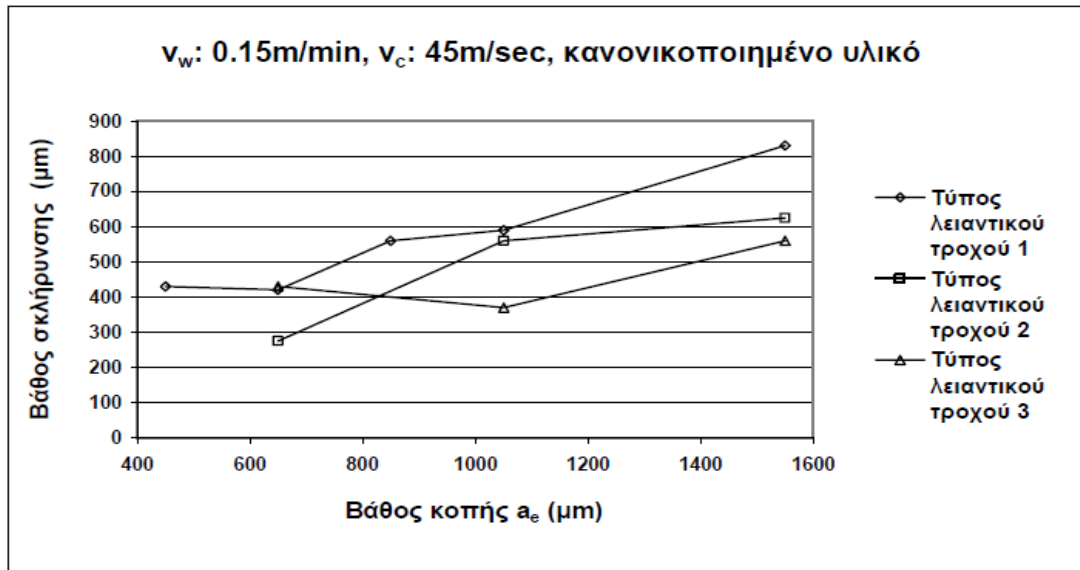
Ο Τσίρμπας (2002) μελετώντας την επίδραση των κυριότερων παραμέτρων στην επιφανειακή σκληρότητα και στο βάθος σκλήρυνσης δοκιμίων χάλυβα 100Cr6 κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

α) Με τη διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης είναι δυνατή η σκλήρυνση του επιφανειακού στρώματος του υλικού μέχρι τη μέγιστη δυνατή τιμή σκληρότητας. Παρατηρούμε στο Σχήμα 16, ότι μετά την σκληρυμένη ζώνη υπάρχει μία απότομη μείωση της σκληρότητας που καταλήγει στη σκληρότητα που είχε το υλικό πριν την κατεργασία. Το βάθος σκλήρυνσης ορίζεται ως το βάθος στο οποίο η σκληρότητα ισούται με το 80% της μέγιστης επιτευχθείσας.



Σχ.16. Σκληρότητα σε συνάρτηση με το βάθος (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

β) Λαμβάνοντας υπόψη ότι η λειτουργία του μηχανισμού σκλήρυνσης εξαρτάται κυρίως από το ποσό θερμότητας που εισέρχεται στο υλικό και κατά συνέπεια από τη συνολική θερμότητα που παράγεται στην περιοχή της λείανσης, θα ήταν αναμενόμενο ότι οι υψηλοί ρυθμοί αφαίρεσης υλικού θα προκαλούσαν μεγαλύτερο βάθος σκλήρυνσης λόγω του μεγαλύτερου ποσού ενέργειας που παράγεται και διαχέεται. Στο Σχήμα 17 επιβεβαιώνεται ότι αυξανόμενου του βάθους κοπής, το βάθος σκλήρυνσης αυξάνει σημαντικά.



Σχ.17.Βάθος σκλήρυνσης συναρτήσει του βάθους κοπής (ΤΣΙΡΜΠΑΣ 2002).

γ)Θα ήταν επίσης αναμενόμενο ότι με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης θα υπήρχε αύξηση του βάθους σκλήρυνσης λόγω του αυξανόμενου ρυθμού αφαίρεσης υλικού, παρόλα αυτά παρατηρείται αντίθετη συμπεριφορά. Η ερμηνεία αυτής της παρατήρησης είναι ότι καθώς η ταχύτητα πρόωσης αυξάνει, αυξάνεται και η παραγωγή θερμότητας. Ταυτόχρονα όμως η μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης αντιπροσωπεύει και μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα μεταξύ της πηγής θερμότητας και του εξαρτήματος. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει αρκετός χρόνος ώστε η αυξημένη παραγόμενη θερμότητα να εισέλθει στο υλικό και να προκαλέσει την ωστενιτοποίηση και κατά συνέπεια τη σκλήρυνση του υλικού.

Οι κανόνες στους οποίους κατέληξε ο Τσίρμπας είναι οι παρακάτω:

- Μεγάλα βάθη κοπής προκαλούν μεγάλα βάθη σκλήρυνσης.
- Οι τιμές της ταχύτητας πρόωσης θα πρέπει να διατηρούνται χαμηλές (περίπου $0,2 \text{ m/min}$) με σκοπό την μεγιστοποίηση της σκλήρυνσης και τον περιορισμό των δυνάμεων κοπής σε χαμηλά επίπεδα.
- Οι λειαντικοί τροχοί με κεραμικό συνδετικό υλικό είναι ακατάλληλοι για διεργασίες Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης. Προτιμώνται οι τροχοί με ρητινικό συνδετικό υλικό, οι οποίοι είναι πιο ανθεκτικοί στα φορτία που παρουσιάζονται.

Ο Σαλωνίτης (2006) μελετώντας τον επιμερισμό της θερμότητας που παράγεται στην διεπιφάνεια του λειαντικού τροχού και του εξαρτήματος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτή μοιράζεται κυρίως μεταξύ του εξαρτήματος και του λειαντικού τροχού, και μόνο ένα ποσοστό 10% μεταφέρεται από τα απόβλητα της λείανσης.

Μελετώντας λοιπόν τη μεταφορά θερμότητας στο υπό κατεργασία υλικό παρατήρησε ότι το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης αυξάνεται με την αύξηση του βάθους κοπής, καθώς επίσης και με την μείωση της ταχύτητας πρόωσης. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός η αύξηση του βάθους κοπής αυξάνει το ποσοστό αφαίρεσης υλικού και κατά συνέπεια το ποσοστό παραγωγής θερμότητας και αφετέρου η μείωση της ταχύτητας επιτρέπει περισσότερη θερμότητα να διαχυθεί στο υλικό.

Η επίτευξη του μέγιστου βάθους διείσδυσης της σκλήρυνσης εξαρτάται από το εάν η κρίσιμη ροή θερμότητας δημιουργείται για το συγκεκριμένο σετ δηλαδή τη μείωση της ταχύτητας πρόωσης και αύξηση του βάθους κοπής.

Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η χρήση λειαντικών τροχών με μικρότερη σκληρότητα έχει ως αποτέλεσμα μία μικρή αύξηση του βάθους διείσδυσης. Επίσης η χρήση λειαντικών τροχών με μικρότερους κόκκους μειώνει το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης, το ίδιο συμβαίνει και με τη χρήση πυκνότερων λειαντικών τροχών.

Συμπέρανε επίσης ότι υπάρχει γραμμική συνάρτηση η οποία συνδέει τη μέγιστη θερμοκρασία, που παρατηρείται στη διεπιφάνεια του τεμαχίου με τον λειαντικό τροχό, και το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης. (Σαλωνίτης 2006)

4.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

4.3.1 Γενικά περί σκλήρυνσης.

Η βαφή χαλύβδινων εξαρτημάτων, όπως ορίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, είναι μία διεργασία θερμικής σκλήρυνσης που σκοπό έχει τη βελτίωση της αντοχής του εξαρτήματος στα δυναμικά φορτία και στην τριβή.

Στην απλούστερη μορφή της, η διεργασία αυτή συνίσταται στη θέρμανση ολόκληρου του υλικού πάνω από τη θερμοκρασία ωστενοποίησης σε κάποιο

κλίβανο ή σε φλόγα και ακολούθως στην απότομη ψύξη του με κάποιο κατάλληλο μέσο (συνήθως νερό ή λάδι).

Στη σύγχρονη βιομηχανική εφαρμογή, η μέθοδος αυτή της ολοκληρωτικής σκλήρυνσης είναι πολλές φορές ασύμφορη, καθώς για τις περισσότερες εφαρμογές δεν είναι απαραίτητη η σκλήρυνση του εξαρτήματος σε όλα τα σημεία και σε όλο το βάθος. Η επιφανειακή ή τοπική σκλήρυνση εφαρμόζεται σήμερα ευρύτατα στα συστήματα παραγωγής χαλύβδινων εξαρτημάτων υψηλής αντοχής και ακρίβειας, λόγω της οικονομίας χρόνου, της ευελιξίας που παρέχουν αλλά και γιατί αποφεύγονται παραμορφώσεις που πιθανόν να προέκυπταν από τη θερμική κατεργασία του όλου εξαρτήματος.

Οι συνήθειες μέθοδοι επιφανειακής ή/και τοπικής σκλήρυνσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Με αλλαγή και χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασης του χάλυβα.

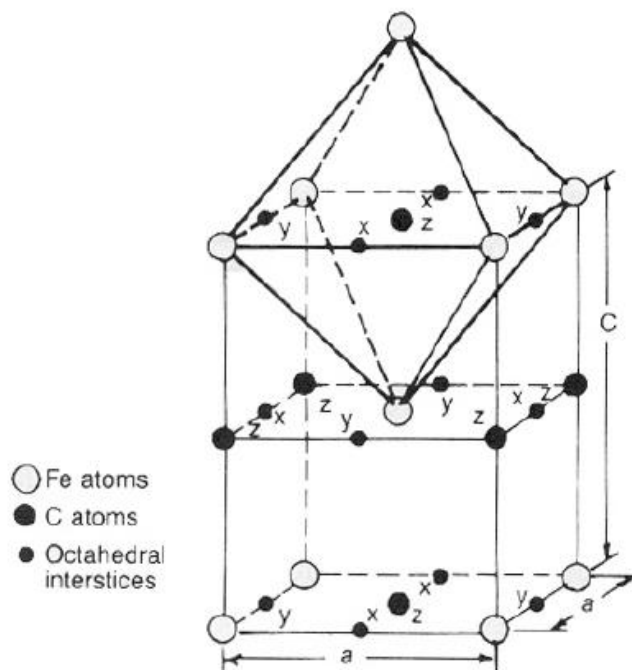
Παραδείγματα διαδικασιών επιφανειακής σκλήρυνσης με αλλαγή της σύστασης του χάλυβα είναι η ενανθράκωση και η εναζώτωση. Η σκλήρυνση των εξαρτημάτων χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασης επιτυγχάνεται με μηχανισμούς τοπικής και έντονης θέρμανσης της επιφάνειας και ακόλουθης ψύξης λόγω της απορρόφησης της θερμότητας από την υπόλοιπη μάζα του εξαρτήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η θέρμανση γίνεται είτε με συμβατικές μεθόδους, π.χ. φλόγιστρο (flame hardening) είτε με σύγχρονες μεθόδους, όπως η μέθοδος εξ επαγωγής (induction hardening), η μέθοδος με δέσμη laser (laser hardening) και η μέθοδος με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam hardening). Στις μεθόδους αυτές συμπεριλαμβάνεται και η Σκλήρυνση δια Λειάνσεως, καθώς η παραγόμενη θερμότητα στην περιοχή της κοπής αποτελεί την τοπική και έντονη πηγή θερμότητας που προκαλεί τα φαινόμενα σχηματισμού μαρτενσίτη

4.3.2 Μηχανισμός σκλήρυνσης.

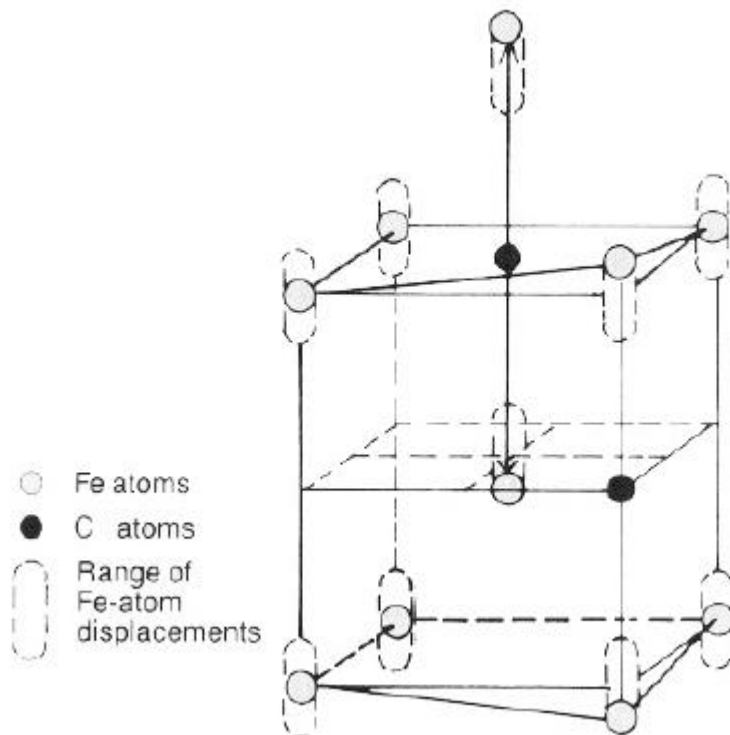
Η παρουσία μαρτενσίτη στη μικροδομή ενός χάλυβα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητάς του.

Ο μαρτενσίτης αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη κρυσταλλική δομή στην οποία τα άτομα του άνθρακα παγιδεύονται σε μια οκταεδρική δομή (Σχ. 18).

Ο κύριος λόγος που η μαρτενιτική δομή χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και σκληρότητα είναι ότι τα παγιδευμένα άτομα άνθρακα δημιουργούν μια σχετική μετατόπιση στα άτομα σιδήρου στη χωροκεντρωμένη τετραγωνική δομή του κρυσταλλικού πλέγματος του μαρτενσίτη (Σχ. 19). Αυτή η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος καθιστά δύσκολη τη μετατόπιση των καταναγκασμών, αυξάνοντας έτσι την αντοχή και τη σκληρότητα του χάλυβα.



Σχ.18.Χωροκεντρωμένη κρυσταλλική δομή μαρτενσίτη (ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ 2006).



Σχ.19. Μετατοπίσεις των ατόμων σιδήρου λόγω της παρουσίας των ατόμων άνθρακα στο μαρτενσιτικό κρυσταλλικό πλέγμα του χάλυβα (ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ 2006).

Ο μαρτενσίτης προέρχεται από τον ωστενίτη. Όταν λοιπόν ένας χάλυβας θερμανθεί πάνω από το όριο ωστενοποίησης και βρεθεί στην ωστενιτική του κατάσταση, τα άτομα του άνθρακα έχουν αρκετή κινητική ενέργεια ώστε να κινούνται ελεύθερα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Στην περίπτωση που ο χάλυβας ψυχθεί με χαμηλούς ρυθμούς ψύξης, τα άτομα του άνθρακα, μέσω διαδικασιών διάχυσης, έχουν το χρόνο να επανέλθουν στις φάσεις από τις οποίες προήλθε ο ωστενίτης, δηλαδή ο χάλυβας επανέρχεται στη δομή φερρίτη-σεμενίτη. Στις διεργασίες σκλήρυνσης όμως, ο χάλυβας, ξεκινώντας από την ωστενιτική του κατάσταση, ψύχεται με υψηλούς ρυθμούς απορρόφησης θερμότητας, μη αφήνοντας περιθώριο εξέλιξης στα φαινόμενα διάχυσης των ατόμων του άνθρακα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα άτομα του άνθρακα να παγιδευτούν στην κρυσταλλική δομή που απεικονίζεται στο σχήμα 19 και έτσι να προκύψει η δομή που ονομάζεται μαρτενσίτης.

Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ο ρυθμός ψύξης του ωστενίτη είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την διαμόρφωση της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα κατά την πτώση της θερμοκρασίας του.

Ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης, ο ωστενίτης μπορεί να αποκτήσει μια ποικιλία κρυσταλλικών δομών, όπως τον φερρίτη, τον σεμεντίτη, τον περλίτη, βαϊνίτη και μαρτενσίτη.

4.4 ΑΛΛΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για την Σκλήρυνση μέσω Λείανσης περιλαμβάνει περιγραφές θεωρητικών και πειραματικών εργασιών. Αυτές διαχωρίζονται, με βάση τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο κάθε ερευνητής, τη μεθοδολογία της δημιουργίας και του επιμερισμού της θερμότητας, την στοχοποίηση και τα αποτελέσματα της εργασίας. Στον πίνακα 5 που ακολουθεί στο τέλος της υποενότητας συνοψίζονται οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούν οι διάφοροι ερευνητές.

α) Οι E.Brinksmeier, T. Brockhoff (1996), από παρατηρήσεις παλαιότερων ερευνητών προσπάθησαν να εξάγουν συμπεράσματα για το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η θερμότητα που παράγεται από τη διαδικασία της λείανσης ως μία μέθοδος θερμικής επεξεργασίας για την επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού.

Στις παρατηρήσεις επισημαίνεται η μη ύπαρξη παροχής ψυκτικού υγρού και η σταθερή ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού τροχού $V_c=30\text{m/s}$.

Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμότητα που παράγεται κατά τη λείανση της επιφάνειας του υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία νέα θερμική επεξεργασία για την αύξηση της σκληρότητας στην επιφάνεια αυτού του υλικού. Επίσης ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, υπό συνθήκες μέτριας φόρτισης, σε βιομηχανικές εφαρμογές.

β) Μία μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της συγκεκριμένης διεργασίας, στο βάθος σκλήρυνσης παρουσιάστηκε από τον T. Brockhoff (1999). Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε σαν υλικό χάλυβας (SAE 4140), και τα πειράματα έγιναν χωρίς τη παροχή ψυκτικού υγρού. Η ταχύτητα του λειαντικού τροχού V_c κυμάνθηκε από 20 έως 100 m/s. Το εύρος του βάθους

κοπής των δοκιμίων στα οποία μετρήθηκε η σκλήρυνση του υλικού ήταν από 0,005 έως 1 mm και η ταχύτητα πρόωσης V_w από 0,01 έως 5 m/min.

Με το τέλος των πειραματικών διαδικασιών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του βάθους κοπής οδηγεί σε παραγωγή μεγαλύτερου ποσού θερμικής ενέργειας η οποία εισέρχεται στο υλικό, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί υψηλότερη σκληρότητα σε μεγαλύτερο βάθος.

γ) Ο Τσίρμπας (2002) διερεύνησε τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά τη διεργασία της Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης. Χρησιμοποίησε δοκίμια από χάλυβα 100Cr6 κυλινδρικής μορφής μήκους 60 mm, και διαμέτρου 27mm.

Χρησιμοποίησε πέντε διαφορετικούς τύπους λειαντικών τροχών, τόσο με ρητινικό συνδετικό υλικό όσο και με κεραμικό συνδετικό υλικό, σταθερής διαμέτρου 400 mm.

Η ταχύτητα κοπής V_c του λειαντικού τροχού κυμάνθηκε από 30 έως 45 m/s. Από τις άλλες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν, το βάθος κοπής a_e επιλέχθηκε από 250 έως 650 μm και το εύρος τιμών της ταχύτητας πρόωσης V_w ήταν από 0,15 έως 1,75 m/min. Κατά την πειραματική διαδικασία δεν υπήρχε παροχή ψυκτικού υγρού.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κυλινδρική λειαντική μηχανή. Κατά τη διαδικασία της κοπής, η θέρμανση και εν συνεχεία η ψύξη του υλικού οδήγησε στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και στην επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού.

Ο ερευνητής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μεγάλα βάθη κοπής σκληραίνουν το υλικό σε μεγαλύτερο βάθος, όπως επίσης και οι χαμηλές ταχύτητες πρόωσης του υλικού μεγιστοποιούν τη σκλήρυνση.

δ) Οι Chryssolouris et al (2005) διερεύνησαν με αναλυτικό τρόπο την επίδραση της αλλαγής της πρόωσης και του βάθους κοπής του υλικού στο βάθος σκλήρυνσης. Οι λειαντικοί τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν σταθερή ταχύτητα $V_c=45$ m/sec και διάμετρο $D=400\text{mm}$. Το εύρος των ταχυτήτων πρόωσης V_w κυμάνθηκε από 0,15 έως 1 m/min και τα βάθη κοπής a_e από 0,45 έως 1,55 mm.

Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι για μεγαλύτερα βάθη κοπής αυξάνεται η παραγόμενη θερμότητα και κατά συνέπεια το βάθος σκλήρυνσης του υλικού. Επιπλέον αύξηση της ταχύτητας πρόωσης δημιουργεί μία μικρή μείωση στο βάθος σκλήρυνσης.

ε) Ο Σαλωνίτης (2006) ασχολήθηκε με την ανάπτυξη μεθοδολογίας προσδιορισμού της κατανομής της σκληρότητας και του βάθους διείσδυσης της σκλήρυνσης που προκαλείται σε ένα εξάρτημα το οποίο έχει υποστεί Σκλήρυνση με Λείανση.

Χρησιμοποίησε χάλυβα εδράνων 100Cr6, σε δοκίμια ορθογωνικής διατομής (150*80*10mm) με εννέα διαφορετικούς λειαντικούς τροχούς, σταθερής διαμέτρου $D=400\text{mm}$. Η ταχύτητα περιστροφής V_c του λειαντικού τροχού ήταν σταθερή και ίση με 100 m/sec , ενώ χρησιμοποίησε τρεις διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης $V_w = 0,3/0,6/0,9\text{ m/min}$. Το εύρος του βάθους κοπής a_e κυμάνθηκε από $0,2$ έως 1 mm . Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε CNC μηχανή επιφανειακής λείανσης.

Τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε η συγκεκριμένη διατριβή ήταν ότι τόσο η αύξηση του βάθους κοπής όσο και η μείωση της ταχύτητας πρόωσης του δοκιμίου έχουν σαν αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερου βάθους σκλήρυνσης. Επίσης για κάθε σει παραμέτρων της διεργασίας (βάθος κοπής και ταχύτητα πρόωσης του δοκιμίου) υπάρχει ένα μέγιστο βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης. Η μέγιστη τιμή καθορίζεται από τη ροή θερμότητας η οποία προκαλεί αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας στο σημείο τήξης του υλικού του δοκιμίου.

στ) Οι Jianhua Zhang et al (2008) μελέτησαν υπολογιστικά και πειραματικά τις παραμέτρους της διεργασίας αυτής σε υλικό χάλυβα AISI 1020.

Το εύρος του βάθους κοπής a_e κυμάνθηκε από $0,1$ έως $0,3\text{ mm}$. Η ταχύτητα περιστροφής V_c του λειαντικού τροχού ήταν σταθερή και ίση με $19,6\text{ m/sec}$, ενώ η ταχύτητα πρόωσης V_w κυμάνθηκε από $0,01$ έως $0,05\text{ m/s}$.

Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σκλήρυνση, από $0,2\text{ mm}$ βάθους κοπής και πάνω, ήταν αυξανόμενη όσο αυξανόταν το βάθος κοπής, ενώ πριν δεν υπήρχε σκλήρυνση. Επίσης σε ταχύτητες πρόωσης μεγαλύτερες από $0,03\text{ m/sec}$ μειωνόταν το βάθος σκλήρυνσης.

ζ) Οι Michael Zah et al μέσα από πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες διερεύνησαν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην σκλήρυνση του χάλυβα 100Cr6, καθώς και στη μικροδομή του.

Τα δοκίμια ήταν ορθογωνικής διατομής (150*28*18mm) με λειαντικούς τροχούς από κορούνδιο σταθερής διαμέτρου $D=400\text{mm}$. Η ταχύτητα περιστροφής V_c του λειαντικού τροχού ήταν σταθερή και ίση με 35 m/sec, ενώ χρησιμοποίησε διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης V_w με εύρος από 0,18 έως 6 m/min. Το βάθος κοπής a_e κυμάνθηκε από 0,1 έως 1 mm. Κατά την πειραματική διαδικασία υπήρχε παροχή ψυκτικού υγρού.

Μέτρησαν τις δυνάμεις κοπής καθώς και τη θερμοκρασία κοπής σε διάφορα σημεία. Πέραν των πειραμάτων αναπτύχθηκε και ένα υπολογιστικό μοντέλο με το οποίο υπολογίστηκε η κατανομή της θερμοκρασίας στο δοκίμιο, καθώς και οι διάφοροι μετασχηματισμοί της μικροδομής του υλικού. Με το υπολογιστικό μοντέλο προσεγγίστηκαν πολύ καλά και τα πειραματικά αποτελέσματα.

η) Οι Liu Judong et al διερεύνησαν την επίδραση του βάθους κοπής στο βάθος σκλήρυνσης του χάλυβα, καθώς και την μικροδομή του σε κατηγορία χάλυβα 1060 steel.

Η ταχύτητα των λειαντικών τροχών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σταθερή $V_c=26,3$ m/sec, όπως και η ταχύτητα πρόωσης $V_w =0,008$ m/s. Τα βάθη κοπής a_e κυμάνθηκαν από 0,2 έως 0,5mm.

Στα συμπεράσματά τους διέκριναν δύο σημαντικές περιοχές. Η πρώτη η οποία έχει υποστεί σχεδόν πλήρη σκλήρυνση και η δεύτερη η οποία είναι μία μεταβατική περιοχή. Η πρώτη αποτελείται από μίγμα μαρτενσίτη, και υπολείμματα ωστενίτη. Για τις τιμές βάθους κοπής που χρησιμοποιήθηκαν δεν παρατηρήθηκε κάποια αξιόλογη επίδραση αυτού, στο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και στην μέγιστη τιμή της σκληρότητας. Ανάλογα με το βάθος κοπής και την αρχική ομοιομορφία της επιφάνειας μεταβάλλεται το πάχος σκλήρυνσης το οποίο αυξάνεται αναλόγως.

Συγγραφείς	έτος	Βάθη κοπής (mm)	Ταχύτητες κοπής	Ταχύτητες πρόωσης	Υλικό	Ταχύτητες πρόωσης σε m/min
Brinksmeier, Brockhoff	1996		30m/s			
Brockhoff	1999	0.005-1	20-100 m/s	0.01-5 m/min	SAE 4140	0.01-5.00
Τσίρμπας	2002	0.25-0.65	30-45 m/s	0.15-1.75 m/min	100Cr6	0.15-1.75
Chryssolouris	2005	0.45-1.55	45 m/s	0.15-1 m/min	100Cr6	0.15-1.00
Σαλωνίτης	2006	0.2-1	100 m/s	0.3-0.9 m/min	100Cr6	0.30-0.90
Zheng-Tong et al.	2007	0.05-0.25	40 m/s	0.30-1.5m/min	40Cr steel	0.30-1.50
Salonitis	2008	0.3	35 m/s	0.6 m/min	100Cr6	0.60
Zhang et al.	2009	0.1-0.3	19.6 m/s	0.01-0.05 m/s	AISI 1020	0.60-3.00
Zah et al.	2009	0.1-1	35 m/s	0.18-6 m/min	100Cr6	0.18-6.00
Judong et al.	2012	0.2-0.5	26.3 m/s	0.008 m/s	AISI 1060	0.48
Liu et al.	2014	0.3	25m/s	0.2-0.8m/min	65Mn steel	0.20-0.80
Alonso et al.	2015	0.02-0.53	23-30m/s	20-340mm/s	100Cr6, 42CrMo4, AISI 1045	1.20-20.4
Salonitis	2015	0.3	20 m/s	0.4 m/min	AISI 1045	0.40

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Συγκριτικός πίνακας ερευνητικών εργασιών.

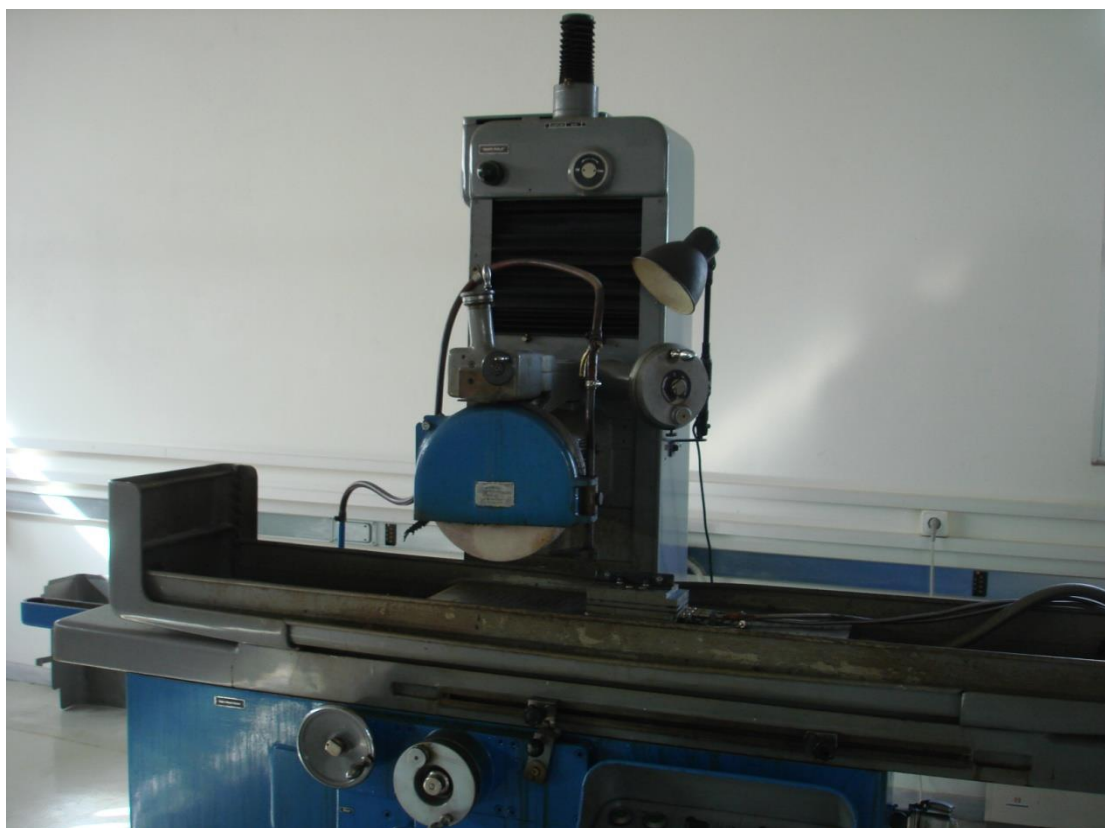
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την διερεύνηση της εφαρμογής της κατεργασίας Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης σε δοκίμια χάλυβα με χρήση της συμβατικής εργαλειομηχανής λείανσης σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στο αποτέλεσμα της κατεργασίας, δηλαδή στο βάθος σκλήρυνσης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στις υποενότητες 5.1-5.3 γίνεται μελέτη περιπτώσεων εφαρμογής της κατεργασίας Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης σε δοκίμια δύο ειδών χάλυβα με χρήση διαφόρων ταχυτήτων πρόωσης, βαθών κοπής και διεξαγωγή της κατεργασίας με ομόρροπη και αντίρροπη φορά. Στη συνέχεια, τα κατεργασμένα δοκίμια υπόκεινται σε δοκιμές σκληρομέτρησης και τραχυμέτρησης όπως περιγράφεται στην υποενότητα 5.4 ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα.

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Για την ολοκλήρωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μία επίπεδη λειαντική μηχανή (Σχήμα 20), στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών, με τα παρακάτω στοιχεία:

- **Τύπος Εργαλειομηχανής λείανσης: ELB Schliff SW8**
- **Στροφές ατράκτου λειαντικού τροχού: $n=2800$ rpm**
- **Πλάτος λειαντικού τροχού: 50mm**



Σχήμα 20. Επίπεδη λειαντική μηχανή

Μεταξύ των διαθέσιμων τροχών επελέγη ο τύπος NORTON 38A36 – K8VG Alundum με διάμετρο $D=300\text{mm}$, ο οποίος σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας είναι χονδρόκοκκος (Σχήμα 21). Λαμβάνοντας υπόψη και τις τελευταίες μελέτες (Salonitis et al., 2008) για την επίδραση των κόκκων του λειαντικού τροχού, στη διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση αναμένεται μεγαλύτερη σκλήρυνση του υλικού με χρήση αυτού του τροχού σε σχέση με τους διαθέσιμους τροχούς διαφορετικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 21. Λειαντικός τροχός.

Επιλέχθηκαν δύο(2) τύποι δοκιμίων από υλικό χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Η εμπορική ονομασία του πρώτου υλικού δοκιμίου ήταν UDDEHOLM SVERKER 21 (AISI D2, W. – Nr 1.2379) με ακριβή χημική σύσταση η οποία προκύπτει από τα πιστοποιητικά του κατασκευαστή και παρουσιάζεται στον πίνακα 6 .

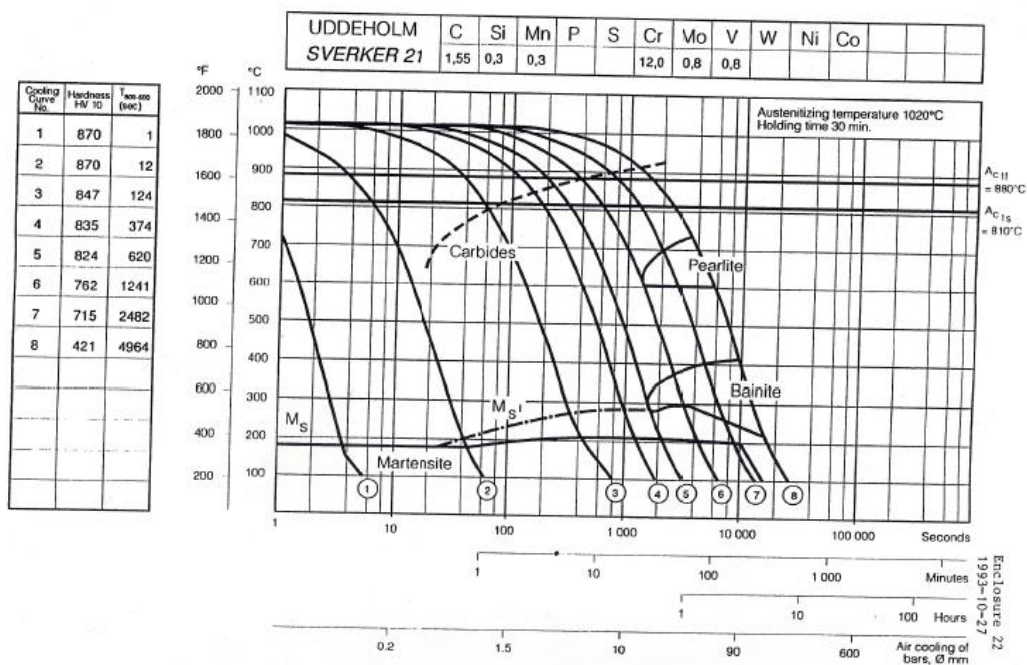
Ονομασία στοιχείου	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Ni	Cu
Σύσταση (%)	1.55	0.3	0.4	11.3	0.8	0.8	0.023	0.0003	0.44	0.23

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 . Σύσταση κραματικών στοιχείων του χάλυβα UDDEHOLM SVERKER 21.

Το υλικό αυτό είναι χάλυβας με μεγάλο ποσοστό άνθρακα και με χαρακτηριστικό το υψηλό ποσοστό χρωμίου (Cr) το οποίο βρίσκεται κοντά στο 12% και ανήκει στην σειρά με ονομασία D κατά AISI-SAE. Το υλικό αυτό βρίσκει εφαρμογές ιδιαίτερα ως υλικό εργαλείων που χρησιμοποιούνται σε ψυχρές κατεργασίες, έχει πολύ καλή αντίσταση στην φθορά απόξεσης (abrasive wear) αλλά σχετικά περιορισμένη αντίσταση σε ρηγμάτωση. Έτσι χρησιμοποιείται σε κατεργασίες στις οποίες εμφανίζεται σχετικά έντονη φθορά στο εργαλείο αλλά μικρή πιθανότητα εμφάνισης ρηγμάτωσης. Αναφέρεται επίσης ότι οι μηχανικές του ιδιότητες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες κατά την διάρκεια θερμικών κατεργασιών.

Η αρχική σκληρότητα του πρώτου δοκιμίου όπως αποδεικνύεται από πιστοποιητικά που χορηγήθηκαν από τον κατασκευαστή, ήταν 235 HB και οι διαστάσεις του 154x30x10 mm.

Επιπλέον, στο σχήμα 22 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT (Continuous Cooling Transformation) του υλικού, το οποίο χορηγήθηκε από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 22. Διάγραμμα CCT του υλικού UDDEHOLM SVERKER 21

Η εμπορική ονομασία του δεύτερου δοκιμίου ήταν UDDEHOLM ARNE (AISI O1) με ακριβή χημική σύσταση οποία προκύπτει από τα πιστοποιητικά του κατασκευαστή και παρουσιάζεται στον πίνακα 7 .

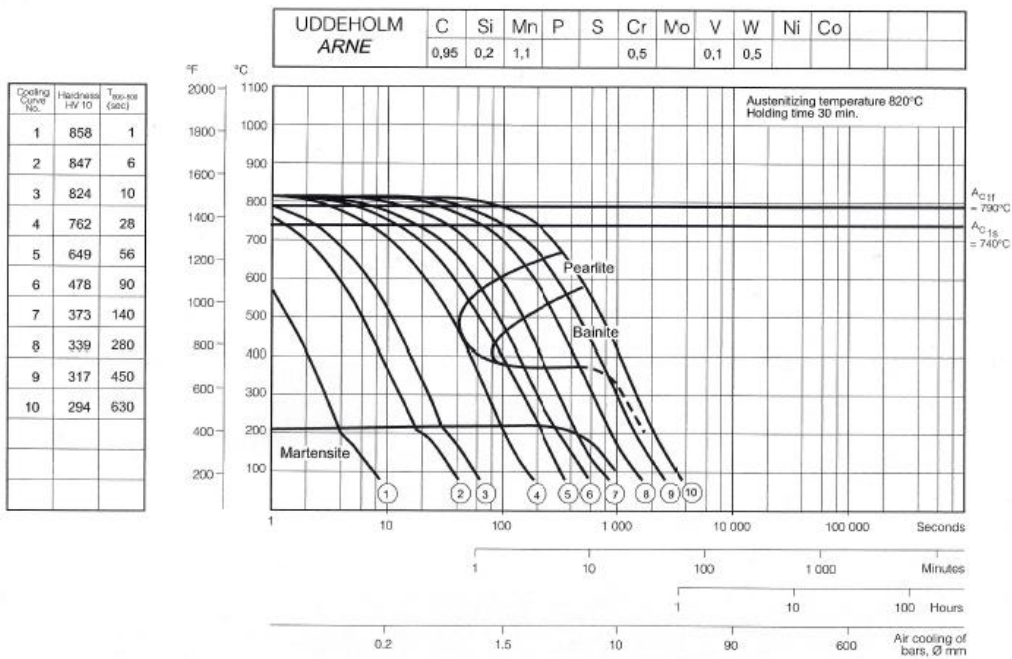
Ονομασία στοιχείου	C	Si	Mn	Cr	V	P	S	W
Σύσταση (%)	0.95	0.22	1.1	0.45	0.1	0.008	0.004	0.4

ΠΙΝΑΚΑΣ 7 . Σύσταση κραματικών στοιχείων του χάλυβα UDDEHOLM ARNE.

Το υλικό αυτό είναι γενικής χρήσης σκληρυνόμενος σε λάδι εργαλειοχάλυβας με βασικά κραματικά χαρακτηριστικά το μαγγάνιο, το χρώμιο και το βολφράμιο. Το υλικό αυτό ανήκει στην σειρά O κατά την ονοματολογία AISI-SAE και επιδεικνύει καλή κατεργασιμότητα, καλή διαστατική ακρίβεια μετά τη σκλήρυνση και χρησιμοποιείται κυρίως για κατασκευή εργαλείων για διάφορες κατεργασίες καθώς εμφανίζει αυξημένη αντίσταση σε φθορά.

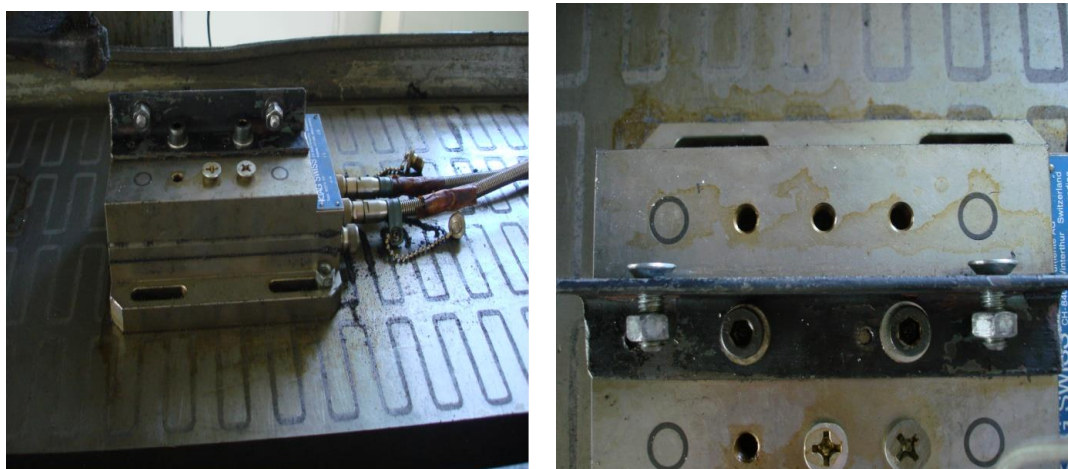
Η αρχική σκληρότητα του δεύτερου δοκιμίου, όπως αποδεικνύεται από πιστοποιητικά που χορηγήθηκαν από τον κατασκευαστή, ήταν 211 HB και οι διαστάσεις τους 154x30x10 mm.

Επιπλέον, στο σχήμα 23 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT (Continuous Cooling Transformation) του υλικού, το οποίο χορηγήθηκε από τον κατασκευαστή.



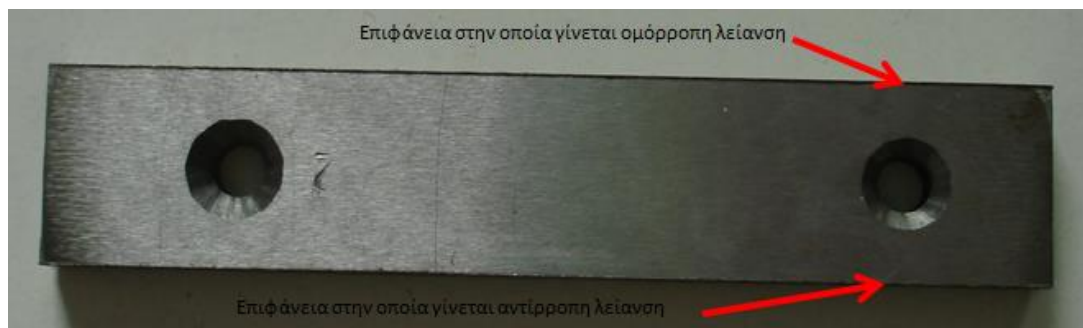
Σχήμα 23. Διάγραμμα CCT του υλικού UDDEHOLM ARNE

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ιδιοκατασκευή για την συγκράτηση των δοκιμίων σε κατακόρυφη θέση (Σχήμα 24). Ενώ η συγκράτηση των δοκιμίων πάνω στην τράπεζα εργασίας γινόταν με μαγνήτιση του υλικού, στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η ιδιοκατασκευή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκαν μεγάλα βάθη κοπής με συνέπεια να υπάρχουν ταλαντώσεις και κίνδυνος αποκόλλησης του δοκιμίου από την τράπεζα με αποτέλεσμα τυχόν καταστροφή της μηχανής ή τραυματισμό.



Σχήμα 24. Ιδιοκατασκευή συγκράτησης των δοκιμίων

Η λείανση των δοκιμίων έγινε πάνω στην μικρή πλευρά τους (πλάτους 10mm) και οι μετρήσεις σκληρότητας έγιναν στην άλλη πλευρά (ύψους 30mm), σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια λείανσης, χωρίς να γίνει τομή του δοκιμίου.



Σχήμα 25 . Παρουσίαση των πλευρών του δοκιμίου στις οποίες γίνεται ομόρροπη και αντίρροπη λείανση

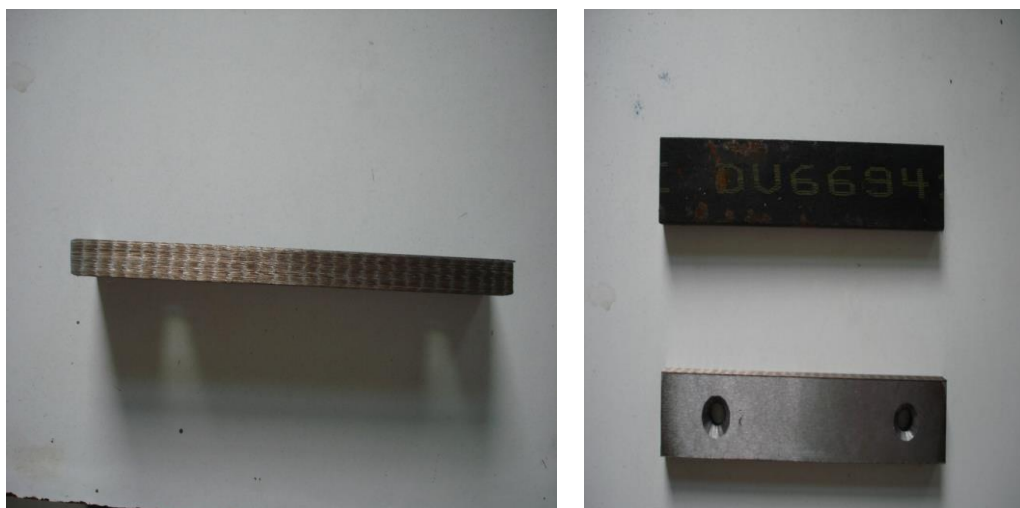
Το γεγονός ότι το ύψος του δοκιμίου είναι 30 mm ενώ το βάθος σκλήρυνσης συνήθως κυμαίνεται σε τιμές κάτω του 1 mm, μας οδηγεί στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η κατεργασία που θα πραγματοποιηθεί στην πάνω επιφάνεια δεν θα επηρεάσει το υλικό στην κάτω επιφάνεια και το αντίστροφο (Σχήμα 25).

Για την συγκράτηση των δοκιμίων στην ιδιοκατασκευή, ανοίχθηκαν δύο οπές με τρυπάνι (Σχήμα 26), σε συμμετρικές θέσεις για να έχουμε μετρήσεις με ομόρροπη και αντίρροπη φορά κίνησης της λειαντικής μηχανής.



Σχήμα 26. Τρυπάνι

Για να έχουμε πιο ξεκάθαρο αποτύπωμα στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της σκληρομέτρησης, έγινε μία αρχική λείανση της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου με πολύ μικρό βάθος κοπής, μικρή ταχύτητα πρόωσης και χρήση υγρού κοπής, ώστε να μην επηρεαστούν οι συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας των δοκιμών όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 27). Στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε μέσω σκληρομετρήσεων ότι δεν υπήρξε κάποια διαφοροποίηση της τιμής της σκληρότητας της κατεργασμένης επιφάνειας.



Σχήμα 27. Δοκίμια

5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Για τον σχεδιασμό της πειραματικής διαδικασίας, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, επιλέχθηκε επίπεδη λειαντική μηχανή με τρεις διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης (11,7m/min, 16.87m/min, 22,59m/min), οι οποίες ήταν αρκετά μεγάλες σε σχέση με ταχύτητες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες εργασίες. Το γεγονός αυτό μας ανάγκασε να πάρουμε μεγάλα βάθη κοπής για να έχουμε πιο φανερά αποτελέσματα.

Γνωρίζουμε, σύμφωνα και με άλλες πειραματικές εργασίες, ότι οι κύριες παράμετροι που επιδρούν στο αποτέλεσμα της διεργασίας Σκλήρυνση με Λείανση, είναι το βάθος κοπής, η ταχύτητα πρόωσης, ο τύπος του λειαντικού τροχού και το υπό επεξεργασία υλικό.

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή κατάλληλων τιμών για κάθε μία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους ήταν η παραγωγή ικανής ποσότητας θερμότητας στην περιοχή κοπής, ώστε να εμφανιστούν φαινόμενα σκλήρυνσης στο υλικό.

Με βάση προηγούμενες εργασίες (Τσίρμπας 2002, Σαλωνίτης 2006) παρατηρείται πως το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης αυξάνει καθώς αυξάνεται η ροή θερμότητας που εισέρχεται στο δοκίμιο. Συγχρόνως η αύξηση της ροής θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχίου. Η θερμοκρασία όμως αυτή δεν πρέπει να

ξεπερνάει το σημείο τήξης του υλικού, γιατί αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή φάσης του υλικού τοπικά.

Με τις προϋποθέσεις αυτές θα πρέπει το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης που θα επιτευχθεί, με αυτή τη ροή θερμότητας, να είναι και το μέγιστο που μπορεί αυτό το σετ παραμέτρων να παράγει.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια και λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία προηγούμενων εργασιών, επιλέχθηκε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών για κάθε μία από τις παραμέτρους της διαδικασίας. (Πίνακας 8)

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΤΙΜΗ (ΥΛΙΚΟ 1)	ΤΙΜΗ (ΥΛΙΚΟ 2)
ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	AISI D2, W. – Nr 1.2379	AISI 01
ΤΥΠΟΣ ΛΕΙΑΝΤΙΚΟΥ ΤΡΟΧΟΥ(ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ)	38A36 – K8VG(300mm)	38A36 – K8VG(300mm)
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ ae(mm)	0,3 – 0,4 – 0,5	0,3 – 0,4 – 0,5
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ vw (m/min)	11,7 – 16,87 – 22,59	11,7 – 16,87 – 22,59
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΟΠΗΣ vc (m/sec)	43,98	43,98
ΦΟΡΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	Ομόρροπη και Αντίρροπη	Ομόρροπη και Αντίρροπη
ΥΓΡΟ ΚΟΠΗΣ	Όχι	Όχι

Πίνακας 8. Πειραματικές συνθήκες

Το εύρος του βάθους κοπής επιλέχθηκε με σκοπό την παραγωγή ικανοποιητικής ποσότητας θερμότητας στην περιοχή της κοπής, λόγω και των μεγάλων ταχυτήτων πρόωσης, αλλά και τον περιορισμό των δυνάμεων κοπής κάτω από κάποιο όριο, ώστε να αποφευχθούν ταλαντώσεις της μηχανής.

5.3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η στερέωση του κάθε δοκιμίου έγινε πάνω στην ιδιοκατασκευή με δύο βίδες-παξιμάδια. Τέθηκε σε λειτουργία ο λειαντικός τροχός και αφού ελέγχθηκε το βάθος κοπής, τέθηκε σε λειτουργία η επίπεδη τράπεζα της λειαντικής μηχανής για ένα μόνο πέρασμα της επιφάνειας του δοκιμίου. Το ίδιο συνέβη και από την άλλη πλευρά του δοκιμίου, αλλά με αντίρροπη κίνηση της επίπεδης τράπεζας. Άρα σε κάθε δοκίμιο είχαμε τη δυνατότητα να πάρουμε το ίδιο πάσο από την μία ή την άλλη πλευρά του δοκιμίου με ομόρροπη ή αντίρροπη κίνηση της λειαντικής μηχανής.

Κατά τη διάρκεια της κίνησης του δοκιμίου (πρόωση της επίπεδης τράπεζας) και ερχόμενο αυτό σε επαφή με τον περιστρεφόμενο λειαντικό τροχό παράγεται θερμότητα στην περιοχή της κοπής, και κατά συνέπεια δημιουργείται ένα θερμοκρασιακό πεδίο στην επιφάνεια του επεξεργαζόμενου κομματιού.

Στις περιπτώσεις που το ποσό θερμότητας που προσδίνεται στο υλικό, από την θερμική πηγή, είναι επαρκές, το υλικό στην επιφάνεια του δοκιμίου θερμαίνεται και αφού ξεπεράσει τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τελικά υπόκειται σε ταχεία ψύξη λόγω της μεγάλης απορρόφησης θερμότητας από την κύρια μάζα του τεμαχίου, με αποτέλεσμα την σκλήρυνσή του. Εάν το ποσό θερμότητας που προσδίνεται στο υλικό, λόγω και των μεγάλων ταχυτήτων πρόωσης, δεν είναι αρκετό, δεν μπορούμε να διακρίνουμε ξεκάθαρα μία σκληρυμένη ζώνη κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Σε πολλές περιπτώσεις δεν υπήρξε καθόλου ζώνη σκλήρυνσης.

Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό στη μεταλλουργική δομή του υλικού. Έτσι επιτυγχάνεται η επιφανειακή σκλήρυνση. Αφού ολοκληρωθεί ένα πέρασμα του λειαντικού τροχού στο εξάρτημα τελειώνει και η διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για το σύνολο των δοκιμίων.

Ακολουθεί μία διεργασία φινιρίσματος, σε κατάλληλη συσκευή (Σχήμα 28), η οποία δεν σχετίζεται με την Σκλήρυνση με Λείανση, αλλά έχει σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής επιφανειακής ποιότητας του υλικού και την ύπαρξη πιο ξεκάθαρας αποτυπώματος στη διαδικασία της σκληρομέτρησης.



Σχήμα 28. Συσσκευή φινιρίσματος.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας δεν υπήρχε παροχή υγρού κοπής, σε αντίθεση με την διαδικασία του φινιρίσματος. Ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων που τελικά έγιναν ήταν τριάντα έξι (36).

5.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, όλα τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στην συσκευή σκληρομέτρησης (Σχήμα 29), όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σκληρότητας με τη μέθοδο Vickers με βαρίδια συνολικής μάζας 5 κιλών (HV5).



Σχήμα 29.Συσκευή σκληρομέτρησης.

Οι μετρήσεις έγιναν σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του εξαρτήματος, στην κατά πλάτος πλευρά (30mm), με σκοπό τον προσδιορισμό του προφίλ σκληρότητας συναρτήσεως του βάθους.

Από τη διαδικασία αυτή, προσδιορίζεται και το βάθος σκλήρυνσης, το οποίο ορίζεται ως το βάθος στο οποίο η σκληρότητα ισούται με το 80% της μέγιστης επιτευχθείσας (Τσίρμπας 2002).



Σχήμα 30. Αποτυπώματα σκληρόμετρου με διαφορετικό μέγεθος.

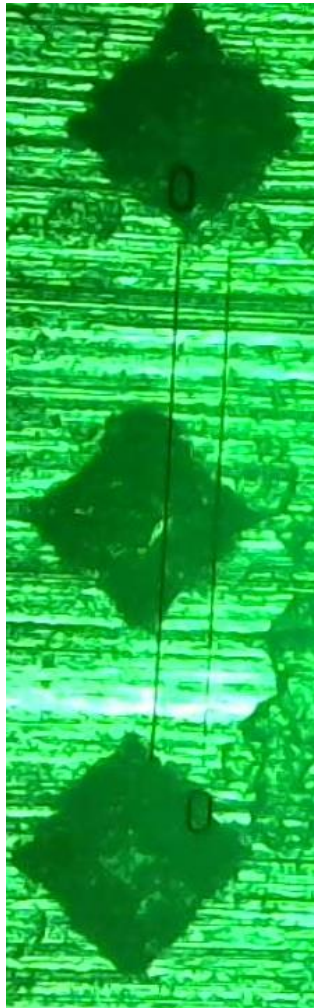
Στο σχήμα 30 φαίνεται η διαφορά του αποτυπώματος που άφησε το σκληρόμετρο πάνω στο δοκίμιο. Το μικρότερο σχήμα δείχνει την αντίσταση του υλικού στη διείσδυση του σκληρόμετρου και κατά συνέπεια τη μεγαλύτερη σκληρότητά του.

Στο σχήμα 31 φαίνονται τα αποτυπώματα του σκληρόμετρου σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια του δοκιμίου, όπως και οι αποστάσεις αυτών από την επιφάνεια.

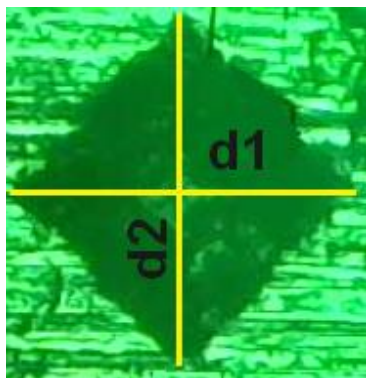
Τέλος το σχήμα 32 δείχνει τον τρόπο υπολογισμού της σκληρότητας του υλικού με τη μέθοδο Vickers, μετρώντας δηλαδή τις διαγώνιους του σχηματιζόμενου ρόμβου και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

Όπου F το επιβαλλόμενο φορτίο στον διεισδυτή (σε kp) και d η μέση τιμή των δύο διαγωνίων του αποτυπώματος της διείσδυσης σε mm .



Σχήμα 31. Μέτρηση σκληρότητας σε διαφορετικά βάθη.



Σχήμα 32. Τρόπος υπολογισμού της σκληρότητας.

5.5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων της διεργασίας στη ζώνη σκλήρυνσης, που επιτεύχθηκε με τη διαδικασία της Σκλήρυνσης με Λείανση φαίνεται στο πίνακα αποτελεσμάτων και στα παρακάτω διαγράμματα.

Έγιναν αρκετές μετρήσεις σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια του κάθε δοκιμίου με πρόθεση να δειχθεί το βάθος σκλήρυνσης του υλικού.

Στον πίνακα αποτελεσμάτων φαίνονται τα δύο διαφορετικά υλικά, οι παράμετροι (βάθος κοπής, ταχύτητα πρόωσης και φορά λείανσης) που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεργασία, όπως και τα αποτελέσματα (βάθος σκλήρυνσης, και μέγιστη σκληρότητα) της πειραματικής διαδικασίας.

Οι δύο(2) τύποι δοκιμίων που επιλέχθηκαν ήταν από χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Το μεν υλικό 1 έχει την εμπορική ονομασία **UDDEHOLM SVERKER 21**, με αρχική σκληρότητα 235 HB, το δε υλικό 2 έχει την εμπορική ονομασία **UDDEHOLM ARNE** με αρχική σκληρότητα 211 HB.

Η επιφανειακή σκληρότητα εξαρτάται μόνο από τη σύνθεση του χάλυβα και κυρίως από την περιεκτικότητά του σε άνθρακα. Άλλα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν λιγότερο τη μέγιστη δυνατή σκληρότητα ενός δεδομένου χάλυβα.

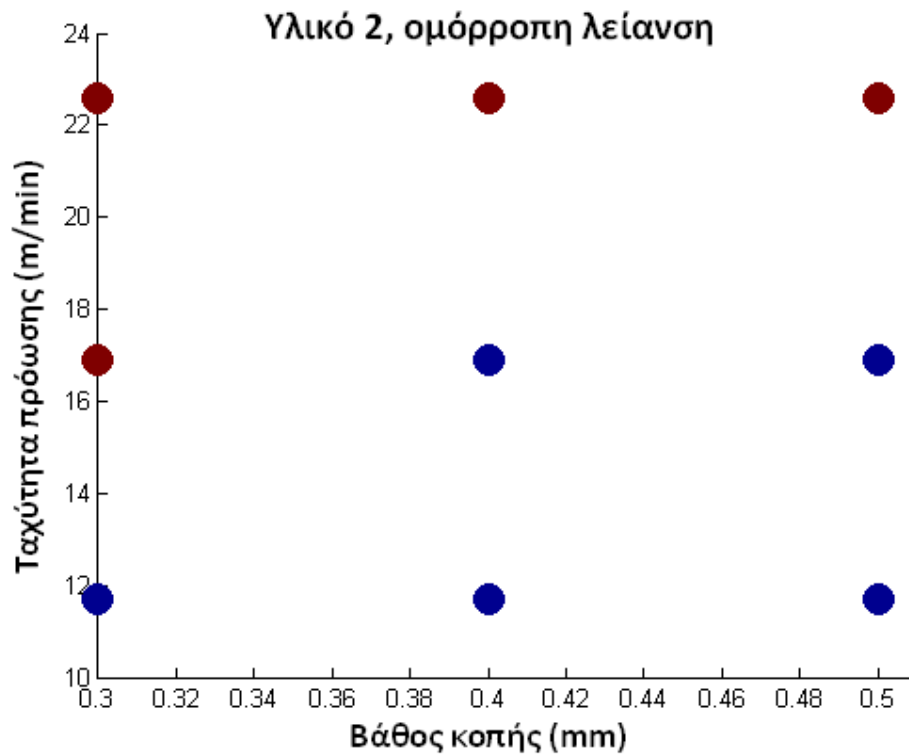
Κατά τη διαδικασία της Σκλήρυνσης με Λείανση δεχόμαστε ότι ο ρυθμός ψύξης είναι πάντα επαρκής για τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, με την προϋπόθεση ότι το πάχος του εξαρτήματος είναι τόσο ώστε να συμβαίνει το φαινόμενο της «αυτοψύξης» του υλικού.

Με δεδομένο το ρυθμό ψύξης του υλικού, συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμιστικός παράγοντας για τη σκλήρυνση του υλικού είναι το ποσό θερμότητας που παράγεται, κατά τη διαδικασία της Σκλήρυνσης με Λείανση, και κατά συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας του. Επομένως το βάθος της σκληρυμένης ζώνης εξαρτάται κυρίως από την ένταση του θερμοκρασιακού πεδίου και άρα ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει το βάθος της σκληρυμένης ζώνης είναι η ισχύς της θερμικής πηγής.

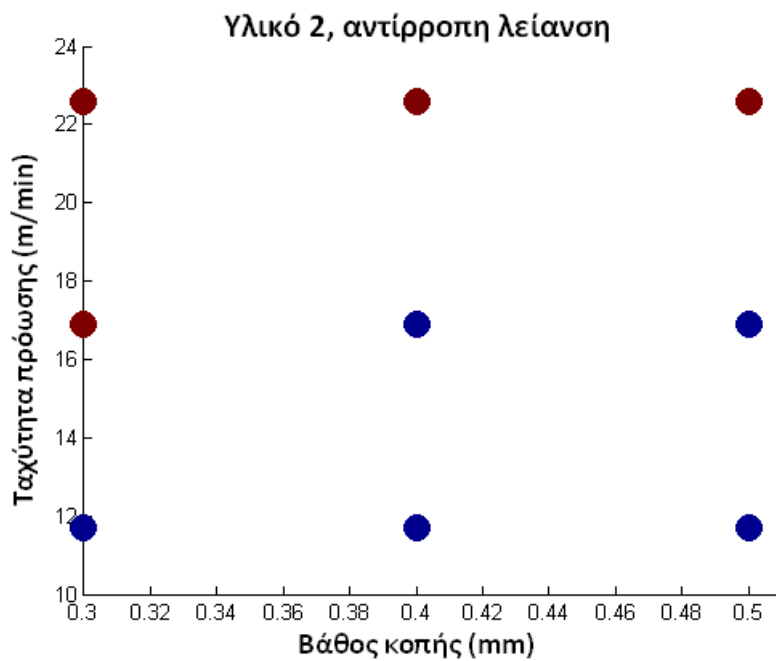
A/A	Υλικό	Βάθος κοπής (mm)	Ταχύτητα πρόωσης (m/min)	Φορά λείανσης	ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ	ΒΑΘΟΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ (mm)
1	2	0,3	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,26
2	2	0,4	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,35
3	2	0,5	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,41
4	2	0,3	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
5	2	0,4	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,21
6	2	0,5	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,27
7	2	0,3	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
8	2	0,4	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
9	2	0,5	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
10	2	0,3	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,21
11	2	0,4	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,36
12	2	0,5	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,39
13	2	0,3	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
14	2	0,4	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,20
15	2	0,5	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,26
16	2	0,3	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
17	2	0,4	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
18	2	0,5	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
19	1	0,3	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,27
20	1	0,4	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,31
21	1	0,5	11,7	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,36
22	1	0,3	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,20
23	1	0,4	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,22
24	1	0,5	16,9	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,24

25	1	0,3	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
26	1	0,4	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
27	1	0,5	22,6	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
28	1	0,3	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,25
29	1	0,4	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,32
30	1	0,5	11,7	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,35
31	1	0,3	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,22
32	1	0,4	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,25
33	1	0,5	16,9	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΝΑΙ	0,29
34	1	0,3	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
35	1	0,4	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-
36	1	0,5	22,6	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	ΟΧΙ	-

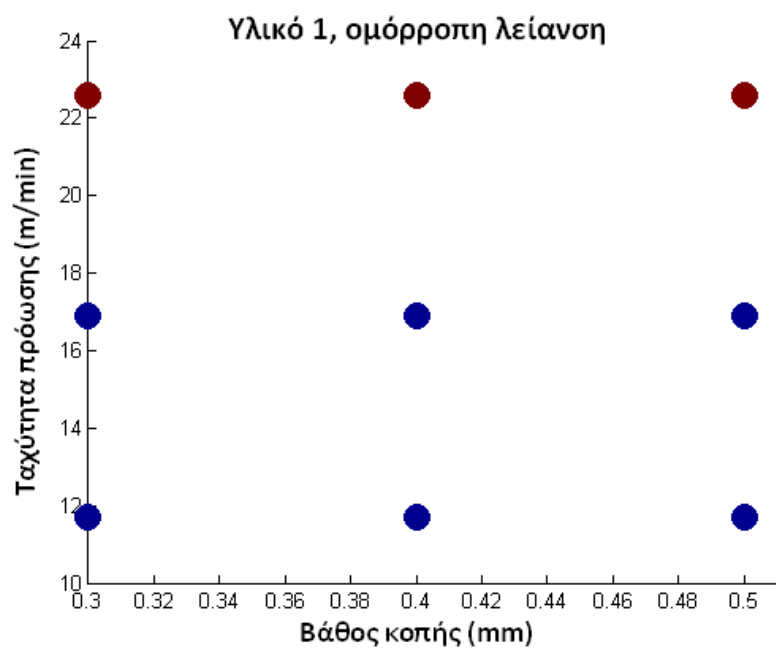
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.



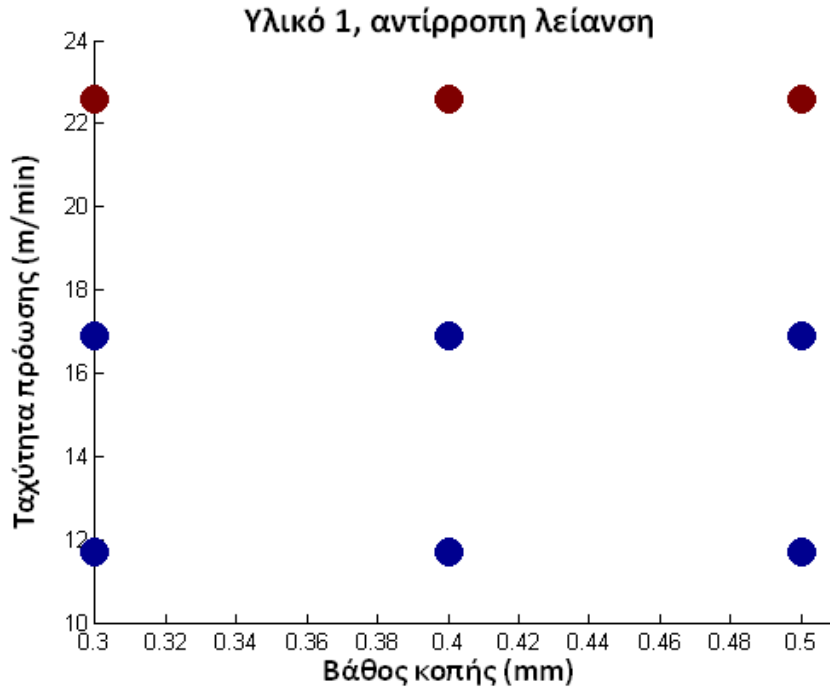
Σχήμα 33. Γραφική απεικόνιση των συνδυασμών των παραμέτρων κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις 1-9



Σχήμα 34. Γραφική απεικόνιση των συνδυασμών των παραμέτρων κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις 10-18



Σχήμα. 35. Γραφική απεικόνιση των συνδυασμών των παραμέτρων κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις 19-27



Σχήμα 36. Γραφική απεικόνιση των συνδυασμών των παραμέτρων κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις 28-36

Για κάθε υλικό 1,2 και για κάθε φορά λείανσης (ομόρροπη-αντίρροπη) παρουσιάζονται με γραφικό τρόπο στα σχήματα 33 έως 36 οι περιπτώσεις στις οποίες επιτεύχθηκε (**ΜΠΛΕ** χρώμα) ή όχι (**ΚΟΚΚΙΝΟ** χρώμα) σκλήρυνση του υλικού σε σχέση με τις συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής).

Όπως φαίνεται αρχικά από τον πίνακα αποτελεσμάτων αλλά και από τα σχήματα 33 έως 36, αύξηση της σκληρότητας επιτεύχθηκε για το υλικό 2 στις περιπτώσεις με χαμηλή ταχύτητα πρόωσης (11.7 m/min) και για τα τρία βάθη κοπής στην ομόρροπη λείανση και την αντίρροπη λείανση και στις περιπτώσεις με μέτρια ταχύτητα κοπής (16.9 m/min) στην ομόρροπη και την αντίρροπη λείανση για τα δύο μεγαλύτερα βάθη κοπής. Όσον αφορά το υλικό 1, επιτεύχθηκε σκλήρυνση σε όλες τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη και η μεσαία ταχύτητα πρόωσης. Συμπεραίνουμε επομένως ότι, στη μεγάλη ταχύτητα πρόωσης δεν είχαμε ιδιαίτερα αποτελέσματα σκλήρυνσης στα διάφορα βάθη κοπής, σε αντίθεση με την μικρότερη και τη μεσαία ταχύτητα όπου φαίνεται η διαφοροποίηση της σκληρότητας σε συνάρτηση με το βάθος κοπής. Βέβαια, μεγαλύτερη αύξηση σκληρότητας

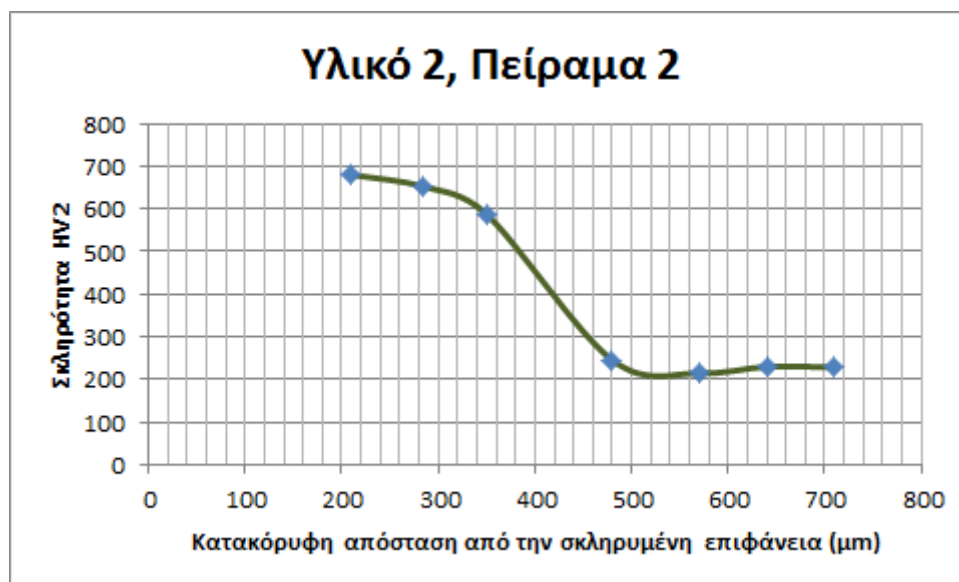
παρατηρήθηκε σε περιπτώσεις με χρήση της μικρότερης ταχύτητας πρόωσης ενώ στις περιπτώσεις με χρήση της μεσαίας ταχύτητας η αύξηση της σκληρότητας ήταν μικρότερη.

Στις μεγαλύτερες ταχύτητες πρόωσης, παρά το γεγονός της αύξησης του βάθους κοπής, της αφαίρεσης μεγαλύτερης ποσότητας υλικού και κατά συνέπεια αύξησης της παραγόμενης θερμότητας (Τσίρμπας 2002), το βάθος σκλήρυνσης και η σκληρότητα δεν δείχνουν να διαφοροποιούνται από την αρχική. Μία αιτιολόγηση της κατάστασης αυτής είναι ότι η θερμότητα διανέμεται σε μεγαλύτερο μήκος διαδρομής και σε χρονικό διάστημα τέτοιο ώστε να μην είναι ικανό να ανεβάσει τη θερμοκρασία του υλικού στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, για να μπορέσει μετά μέσω της «αυτοψύξης» του υλικού να γίνει η μαρτενσιτοποίησή του και η σκλήρυνσή του.

Όταν η ταχύτητα πρόωσης γίνεται αρκετά υψηλή και έχουμε διανομή της θερμότητας σε μεγαλύτερο μήκος διαδρομής, έχουμε επίτευξη θερμοκρασιών κατώτερων της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, και δεν ξεκινά η διαδικασία σκλήρυνσης, παρά το ότι ο ρυθμός ψύξης εξακολουθεί να επιτρέπει τη δημιουργία του μαρτενσίτη.

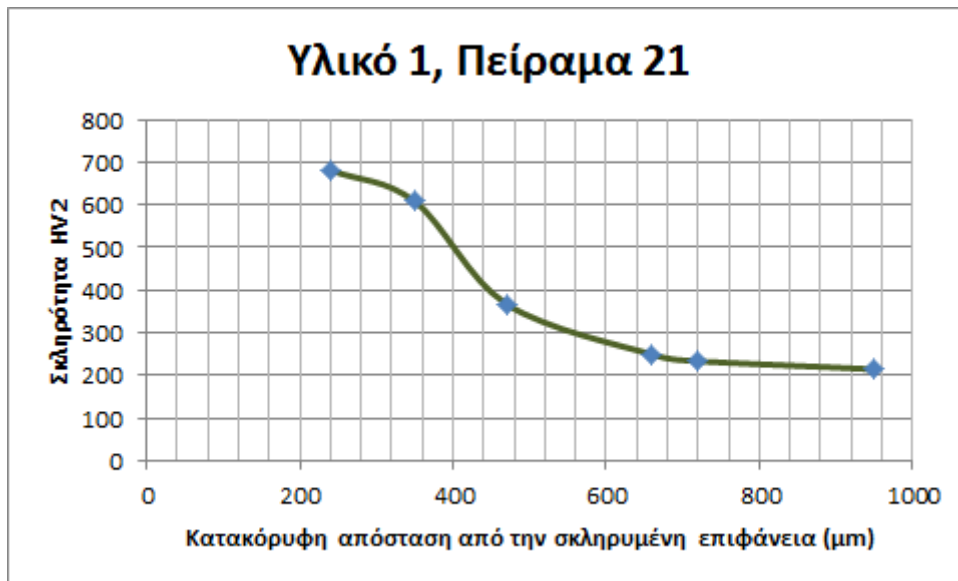
Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με αποτελέσματα διάφορων ερευνητών στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, οι **Liu Judong et al.** (2012) αναφέρουν ότι διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας, για βάθη κοπής από 0.2-0.5 mm παρατηρήθηκε αύξηση στο βάθος σκλήρυνσης (από 1 mm σε 1.6 mm). Οι **Jianping Li et al.** (2013) συμπέραναν ότι το βάθος σκλήρυνσης μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης και αυξάνεται με αύξηση του βάθους κοπής. Οι **Zhang et al.** (2009) υπολόγισαν αύξηση του βάθους σκλήρυνσης με αυξανόμενο βάθος κοπής κατά την κατεργασία του χάλυβα AISI 1020 για βάθη κοπής μεγαλύτερα από 0.2 mm και για βάθος 0.3 mm μείωση του βάθους σκλήρυνσης για ταχύτητα πρόωσης μεγαλύτερη των 0.03 m/s. Οι **Chryssolouris et al.** (2005) διεξήγαγαν πειράματα σκλήρυνσης μέσω λείανσης για διάφορα βάθη κοπής (0.45 mm – 1.55 mm) και ταχύτητες πρόωσης (0.15-1 m/min) σε υλικό 100Cr6 και παρατήρησαν ότι η αύξηση του βάθους κοπής και η μείωση της ταχύτητας πρόωσης οδήγησαν σε όλες τις περιπτώσεις σε αύξηση του βάθους σκλήρυνσης στο υλικό. Τέλος ο **Τσίρμπας** (2002) κατέληξε σε παρόμοια

συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση του βάθους κοπής ενώ παρατήρησε ότι η αύξηση ταχύτητα πρόωσης μπορεί να οδηγήσει σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους της κατεργασίας, σε μείωση του βάθους σκλήρυνσης.



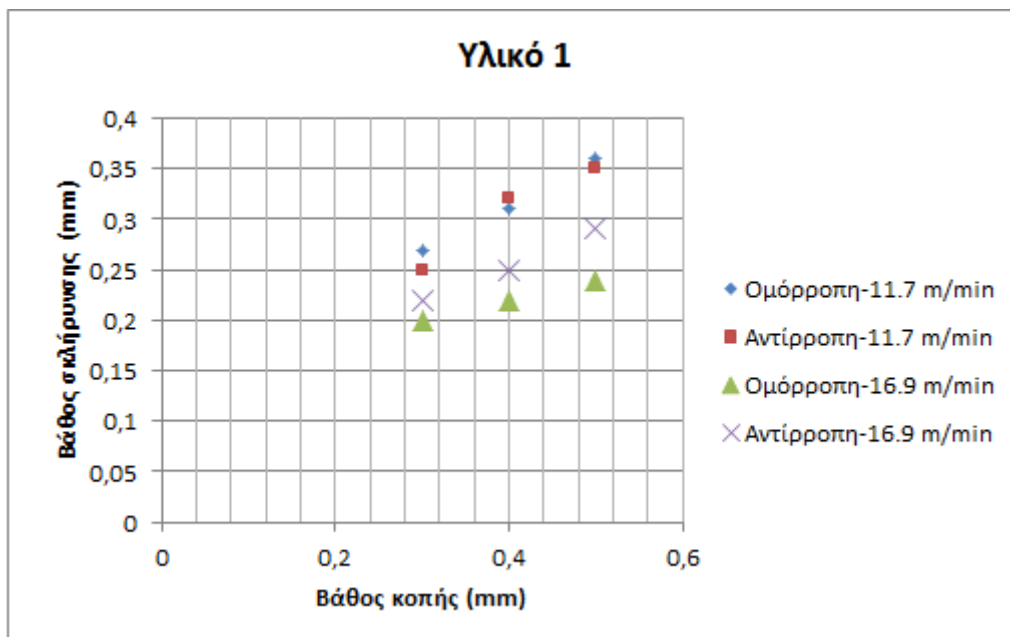
Σχήμα 37. Σκληρότητα σε συνάρτηση με το βάθος (Υλικό 2)

Προκειμένου να μπορεί να γίνει καλύτερη παρατήρηση του προφίλ σκληρότητας κατά το ύψος του δοκιμίου, διεξήχθησαν και σκληρομετρήσεις με μικρότερης μάζας βαρίδια (2 κιλών, HV2). Δύο ενδεικτικά αποτελέσματα, ένα για το κάθε υλικό, παρουσιάζονται στα σχήματα 37 και 38. Το σχήμα 37, που αφορά το υλικό 2, δείχνει τη σκλήρυνση που επέρχεται στο επιφανειακό στρώμα του υλικού μετά τη διεργασία της Σκλήρυνσης με Λείανση. Φαίνεται ότι μέχρι το βάθος των 350 μm το υλικό έχει υποστεί σκλήρυνση και μετά υπάρχει μια απότομη μείωση της σκληρότητας για να επανέλθει το υλικό στην αρχική του σκληρότητα.



Σχήμα 38. Σκληρότητα σε συνάρτηση με το βάθος. (Υλικό 1)

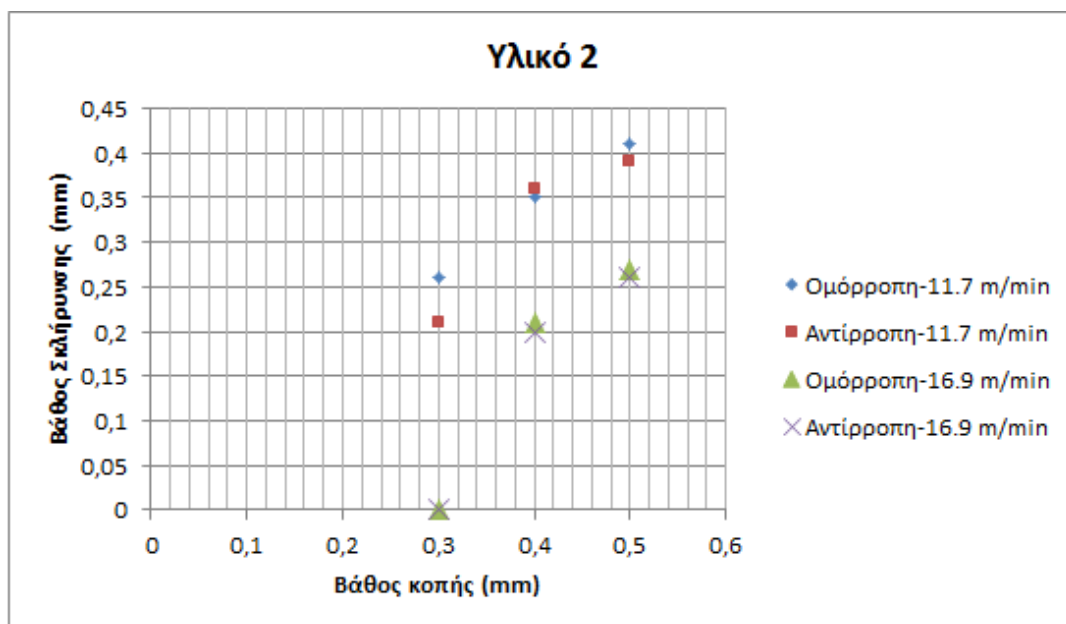
Στο σχήμα 38, που αφορά το υλικό 1, φαίνεται ότι το βάθος σκλήρυνσης είναι μέχρι τα 360 μm, και μετά έχουμε μία πιο ομαλή μείωση της σκληρότητας, μέχρι να επανέλθει το υλικό στην αρχική του σκληρότητα.



Σχήμα 39. Βάθος σκλήρυνσης συναρτήσει του βάθους κοπής. (Υλικό 1)

Στο υλικό 1, όπως φαίνεται και από το σχήμα 39, έχοντας σταθερή τη μικρότερη και τη μεσαία ταχύτητα πρόωσης, διαπιστώνεται ότι με αύξηση του βάθους κοπής υπάρχει αντίστοιχα και αύξηση του βάθους σκλήρυνσης, τόσο στην ομόρροπη όσο και στην αντίρροπη κίνηση της τράπεζας της επίπεδης λειαντικής μηχανής. Αυτό, όπως αναφέραμε και παραπάνω, δικαιολογείται

διότι αυξάνοντας το βάθος κοπής, αυξάνει και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και επομένως αυξάνει και η ροή θερμότητας με αποτέλεσμα τη σκλήρυνση του υλικού σε μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 40. Βάθος σκλήρυνσης συναρτήσει του βάθους κοπής. (Υλικό 2)

Στο υλικό 2, όπως φαίνεται και από το σχήμα 40, πάλι με σταθερή τη μικρότερη και τη μεσαία ταχύτητα πρόωσης, διαπιστώνεται ότι, στην ομόρροπη και την αντίρροπη κίνηση έχουμε αύξηση του βάθους σκλήρυνσης με αντίστοιχη αύξηση του βάθους κοπής. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 39 και 40 προκύπτει ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών του βάθους σκλήρυνσης που επιτεύχθηκαν κατά την ομόρροπη και κατά την αντίρροπη λείανση, γεγονός που αποδίδεται στην μεγάλη διαφορά της τιμής της γραμμικής ταχύτητας του λειαντικού τροχού (43,98 m/s) σε σχέση με την ταχύτητα πρόωσης (0,195-0,377 m/s), που οδηγεί σε αμελητέα αύξηση του ποσού της παραγόμενης θερμότητας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Σαλωνίτης, 2006).

ΠΕΙΡΑΜΑ	R _a (μm)	R _t (μm)	R _{z, DIN} (μm)
1	0,747	12,967	4,067
2	1,16	16,967	6
3	0,893	12,933	4,033
10	1,213	18	6,167
11	0,713	13,767	3,7
12	0,867	10	4,367
19	0,8	12,1	3,9
20	1,887	22,467	8
21	1,52	17,933	6,6
22	0,973	10,533	4,633
28	0,687	11,233	3,767
29	1,427	18,833	5,967
30	2,087	29,833	9,767
31	0,913	11,267	4,767

ΠΙΝΑΚΑΣ 10. Τραχύτητα επιφάνειας δοκιμίων.

Τέλος, στον πίνακα 10 παρουσιάζονται μετρήσεις όσον αφορά την τραχύτητα επιφανείας των δοκιμίων στα οποία παρατηρήθηκε σκλήρυνση. Με R_a συμβολίζεται η μέση τραχύτητα επιφανείας, R_t το μέγιστο ύψος του προφίλ τραχύτητας και R_{z, DIN} η μέση απόσταση μεταξύ μέγιστης και μικρότερης «κοιλιάδας» σε ένα μήκος δειγματοληψίας.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, σε κάθε δοκίμιο αρχικά πήραμε αρκετά πάσα με πολύ μικρό βάθος κοπής και χρήση υγρού κοπής για να δημιουργήσουμε την ίδια επιπεδότητα σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Έτσι χωρίς να επηρεαστούν οι συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας δημιουργήθηκε μια αρχική λεία επιφάνεια με μέση τραχύτητα 0,19 μm.

Στα δύο υλικά (1,2) πήραμε μετρήσεις σε τρία (3) σημεία κατά τη φορά της λείανσης για να γίνει εκτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας του κάθε υλικού. Διαπιστώθηκε αρχικά ότι η μέση τιμή της τραχύτητας μετά την κατεργασία κυμαίνεται από 0.7-2 μm ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας. Παρατηρήθηκε επίσης ότι, ιδιαίτερα στο υλικό 1, ότι οι μέσες τιμές της τραχύτητας είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μεγαλύτερες από αυτές του υλικού 2. Στο υλικό αυτό παρατηρήθηκε επίσης και ότι η επιφάνεια ήταν πιο έντονα παραμορφωμένη σε σχέση με την επιφάνεια των δοκιμίου του δεύτερου υλικού. Μια αντίστοιχη κατάσταση περιγράφεται από τους Alonso et al. (2015), οι οποίοι παρατήρησαν σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικές αποκλίσεις από την επιπεδότητα (flatness deviation) στην κατεργασμένη επιφάνεια και πρότειναν την διεξαγωγή της κατεργασίας σε περισσότερα στάδια ώστε να μειωθεί αποτελεσματικά η τραχύτητα επιφανείας αλλά και να μην επηρεαστεί η σκληρυμένη περιοχή.

Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να οφείλεται και στην αναμενόμενη φθορά του λειαντικού τροχού, λόγω των έντονων συνθηκών (βάθος κοπής) που υπήρχαν κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Να σημειωθεί επίσης ότι τα πειράματα διενεργήθηκαν με απουσία υγρού κοπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της διεργασίας της Σκλήρυνσης με Λείανση, με προοπτική να εισαχθεί και να βρει εφαρμογές στη βιομηχανία.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής μας οδηγούν σε ορισμένα συμπεράσματα τα οποία ενισχύουν την άποψη ότι η Σκλήρυνση με Λείανση μπορεί να αποτελέσει σημαντικό βοήθημα στη βιομηχανική παραγωγή χαλύβδινων εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται συγκεκριμένα εύρη των παραμέτρων της κατεργασίας που εξασφαλίζουν και τους δύο στόχους της, δηλαδή την επίτευξη αυξημένης σκληρότητας και μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του προϊόντος. Έτσι, ένα ακόμη συμπέρασμα είναι ότι το αποτέλεσμα της διεργασίας μπορεί να ελεγχθεί καθορίζοντας τις βασικές παραμέτρους της διεργασίας (βάθος κοπής, ταχύτητα πρόωσης).

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η διεργασία αυτή μπορεί να αυξήσει την επιφανειακή σκληρότητα χαλύβδινων εξαρτημάτων κατά ένα μεγάλο βαθμό ανάλογα με το κατά πόσο το επιτρέπει η σύσταση και η κρυσταλλική δομή του υλικού. (Τσίρμπας 2002)

Ο μηχανισμός που καθορίζει τη σκλήρυνση ή μη του υλικού, καθώς και την έκταση της σκληρυμένης ζώνης, είναι το εύρος του θερμοκρασιακού πεδίου που δημιουργείται στο επεξεργαζόμενο τεμάχιο. Με δεδομένο ότι το πάχος του εξαρτήματος είναι τέτοιο που επιτρέπει το φαινόμενο της «αυτοψύξης», η επιφανειακή σκληρότητα και το βάθος σκλήρυνσης επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους, τις οποίες ρυθμίζοντας κατάλληλα μπορούμε να ελέγξουμε το αποτέλεσμα. Έτσι:

1) Το αυξανόμενο βάθος κοπής, αυξάνει την παραγόμενη θερμότητα και κατά συνέπεια και το βάθος σκλήρυνσης.

2) Η επίπτωση της αύξησης της ταχύτητας πρόωσης εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως το βάθος κοπής, οι ιδιότητες του υλικού και η κατάσταση του λειαντικού τροχού. Γενικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία, όπως και στην περίπτωση μας, αύξηση της ταχύτητας πρόωσης οδηγεί σε μείωση του

βάθους σκλήρυνσης και μάλιστα όταν η τιμή της ταχύτητας ξεπεράσει κάποιο όριο δεν είναι πια δυνατή η επίτευξη σκλήρυνσης. Συγκεκριμένα, για τα εύρη παραμέτρων που μελετήσαμε το όριο αυτό ήταν περίπου τα 16.9 m/min.

3) Για κάθε σετ παραμέτρων της διεργασίας (βάθος κοπής και ταχύτητα πρόωσης) υπάρχει ένα μέγιστο βάθος διείδυσης της σκλήρυνσης. Η μέγιστη αυτή τιμή συσχετίζεται άμεσα με τη ροή θερμότητας η οποία προκαλεί αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας.

4) Η χρήση ομόρροπης ή αντίρροπης λείανσης στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δεν δημιουργεί συστηματικά εμφανείς διαφοροποιήσεις στο βάθος σκλήρυνσης και στις τιμές σκληρότητας που επιτυγχάνονται. Αυτό οφείλεται στο ότι η γραμμική ταχύτητα του λειαντικού τροχού είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ταχύτητα πρόωσης, γεγονός που οδηγεί επίσης σε αμελητέα διαφορά στην τιμή της θερμότητας που αναπτύσσεται κατά τη διεργασία σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Σαλωνίτης, 2006). Πιο συγκεκριμένα, καθώς θεωρείται ότι η θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την κατεργασία ισούται περίπου με τη μηχανική ισχύ που καταναλώνεται για την περιστροφή του λειαντικού τροχού, από τη σχέση:

$$P = F_t (u_s \pm u_w)$$

προκύπτει, ότι για u_s πολύ μεγαλύτερη από την u_w ο όρος $\pm u_w$ μπορεί πρακτικά να απαλειφθεί.

5) Από τις μετρήσεις τραχύτητας που διεξήχθησαν στα δοκίμια των πειραμάτων, προέκυψε ότι οι τιμές της μέσης τραχύτητας που επιτυγχάνονται για τις συνθήκες που μελετήθηκαν κυμαίνονται από 0.7-2 μm . Παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας στο υλικό 1 σε σχέση με το υλικό 2.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί, ότι η παρούσα μελέτη της διεργασίας έγινε με τη χρήση μιας συμβατικής μηχανής λείανσης, με περιορισμένο εύρος μεταβολής ταχυτήτων πρόωσης (μηχανή μικρής κλίμακας), ταχύτητες οι οποίες είναι γενικά επαρκείς για την κατεργασία της λείανσης, όχι όμως και για την επίτευξη της επιθυμητής σκλήρυνσης σε πειράματα σκλήρυνσης μέσω λείανσης. Αντιθέτως, στη βιβλιογραφία οι περισσότερες μελέτες διεξήχθησαν με μικρότερες ταχύτητες πρόωσης και μεγαλύτερα βάθη κοπής σε πολλές

περιπτώσεις καθώς χρησιμοποιήθηκαν μηχανές CNC με πολύ περισσότερες δυνατότητες, βιομηχανικού επιπέδου. Παρόλα αυτά έγινε δυνατός ο προσδιορισμός των συνθηκών (ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής) που μπορούν να οδηγήσουν οριακά σε επίτευξη της σκλήρυνσης.

Παράλληλα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, προτείνεται η χρήση διαφορετικών συνδυασμών συνθηκών κατεργασίας όπως βάθους κοπής και ταχύτητας πρόωσης για την περαιτέρω διερεύνηση των περιπτώσεων οριακής επίτευξης σκλήρυνσης καθώς και την χρήση άλλων ειδών λειαντικών τροχών, για την επίτευξη τόσο της αυξημένης σκληρότητας όσο και της επιθυμητής τραχύτητας επιφανείας που αποτελεί τον δεύτερο βασικό στόχο της κατεργασίας σκλήρυνσης μέσω λείανσης.

Στη συγκεκριμένη εργασία και σε κάθε δοκίμιο είτε με ομόρροπη είτε με αντίρροπη φορά της τράπεζας της λειαντικής μηχανής, πήραμε ένα μόνο πάσο σε κάθε πλευρά του δοκιμίου αλλά με μεγάλο βάθος κοπής. Ένα στοιχείο έρευνας σε μία επόμενη εργασία θα ήταν και η διερεύνηση των αποτελεσμάτων της Σκλήρυνσης με Λείανση, αν στις παραμέτρους της διεργασίας χρησιμοποιούσαμε μικρά βάθη κοπής αλλά πολλά πάσα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alonso U, Ortega N, Sanchez J A, Pombo I, Izquierdo B, Plaza S, Hardness control of grind-hardening and finishing grinding by means of area-based specific energy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 88, 2015, 24-33

Brinksmeier E, Brockhoff T, Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process, *Annals of the CIRP*, 45 (1), 1996, 283-286

Brockhoff T, Grind-Hardening: A Comprehensive View, *Annals of the CIRP*, 48 (7), 1999, 255-260

Chryssolouris G., Tsirbas K. and Zannis S., An experimental investigation of Grind Hardening, *Proceedings of the 34th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 2001, 121 – 123

Chryssolouris G. and Salonitis K. , Theoretical investigation of the grinding wheel effect on grind hardening process, *Proceedings of IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control*, Athens, Greece, 2004, 13 – 18

Chryssolouris G., Tsirbas K. and Salonitis K., An analytical, numerical and experimental approach to grind hardening, *SME Journal of Manufacturing Processes*, 7 (1), 2005, 1 – 9

HAN Zheng-tong, **ZHANG** Ning-Ju, **GAO** Ding, **YANG** Gang, Research into grinding hardening of microalloyed non-quenched and tempered steel, *J China Univ Mining & Technol*, 17(2), 2007, 238-241

Judong Liu, Wei Yuan, Songwei Huang, Zhilong Xu, Experimental Study on Grinding-hardening of 1060 Steel, *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, *Energy Procedia*, 16 (A), 2012, 103-108

Lavine A.S., Thermal Aspects of Grinding: The Effect of Heat Generation at the Shear Planes, *CIRP Annals*, 40, 1991, 343-345

Lavine A.S., An exact solution for surface temperature in down grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2000, 4447 – 4456

Li Jianping, Liu Songyong, Du Changlong, Experimental Research and Computer Simulation of Face Grind-hardening Technology, *Journal of Mechanical Engineering*, 59 (2), 2013, 81-88

Liu Ju-Dong, Zhuang Jie-Zhen, Xu Zhi-Long, Influence of feed speed on grind-hardened layer and its uniformity, 2014 International Conference on Mechanism Science and Control Engineering (MSCE 2014), 85-89

Malkin, S., 1989, "Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives", Ellis Horwood, Chichester

Salonitis K, Chondros T, Chryssolouris G, Grinding wheel effect in the grind-hardening process, Int J Adv Manuf Technol 38, 2008, 48-58

Salonitis K, Kolios A, Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 steel, Int J Adv Manuf Technol 79, 2015, 1443-1452

Zäh M E, Brinksmeier Z E, Heinzl Z C, Huntemann Z J-W, Föckerer Z T, Experimental and numerical identification of process parameters of grind-hardening and resulting part distortions, 2009 German Academic Society for Production Engineering (WGP)

Zarudi I. and Zhang L.C. "Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding", Journal of Materials Science, 37 (18), 2002, 3935 – 3943

Zhang Jianhua, Ge Peiqi, Jen Tien-Chien, Zhang Lei, Experimental and numerical studies of AISI1020 steel in grind-hardening, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 (3-4), 2009, 787-795

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Δ Ε, Σημειώσεις μαθήματος ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΙΙ

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Δ Ε, Σημειώσεις μαθήματος Τεχνικά Υλικά Ι

ΣΑΛΩΝΙΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Υπολογισμού της Κατανομής και του βάθους διείσδυσης σκλήρυνσης λόγω διεργασίας σκλήρυνσης μέσω λείανσης (GRIND – HARDENING), Διδακτορική Διατριβή, 2006

ΤΣΙΡΜΠΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της διεργασίας σκλήρυνσης δια λείανσεως, Διδακτορική Διατριβή, 2002

ΧΡΥΣΟΛΟΥΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ -ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΕΠΩΝΥΜΟ	Ζυγογιάννης
ΟΝΟΜΑ	Βασίλειος
ΠΑΤΡΩΝΥΜΟ	Κωνσταντίνος
ΜΗΤΡΩΝΥΜΟ	Τριάδα
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ	Παΐκου 8 16344 Ηλιούπολη
ΤΗΛΕΦΩΝΟ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ	210-9718036
ΤΗΛΕΦΩΝΟ ΚΙΝΗΤΟΥ	6942844482
E – mail	vzug17@otenet.gr
ΕΤΟΣ ΓΕΝΝΗΣΕΩΣ	1962
ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	Έγγαμος

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

2014	: Μεταπτυχιακό στο Ε.Μ.Π.
1997	: Πτυχίο ΠΑ.ΤΕ.Σ της ΣΕΛΕΤΕ.
1986	: Δίπλωμα Μηχανολόγου - Μηχανικού της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΙΔΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

- 2005 : Βεβαίωση Πιστοποίησης Δεξιοτήτων και Γνώσεων στις Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών, του ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ.(Επίπεδο 1).
- 2008 : Βεβαίωση Πιστοποίησης Δεξιοτήτων και Γνώσεων στις Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών, της ICT INTERMEDIATE B (Επίπεδο 2).

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

- 1997 - 2001 : Μηχανικός πωλήσεων στην GRUNDFOS ΕΛΛΑΣ Α.Ε.Β.Ε. (Υδραυλικά συστήματα).
- 1995 - 1997 : Μηχανικός πωλήσεων στην ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ν. ΚΑΖΗΣ Α.Β.Ε.Ε (Βιομηχανική και εμπορική εταιρεία αντλιών και λεβήτων).
- 1988 - 1995 : Μηχανικός πωλήσεων στην ΡΟΗ Α.Ε.Β.Ε. (Υδραυλικά συστήματα)

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

- 2002 – σήμερα : Μόνιμος εκπαιδευτικός στην Τεχνική Εκπαίδευση, στο Υπουργείο Παιδείας