



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Μελέτη της κατεργασίας σκλήρυνσης μέσω λείανσης με
αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Λαζάρου – Εμμανουήλ Παπάζογλου

Επιβλέπων: Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία εκπονήθηκε από το εργαστήριο κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σκοπό έχει να διερευνήσει την κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης. Ως «αυτοτελής» κατεργασία, τα τελευταία μόλις χρόνια προσέλκυσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας (οι πρώτες αναφορές στη βιβλιογραφία γίνονται το 1994), και εκπονήθηκαν σχετικές μελέτες και εργασίες. Κεντρική «ιδέα» είναι η αξιοποίηση της παραγόμενης κατά τη διαδικασία της λείανσης θερμότητας, ώστε να επιτευχθεί επιφανειακή σκλήρυνση του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, με βασική απαίτηση να είναι η ανάπτυξη θερμοκρασιών ίσες ή και υψηλότερες αυτών της ωστενιτοποίησης. Ως εκ τούτου απαιτείται λεπτομερής μελέτη ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες συνθήκες λείανσης, ώστε το τεμάχιο να αποκτήσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Για την ευκαιρία – δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημήτριο Μανωλάκο, ο οποίος και μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επίσης η καθοδήγηση του κ. Άγγελου Μαρκόπουλου, λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπήρξε καθοριστική στην επιτυχή ολοκλήρωση της. Τέλος εξαιρετικά πολύτιμη ήταν η βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Νίκου Κάρκαλου .

Στο σημείο αυτό πρέπει να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλα τα χρόνια των σπουδών μου, αλλά και τους φίλους μου, δίχως τους οποίους η ακαδημαϊκή καθημερινότητα θα ήταν εντελώς διαφορετική.

Περίληψη

Η διαδικασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης (grinding hardening), την οποία μελετάμε, είναι μια υβριδική και πολύπλοκη κατεργασία, η οποία επηρεάζεται από ένα σύνολο αλληλοεξαρτώμενων παραγόντων. Στόχος της κατεργασίας είναι, αξιοποιώντας την παραγόμενη θερμότητα λείανσης, να επιτευχθεί επιφανειακή σκλήρυνση στο τεμάχιο μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Έτσι βασική παράμετρος είναι η ανάπτυξη ενός επαρκούς θερμοκρασιακού προφίλ ώστε να έχουμε ωστενιτοποίηση, και η μετέπειτα ταχεία ψύξη για αύξηση της σκληρότητας. Η θερμοκρασιακή φόρτιση του τεμαχίου εξαρτάται από τη ροή θερμότητας προς αυτό, και το χρόνο επίδρασης της θερμικής πηγής (στην προκειμένη περίπτωση του λειαντικού τροχού). Και οι δύο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται από τις συνθήκες κοπής (βάθος κοπής, ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου, ταχύτητα κοπής), δεν συνδέονται όμως με μια απλή γραμμική συσχέτιση. Αύξηση της ταχύτητας πρόωσης, ή του βάθους κοπής συνεπάγεται αύξηση της ισχύος της κατεργασίας, όχι όμως απαραίτητα και ταυτόχρονη αύξηση της θερμικής ροής προς το τεμάχιο, η οποία εξαρτάται από παράγοντες όπως το υλικό του τεμαχίου, το μήκος επαφής, ο χρόνος επαφής κ.α.. Προκειμένου να μπορούμε να έχουμε μια ακριβή κατά το δυνατόν εκτίμηση του βάθους σκλήρυνσης (HPD), αλλά και της μέγιστης επιφανειακής σκληρότητας, απαιτείται προσεκτική και αναλυτική μοντελοποίηση της κατεργασίας. Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε προσέγγιση της κατεργασίας με αναλυτικές σχέσεις, για υλικά για τα οποία δεν υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις και βιβλιογραφικές αναφορές (AISI O1 και AISI D2). Προχωρήσαμε σε επίλυση των διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας με χρήση αριθμητικών μεθόδων, ενώ έγινε και επίλυση με χρήση υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS) προς επιβεβαίωση – διασταύρωση των αποτελεσμάτων. Με βάση τα θερμικά προφίλ (χρονική και χωρική κατανομή) των τεμαχίων και με χρήση διαγραμμάτων CCT και CHT, υπολογίστηκε το εκτιμώμενο βάθος σκλήρυνσης και η μέγιστη σκληρότητα. Τα αποτελέσματα εν συνεχεία συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται και μια ευρύτερη διερεύνηση για ένα σύνολο συνθηκών κοπής.

Abstract

Grinding hardening is a hybrid and complex process, influenced by a set of various interconnected factors. The main purpose of this process is to utilize the heat, which is produced by grinding and achieve surface hardening of the workpiece via martensitic transformation. So, the basic factors for a successful grinding-hardening process are the production of an adequate amount of heat, in order to achieve austenitization temperature, and the subsequent rapid cooling which causes an increase of the surface hardness of the workpiece. The temperature profile of the workpiece depends on the heat flow on it, and the duration of the heat source (in this case the abrasive wheel). Both of these factors depend on the process parameters (cutting depth, workpiece speed, cutting speed), but they are not associated with a simple linear correlation. Increasing the workpiece speed, or the cutting depth, gives rise to increased power consumption, but not necessarily to an increased heat flux on the workpiece, which depends on factors such as the workpiece material, the contact length, the duration of contact, etc. In order to have a precise estimation about the possible hardening depth (HPD), and the maximum surface hardness, a careful and detailed modeling of the process is required. In this particular diploma thesis, grinding hardening process for two materials, rarely studied in the relevant literature, namely AISI O1 and AISI D2 is studied. Heat transfer differential equations are solved using analytical methods, and secondly using a Finite Element software (ANSYS). Based on the temperature profile (time and spatial dependent) of the workpieces, and using CCT and CHT diagrams, the estimated hardened depth and the maximum hardness are calculated. The results are compared with experimental data, and further theoretical investigation for a wider range of cutting conditions is also performed.

Περιεχόμενα

Ονοματολογία	- 6 -
Δομή Εργασίας	- 9 -
Υλικά και Επιστήμη Υλικών [Ενότητα 1].....	- 12 -
Υλικά και επιστήμη των υλικών.....	- 12 -
Η ατομική δομή των υλικών.....	- 12 -
Χημικοί δεσμοί.....	- 13 -
Κρυσταλλική δομή	- 17 -
Μηχανική συμπεριφορά.....	- 22 -
Εφελκυσμός και Θλίψη (tensile & compressive properties)	- 22 -
Αντοχή σε διάτμηση.....	- 23 -
Αντοχή	- 23 -
Θραύση.....	- 23 -
Ερπυσμός.....	- 24 -
Κόπωση	- 24 -
Σκληρότητα.....	- 24 -
Κατεργασίες.....	- 27 -
Ταξινόμηση των κατεργασιών.....	- 27 -
Κατεργασία Λείανσης [Ενότητα 2]	- 29 -
Γενικά Στοιχεία	- 29 -
Είδη Λείανσης.....	- 30 -
Βασικά στοιχεία της κατεργασίας	- 32 -
Διαδικασία αποβολής υλικού	- 33 -
Βάθος κοπής.....	- 34 -
Ισοδύναμο πάχος αποβλήτου	- 35 -
Ρυθμός αποβολής υλικού και επιφάνεια επαφής	- 35 -
Ειδική ενέργεια.....	- 36 -
Δυνάμεις και ισχύς κατεργασίας.....	- 36 -
Λειαντικοί τροχοί.....	- 37 -
Κόκκοι λείανσης.....	- 37 -
Συνδετικό Υλικό	- 39 -
Διαδικασία Σκλήρυνσης [Ενότητα 3].....	- 40 -
Μηχανισμοί σκλήρυνσης – ισχυροποίησης.....	- 40 -
Σκλήρυνση με μαρτενιτικό μετασχηματισμό.....	- 41 -
Διάγραμμα Φάσεων.....	- 41 -

Διάγραμμα TTT και CCT.....	- 46 -
Μηχανισμός Σκλήρυνσης	- 48 -
Σκλήρυνση Μέσω Λείανσης [Ενότητα 4]	- 52 -
Παράμετροι Κατεργασίας	- 54 -
Παράμετροι Συστήματος.....	- 54 -
Παράμετροι διαδικασίας	- 57 -
Υπολογισμοί μέσω αναλυτικών σχέσεων [Ενότητα 5]	- 60 -
Τοπογραφία λειαντικού τροχού	- 60 -
Μεθοδολογία – Σχέσεις	- 60 -
Στοιχεία του λειαντικού τροχού που χρησιμοποιήθηκε.....	- 63 -
Δυνάμεις Κατεργασίας.....	- 64 -
Δύναμη ολίσθησης.....	- 64 -
Δύναμη κοπής.....	- 66 -
Παραγωγή και επιμερισμός θερμότητας.....	- 68 -
Αποτελέσματα Αναλυτικών Λύσεων [Ενότητα 6]	- 72 -
Αναλυτικό Μοντέλο	- 77 -
Υπολογισμοί Με Πεπερασμένα Στοιχεία [ANSYS] [Ενότητα 7]	- 85 -
ANSYS	- 87 -
Υπολογισμός Σκληρότητας και Βάθους Σκλήρυνσης [Ενότητα 8]	- 96 -
Ικανότητα Σκλήρυνσης (Hardenability).....	- 96 -
Βάθος σκλήρυνσης	- 98 -
Ικανότητα Σκλήρυνσης Επιφανειακών Στρωμάτων με Κατεργασίες Μικρής Διάρκειας.....	- 98 -
Έλεγχος Μοντελοποίησης	- 100 -
Υπολογισμός Βάθους Σκλήρυνσης για τα υλικά AISI O1 & AISI D2 (HPD)	- 103 -
Επαλήθευση αποτελεσμάτων	- 107 -
Ευρύτερη διερεύνηση [Ενότητα 9].....	- 109 -
Χρήση Υγρού Κοπής.....	- 109 -
Επέκταση Υπολογισμών	- 115 -
Συμπεράσματα [Ενότητα 10]	- 117 -
Βιβλιογραφία	- 120 -
Web.....	- 121 -

Ονοματολογία

A_a = πραγματική επιφάνεια επαφής [mm^2]

A_{c1s} = Θερμοκρασία έναρξης ωστενιτοποίησης

A_{c1f} = Θερμοκρασία ολοκλήρωσης ωστενιτοποίησης

A_g = μέση επιφάνεια ολίσθησης ανά κόκκο [mm^2]

a_e = βάθος κοπής [mm]

b = πάχος λειαντικού τροχού [mm]

C_f = θερμοχωρητικότητα υγρού κοπής $\left[\frac{J}{kg * K} \right]$

c = θερμοχωρητικότητα τεμαχίου $\left[\frac{J}{kg * K} \right]$

D = διάμετρος εντυπωτή σε [mm]

d = διάμετρος αποτυπώματος σε [mm]

\bar{d} = μέσος όρος διαγωνίων αποτυπώματος σε [mm]

d_e = ισοδύναμη διάμετρος λειαντικού τροχού [mm]

d_g = μέση διάσταση κόκκου [mm]

d_s = διάμετρος λειαντικού τροχού [mm]

d_w = διάμετρος προς κατεργασία τεμαχίου [mm]

e_{ch} = ειδική ενέργεια που μεταφέρεται από τα απόβλητα της λείανσης $\left[\frac{J}{mm^3} \right]$

F = φορτίο σε [kp]

F_t = ολική εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης της κατεργασίας [N]

$F_{t,c}$ = εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης κοπής [N]

$F_{t,ch}$ = εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης σχηματισμού αποβλήτων [N]

$F_{t,pl}$ = εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης πλαστικής παραμόρφωσης [N]

$F_{t,sl}$ = εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης ολίσθησης [N]

h_f = συντελεστής μετάδοσης θερμότητας $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

k = θερμική αγωγιμότητα $\left[\frac{W}{m * K} \right]$

$k_f = \text{θερμική αγωγιμότητα υγρού κοπής} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

$k_1 = \text{εμπειρική παράμετρος} = 2.58 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{mm} \right]$

$k_2 = \text{εμπειρική παράμετρος} = 35 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$

$l_c = \text{μήκος τόξου επαφής λειαντικού τροχού - τεμαχίου} [mm]$

$l_{wf} = \frac{2}{3} * d_g = \text{ισοδύναμη διάμετρος της επιφάνειας ολίσθησης} [mm]$

$M = \text{τυποποιημένη διάσταση κόκκων λειαντικού τροχού}$

$n = 1,2,3,4 \dots \text{αντιστοιχεί στη σκληρότητα του λειαντικού τροχού (E, F, G, H \dots)}$

$n_a = \text{ενεργοί κόκκοι λειαντικού τροχού}$

$n_s = \text{στατικοί κόκκοι λειαντικού τροχού}$

$P = \text{ισχύς περιστροφής του λειαντικού τροχού} [W]$

$p_m = \text{μέση πίεση επαφής κόκκων στην επιφάνεια του τεμαχίου} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$

$r = \text{ατομική ακίνα}$

$S = \text{αριθμός της δομής λειαντικού τροχού}$

$q_f = \text{θερμική ροή προς το υγρό κοπής} \left[\frac{W}{m^2} \right]$

$q_s = \text{ροή θερμότητας προς το λειαντικό τροχό} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$

$q_t = \text{παραχθήσα ροή θερμότητας} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$

$q_w = \text{ροή θερμότητας προς το τεμάχιο} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$

$q_{ch} = \text{ροή θερμότητας προς τα απόβλητα} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$

$R_{ch} = \text{λόγος επιμερισμού θερμότητας από τα απόβλητα}$

$R_{ws} = \text{λόγος επιμερισμού θερμότητας ανάμεσα σε τεμάχιο και λειαντικό τροχό}$

$T_o = \text{θερμοκρασία περιβάλλοντος} [^{\circ}C]$

$T_{mp} = \text{θερμοκρασία τήξεως τεμαχίου} [^{\circ}C]$

$u_c = \text{ειδική ενέργεια κοπής} \left[\frac{J}{mm^3} \right]$

$u_s = \text{ταχύτητα περιστροφής λειαντικού τροχού} \left[\frac{m}{sec} \right]$

$u_w = \text{ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου} \left[\frac{m}{sec} \right]$

$u_{ch} = 13.8 = \text{ειδική ενέργεια σχηματισμού αποβλήτων} \left[\frac{J}{mm^3} \right]$

$V_b = \text{ογκομετρική συγκέντρωση συνδετικού υλικού λειαντικού τροχού}$

$V_g = \text{ογκομετρική συγκέντρωση κόκκων λειαντικού τροχού}$

$V_p = \text{ογκομετρική συγκέντρωση πόρων λειαντικού τροχού}$

$\beta_s = \sqrt{k_s * \bar{\rho}_s * \bar{C}_s} = \text{μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λειαντικού τροχού} \left[\frac{J}{m^2 * s * K} \right]$

$\beta_w = \sqrt{k_w * \rho_w * C_w} = \text{μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας τεμαχίου} \left[\frac{J}{m^2 * s * K} \right]$

$\Delta = \text{διαφορά καμπυλότητας} [mm^{-1}]$

$\Delta T_{max} = \text{μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά τεμαχίου και υγρού κοπής} [K]$

$\eta_f = \text{δυναμική συνεκτικότητα υγρού κοπής} \left[\frac{kg}{m * sec} \right]$

$\mu = \text{συντελεστής τριβής μεταξύ κόκκων και τεμαχίου}$

$\rho = \text{πυκνότητα τεμαχίου}$

$\rho_f = \text{πυκνότητα υγρού κοπής} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$\tau = \text{αριθμός ατόμων στοιχειώδους κυττάρου}$

$\varphi = \frac{A_\alpha}{l_c * b} = \text{επιφανειακό πορώδες σύνθετου υλικού}$

$\Phi_{ref.} = \text{λόγος αναφοράς (3.8\%)}$

Δομή Εργασίας

- **Ενότητα 1^η: Υλικά και επιστήμη υλικών:** Στην 1^η ενότητα της εργασίας γίνεται μια σύντομη αναφορά σε γενικές και θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με τα μεταλλικά κυρίως υλικά. Υπάρχει μια σύντομη αναφορά στην ατομική δομή των υλικών, στους χημικούς δεσμούς τους οποίους διακρίνουμε σε ισχυρούς (ιοντικοί, ομοιοπολικοί, μεταλλικοί) και ασθενείς (προσωρινά δίπολα, δυνάμεις Van der Waals, δεσμοί υδρογόνου). Στην συνέχεια αναφερόμαστε στην κρυσταλλική δομή που συναντούμε στα μεταλλικά στοιχεία, με απλή αναφορά σε πολυκρυσταλλικά μέταλλα και σε “metal glasses”. Συνεχίζουμε με την παρουσίαση (εν συντομία) των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών (εφελκυσμός και θλίψη, αντοχή σε διάτμηση, αντοχή, αντοχή θραύση, ερπυσμός, κόπωση και σκληρότητα) και τις μεθόδους υπολογισμού σκληρότητας (Brinell, Rockwell, Vickers). Η 1^η ενότητα ολοκληρώνεται με ταξινόμηση των κατεργασιών κατά DIN, με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό, την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία κατεργασίας, και την εντατική κατάσταση του τεμαχίου.
- **Ενότητα 2^η: Κατεργασία λείανσης:** Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η κατεργασία της λείανσης (ως «κλασική κατεργασία»). Παρουσιάζονται τα είδη λείανσης ανάλογα με τη δυναμική – γεωμετρία των τεμαχίων και τα βασικά στοιχεία που ορίζουν την κατεργασία (τεμάχιο, εργαλειομηχανή, δυναμική της κατεργασίας, λειαντικός τροχός, υγρό λείανσης, περιβάλλον λείανσης). Συνεχίζουμε με αναλυτική παρουσίαση των παραμέτρων της κατεργασίας (αποβολή υλικού, βάθος κοπής, ισοδύναμο πάχος αποβλήτου, ρυθμός αποβολής υλικού και επιφάνεια επαφής, ειδική ενέργεια, δυνάμεις και ισχύς κατεργασίας). Τέλος υπάρχει μια κατηγοριοποίηση και μελέτη των λειαντικών τροχών ως προς τους κόκκους λείανσης (Superabrasives, συμβατικά υλικά) και το συνδεδετικό υλικό.
- **Ενότητα 3^η: Διαδικασία σκλήρυνσης:** Στην ενότητα αυτή αναφερόμαστε στον σκοπό της κατεργασίας, δηλαδή την αύξηση της σκληρότητας του υλικού επιφανειακά. Αρχικά γίνεται μια περιορισμένη αναφορά γενικά στους μηχανισμούς σκλήρυνσης. Στη συνέχεια επικεντρωνόμαστε στη σκλήρυνση μέσω μαρτενιτικού μετασχηματισμού. Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αυτός αναλύουμε τα διαγράμματα φάσεων και ισορροπίας φάσεων, με αναλυτική παρουσίαση του διαγράμματος ισορροπίας Fe – C. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα TTT (temperature – time transformation) και CCT (continuous cooling transformation). Κλείνοντας γίνεται η παρουσίαση του μαρτενιτικού μετασχηματισμού, με αναλυτική παρουσίαση των «μηχανισμών» που λαμβάνουν χώρα στο υλικό ώστε να αυξάνεται η σκληρότητα του.
- **Ενότητα 4^η: Σκλήρυνση μέσω λείανσης:** Στην ενότητα αυτή «συνδέουμε» την κατεργασία της λείανσης με την αύξηση σκληρότητας υλικού μέσω της αξιοποίησης της παραγόμενης από την κατεργασία θερμότητας. Έπειτα από την παρουσίαση πλεονεκτημάτων της υβριδικής αυτής κατεργασίας, παρουσιάζονται και αναλύονται οι παράμετροι που την ορίζουν. Διαχωρίζονται σε παράμετροι συστήματος (υλικό τεμαχίου, γεωμετρία τεμαχίου, λειαντικός τροχός) και παράμετροι διαδικασίας (βάθος κοπής, ταχύτητα πρόωσης, ταχύτητα κοπής). Τέλος στην ενότητα αυτή υπάρχει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα συμπεράσματα ερευνητών σχετικά με το πώς οι προαναφερθείσες παράμετροι επηρεάζουν την κατεργασία.

- **Ενότητα 5^η: Υπολογισμός μέσω αναλυτικών σχέσεων:** Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για την «μοντελοποίηση» της κατεργασίας. Αρχικά με ημι – εμπειρικές σχέσεις υπολογίζουμε τα στοιχεία του λειαντικού τροχού (με βάση τα πρότυπα τυποποίησης του). Εν συνεχεία μέσω αναλυτικών σχέσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις κατεργασίας (δύναμη κοπής, δύναμη ολίσθησης) και μέσω αυτών την ισχύ της κατεργασίας. Τέλος υπολογίζεται ο επιμερισμός της θερμότητας ανάμεσα στο τεμάχιο, τον τροχό και τα απόβλητα κατεργασίας.
- **Ενότητα 6^η: Αποτελέσματα αναλυτικών λύσεων:** Στην ενότητα αυτή γίνεται επίλυση του «μοντέλου» μας με χρήση αναλυτικών σχέσεων. Μέσω της αναλυτικής λύσης που προτείνεται από τη βιβλιογραφία υπολογίζουμε το θερμοκρασιακό προφίλ των τεμαχίων για τις διάφορες συνθήκες κατεργασίας. Ως «input» χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις σχέσεις – μεθοδολογία της προηγούμενης ενότητας (ενότητα 5^η), κάνοντας ταυτόχρονα κάποιες απαραίτητες παραδοχές. Από το σύνολο των αποτελεσμάτων μας εστιάζουμε κυρίως στις μέγιστες θερμοκρασίες που παρατηρούνται, στην καθ ύψος κατανομή θερμοκρασίας, και στην χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας (κυρίως ψύξη) των τεμαχίων.
- **Ενότητα 7^η: Υπολογισμοί με πεπερασμένα στοιχεία (ANSYS):** Στην ενότητα αυτή γίνεται προσομοίωση της κατεργασίας με χρήση υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS). Αρχικά «μοντελοποιούμε» την κατεργασία μας (τεμάχιο και κινούμενη τριγωνική πηγή θερμότητας), επιλέγουμε παραμέτρους υπολογισμού (πλέγμα, χρονικό βήμα επίλυσης, ακρίβεια επίλυσης) και εισάγουμε τα δεδομένα μας, σύμφωνα με όσα υπολογίστηκαν στην Ενότητα 5, και τιμές από τη βιβλιογραφία (ροή θερμότητας, οριακές συνθήκες ιδιότητες υλικών). Τα αποτελέσματα από την επίλυση συγκρίνονται με αυτά της αναλυτικής λύσης ως ένδειξη για την ορθότητα μοντελοποίησης και επίλυσης της κατεργασίας μας.
- **Ενότητα 8^η: Υπολογισμός σκληρότητας και HPD:** Στην ενότητα αυτή γίνεται ο υπολογισμός της επιφανειακής σκληρότητας που αναμένουμε να έχουμε, και του βάθους σκλήρυνσης (HPD). Με βάση το θερμοκρασιακό προφίλ που έχει υπολογιστεί και με χρήση διαγραμμάτων CCT και CHT για τα υλικά μας, βρίσκουμε το οριακό βάθος όπου η θερμοκρασία ισούται με την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (A_{c3}), και έτσι ορίζουμε το HPD. Βέβαια η κατεργασία παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες και έτσι για να έχουμε κατά το δυνατόν ακριβή αποτελέσματα πρέπει να ανατρέξουμε στη βιβλιογραφία, προκειμένου να «αντλήσουμε» περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες και τη «συμπεριφορά» των υλικών σε κατεργασίες short – zero time.
- **Ενότητα 9^η: Ευρύτερη διερεύνηση:** Στην ενότητα αυτή γίνεται μια καθαρά θεωρητική μελέτη για την κατεργασία μας σε ένα σύνολο συνδυασμών για διαφορετικές συνθήκες βάθους κοπής και πρόωσης (χαμηλότερες ταχύτητες πρόωσης και περισσότερα βάθη κοπής), ενώ μελετάται και η περίπτωση χρήσης υγρού κοπής. Καθώς δεν αποτελεί κύριο θέμα της εργασίας, περιοριζόμαστε σε μια ποιοτική εκτίμηση δίχως να εντυπώσουμε με πειραματικά δεδομένα η εκτενείς αναφορές. Από σχέσεις της βιβλιογραφίας υπολογίζουμε νέες θερμικές ροές (λόγω απομάκρυνσης θερμότητας μέσω του υγρού κοπής), και χρησιμοποιώντας αυτές ως «input» υπολογίζουμε τα θερμικά προφίλ των τεμαχίων μας, τόσο με χρήση αναλυτικών σχέσεων (ενότητας 6), όσο και με χρήση του υπολογιστικού πακέτου (ενότητας 7).

- **Ενότητα 10^η: Συμπεράσματα:** Πρόκειται για μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας μας, και επισήμανση των σημείων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και χρήζουν της προσοχής του αναγνώστη.

Υλικά και Επιστήμη Υλικών

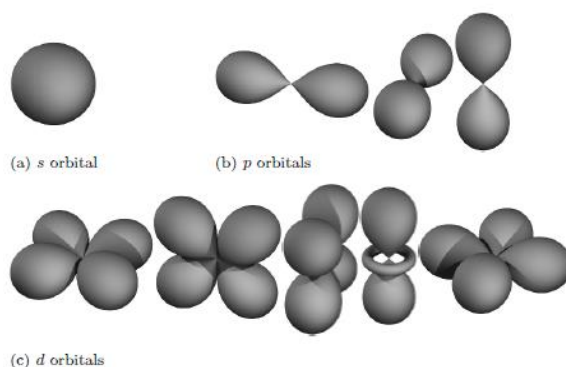
[Ενότητα 1]

Υλικά και επιστήμη των υλικών

Με σκοπό την πληρότητα, θεωρείται απαραίτητο να γίνει αρχικά μια κατά το δυνατόν σύντομη αναφορά σε βασικές – δομικές γνώσεις σχετικά με τα υλικά, την επιστήμη των υλικών, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους, οι οποίες και τελικά καθορίζουν – υπαγορεύουν τόσο τις κατεργασίες όσο και τα αποτελέσματα αυτών.

Η ατομική δομή των υλικών

Η μορφή του ατόμου (προχωρώντας φυσικά σε κάποιες απαραίτητες απλοποιήσεις) είναι ένας πυρήνας θετικά φορτισμένος ο οποίος και «συγκεντρώνει» το σύνολο σχεδόν της μάζας του ατόμου, και ηλεκτρόνια τα οποία «περιστρέφονται» γύρω από αυτόν και έχουν αρνητικό φορτίο. Τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα έχοντας ίδιο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια δεν περιστρέφονται «άτακτα» γύρω από το πυρήνα, αλλά εντοπίζονται - περιορίζονται σε «κελύφη» (electron shells), τα οποία έχουν συγκεκριμένες διατάξεις γύρω από το πυρήνα με σταδιακή απομάκρυνση από αυτόν. Βασικές αρχές είναι ότι σε κάθε «κελί» αντιστοιχεί συγκεκριμένος μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από το πυρήνα τόσο αυξάνεται η ενεργειακή στάθμη των ηλεκτρονίων και άρα τόσο πιο «χαλαρά» συνδεδεμένα με τον πυρήνα είναι. Φυσικά ισχύει ότι δεν μπορούμε να εντοπίσουμε την ακριβή θέση ενός ηλεκτρονίου παρά μόνο την πιθανότητα να βρίσκεται κάπου σχηματίζοντας έτσι τα λεγόμενα «τροχιακά» (orbital), τα οποία και έχουν διαφορετικές γεωμετρίες (στα πλαίσια της παρούσης εργασίας δεν θεωρείται σκόπιμο να επεκταθούμε τόσο πολύ). Κάθε «κέλυφος» μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από ένα «τροχιακά», σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχούν το πολύ δύο ηλεκτρόνια (Pauli exclusion principle). Λόγω της αρχής της ελαχίστης ενέργειας, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν – συμπληρώνουν τα «κελύφη» ξεκινώντας από τα πλησιέστερα στον πυρήνα (με την μικρότερη ενεργειακή στάθμη), ενώ ισχύει ότι είναι «ενεργειακά προτιμότερο» ένα «συμπληρωμένο κελί» (2 ηλεκτρόνια ανά κελί). Τέλος πρέπει να αναφερθεί η εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα των ηλεκτρονίων να «αυξάνουν» την ενέργειά τους όσο πιο «χωρικά περιορισμένα» είναι. Στην ιδιότητα αυτή οφείλονται ουσιαστικά οι δομές που σχηματίζουν τα άτομα.



Σχηματική απόδοση για ορισμένες «τροχιές»
[Σχήμα 1.1]

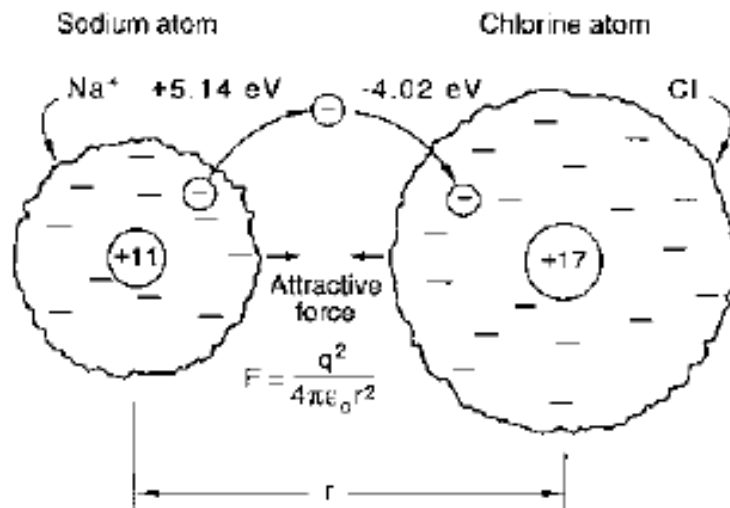
Χημικοί δεσμοί

Μπορούμε να κατατάξουμε τους χημικούς δεσμούς σε δύο είδη: τους «ισχυρούς χημικούς δεσμούς» και τους «ασθενείς χημικούς δεσμούς». Οι ισχυροί (εναλλακτικά ονομάζονται και πρωτογενείς χημικοί δεσμοί (primary bonds)) είναι ιοντικοί, ομοιοπολικοί, ή μεταλλικοί και συνεπάγονται τη δημιουργία άκαμπτων υλικών – στερεών. Οι ασθενείς χημικοί δεσμοί είναι οι δυνάμεις Van der Waals' και τα «προσωρινά δίπολα» (temporary dipoles). Και οι ισχυροί αλλά και οι ασθενείς χημικοί δεσμοί είναι εξαιρετικής σημασίας για τα υλικά, με τους ασθενείς μάλιστα να επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά ορισμένων υλικών παρά το ότι είναι τάξης μεγέθους ασθενέστεροι.

Ισχυροί χημικοί δεσμοί

Ιοντικοί

Οι ιοντικοί δεσμοί εμφανίζονται ως αποτέλεσμα των ελκτικών δυνάμεων Coulomb οι οποίες αναπτύσσονται ανάμεσα σε θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Τα ιόντα προκύπτουν είτε από τη «αποβολή ηλεκτρονίων» (ανιόν), είτε με την «πρόσληψη ηλεκτρονίων» (κατιόν). Και στις δύο περιπτώσεις οι δομές που εμφανίζονται – επιτυγχάνονται είναι σταθερότερες των αρχικών, με την «αποτελεσματικότερη» συμπλήρωση των εξωτερικών «κελυφών» με ηλεκτρόνια. Υλικά με ιοντικούς δεσμούς έχουν υψηλά σημεία τήξης διότι χρειάζεται μεγάλο ποσό ενέργειας (θερμικής) για να «καταστρέψει» δομές που βασίζονται σε ιοντικούς δεσμούς (οι τυπικές τιμές ενέργειας για ιοντικούς δεσμούς κυμαίνονται από 40 έως 200 kcal/mol). Τέλος οι ιοντικοί δεσμοί δεν έχουν κάποια κατεύθυνση κατά την οποία ασκούνται (non-directional) και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να «σπάσουν» κατά την «ολίσθηση» που λαμβάνει χώρα μετά την πλαστική παραμόρφωση, δημιουργώντας έτσι υλικά σχετικά «ψαθυρά» (brittle) τα οποία επιδέχονται πολύ μικρές πλαστικές παραμορφώσεις.



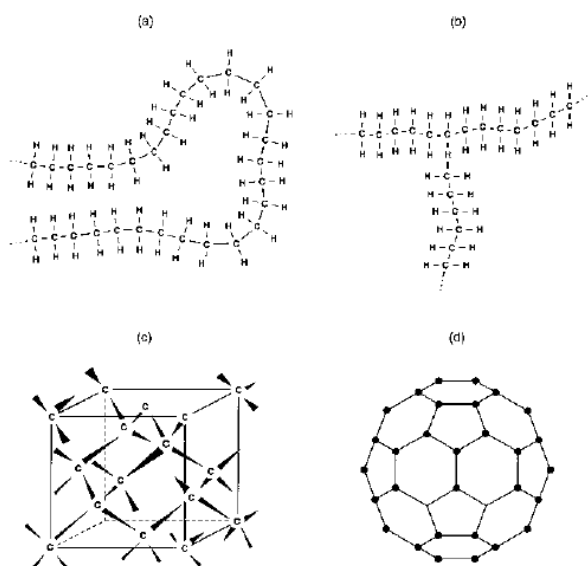
*Σχηματική παρουσίαση ενός ιοντικού δεσμού ανάμεσα σε ένα ιόν χλωρίου (Cl) και σε ένα ιόν νατρίου (Na), τα οποία σχηματίζουν ένα μόριο χλωριούχου νατρίου (NaCl)
[Σχήμα 1.2]*

Ομοιοπολικοί

Ένα ακόμα «είδος» ισχυρού χημικού δεσμού είναι ο ομοιοπολικός, ο οποίος δημιουργείται μεταξύ ατόμων τα οποία έχουν σχεδόν πλήρως συμπληρωμένα τα «εξωτερικά κελύφη ηλεκτρονίων» τους. Με σκοπό να επιτευχθεί χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, και άρα πιο στέρεα δομή, «μοιράζονται» ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε εξωτερικά κελύφη και συμπληρώνουν έτσι τα κενά που υπάρχουν. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται δεσμοί με ενέργεια ανάμεσα σε 30 και 300 kcal/mol και δομές γραμμικές (μονοδιάστατος δεσμός) ή χωρικές (τρεις διαστάσεις).

«Γραμμικούς» σχηματισμούς έχουμε όταν τα άτομα «μοιράζονται» δύο ηλεκτρόνια (ένα από κάθε άτομο). Αλυσίδες από τέτοιους δεσμούς δημιουργούν τα άτομα άνθρακα, για παράδειγμα, καθώς ενώνονται με άτομα υδρογόνου, είτε σε μια «μοναδική» αλυσίδα είτε με «κλάδους». Τρισδιάστατες δομές έχουμε στην περίπτωση των διαμαντιών (πρόσφατα ανακαλύφθηκαν εκτός από κυβικές δομές και σφαιροειδείς).

Οι ομοιοπολικοί δεσμοί χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη κατεύθυνση στην οποία ασκούνται. Αποτέλεσμα της «επιμήκυνσης» και της «περιστροφής» (stretching and rotting of bonds) των δεσμών αυτών, είναι η ελαστικότητα που παρουσιάζουν τα πολυμερή. Υπό την επίδραση φορτίου, οι αλυσίδες που έχουν δημιουργηθεί «ξετυλίνονται», αυξάνοντας έτσι τα όρια της ελαστικής παραμόρφωσης. Αύξηση στο όριο ελαστικότητας προκαλεί η αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία επιδρά στην εντροπία των δεσμών κατά την «επιμήκυνσή» τους. Υλικά με ομοιοπολικούς δεσμούς παρουσιάζουν πλαστικές παραμορφώσεις όταν οι σχηματισμένες αλυσίδες ατόμων «ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη». Οι πλαστικές παραμορφώσεις είναι εξαιρετικά «δύσκολες» σε τρισδιάστατες δομές λόγω της εγγενούς αντίστασης που παρουσιάζουν σε παραμορφώσεις. Τέλος υλικά στα οποία σχηματίζονται κλάδοι στις αλυσίδες εμφανίζουν περιορισμένη δυνατότητα παραμόρφωσης.

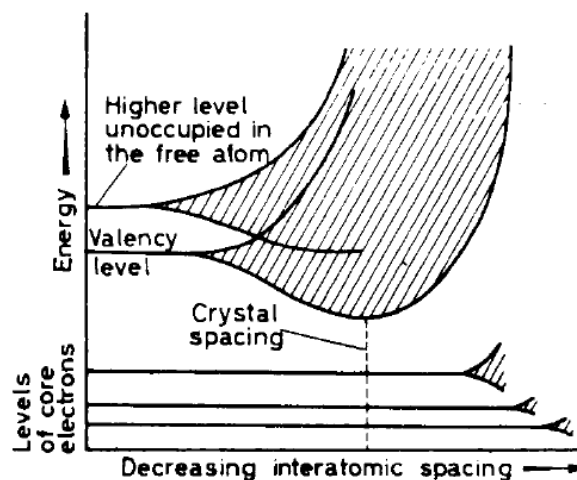


Σχηματισμοί ατόμων τα οποία συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς (α) και (β) αλυσίδες ατόμων, (c) και (d) τρισδιάστατες δομές [Σχήμα 1.3]

Μεταλλικοί δεσμοί

Οι μεταλλικοί δεσμοί είναι το τρίτο είδος ισχυρών χημικών δεσμών. Η θεωρητική βάση για τη θεμελίωσή τους στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως Drude – Lorentz theory. Ο μεταλλικός δεσμός μπορεί να περιγραφεί ως το αποτέλεσμα ηλεκτροστατικών δυνάμεων ανάμεσα σε θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και ένα «νέφος» μετατοπισμένων ηλεκτρονίων (sea or gas of delocalized electrons). Παρατηρώντας τον περιοδικό πίνακα στοιχείων βλέπουμε ότι τα μέταλλα διακρίνονται για το χαρακτηριστικά μικρό αριθμό ηλεκτρονίων στα εξωτερικά «κελύφη». Για να τα συμπληρώσουν πλήρως, και να επιτευχθεί η ενεργειακή σταθερότητα απαιτείται μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων. Έτσι τα ηλεκτρόνια κινούνται σε μια «ευρύτερη» περιοχή, και ουσιαστικά τα άτομα «μοιράζονται» τον απαραίτητο αριθμό ηλεκτρονίων για να συμπληρώσουν τα εξωτερικά τους «κελύφη». Αυτός είναι και ο λόγος που αναφερόμαστε σε «νέφος» ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται σχεδόν ελεύθερα, «δίνοντας» στα μεταλλικά υλικά την χαρακτηριστική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα τους. Η ενέργεια σύνδεσης είναι σχετικά χαμηλή σε σχέση με αυτή των ιοντικών και ομοιοπολικών δεσμών. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε χαμηλότερα σημεία τήξης, ενώ η «ευκολότερη» μετατόπιση ατόμων μέσα στο πλέγμα εξηγεί και την δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων.

Εδώ είναι απαραίτητο να σημειώσουμε ότι: λόγω του μικρού αριθμού ηλεκτρονίων που συνεισφέρει το κάθε άτομο, για να συμπληρωθούν τα «κελιά», πρέπει να σχηματιστούν δομές τέτοιες ώστε κάθε άτομο να είναι «περιτριγυρισμένο» από άλλα άτομα, δημιουργώντας έτσι τρισδιάστατα «πλέγματα». Η απόσταση των ατόμων, και κατ' επέκταση η δομή του πλέγματος, καθορίζεται από την ισορροπία ενέργειας ανάμεσα στη μείωση της «μέσης ενέργειας των ηλεκτρονίων», και την αύξηση των απωστικών δυνάμεων Coulomb καθώς μειώνεται η απόσταση των πυρήνων. Τα πλέγματα στα οποία αναφερθήκαμε και είναι αποτέλεσμα των μεταλλικών δεσμών θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.



Διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή της ενέργειας του ατόμου (πυρήνα και ηλεκτρονίων), συναρτήσει της απόστασης των ατόμων μεταξύ τους. Παρατηρούμε ότι στο σημείο που επιτυγχάνεται η ελάχιστη ενέργεια είναι και το σημείο κρυσταλλοποίησης.

[Σχήμα 1.4]

Ασθενείς χημικοί δεσμοί

Προσωρινά δίπολα (temporary dipoles)

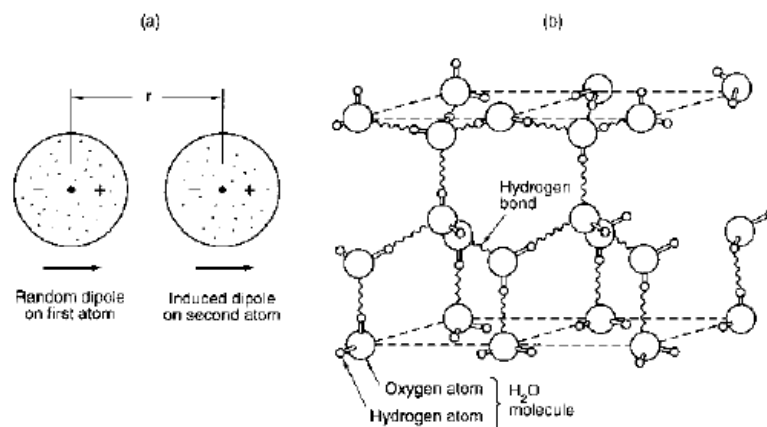
Καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από πυρήνες αρχικά ουδέτερων ατόμων, τα οποία συνδέονται με κάποιου είδους δεσμό, είναι ατίθανο να υπάρχει συνεχώς απόλυτη ομοιομορφία κατανομής των ηλεκτρονίων που «μοιράζονται» οι προαναφερθέντες πυρήνες. Έτσι εμφανίζονται μικρές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, οι οποίες όμως είναι εξαιρετικά ασθενείς. Χαρακτηριστικά κυμαίνονται από 0.2 έως 0.4 eV ανά δεσμό. Τέτοιους δεσμούς έχουμε στα κεραμικά υλικά, και έχουν ιδιαίτερη σημασία στο σχηματισμό – σύνδεση πολυμερών.

Δυνάμεις van der Waals

Και οι δυνάμεις Van der Waals είναι ηλεκτροστατικής φύσεως, και ασκούνται ανάμεσα σε απολύτως ηλεκτρικά ουδέτερα άτομα (όπως είναι για παράδειγμα τα άτομα του οξυγόνου ή αυτά των ευγενών αερίων). Είναι ακόμα πιο ασθενείς από αυτές των ηλεκτρικών δίπολων με τιμές να κινούνται από 0.01 έως 0.1 eV ανά δεσμό. Οι δυνάμεις Van der Waals επιδρούν περισσότερο σε «μεγάλα» άτομα καθώς το «ψευδοδίπολο» που σχηματίζεται έχει μεγαλύτερη αδράνεια. Τέλος οι δεσμοί αυτοί επιδρούν στην αποκλίνουσα από «τέλειο αέριο» συμπεριφορά των αερίων, καθώς και στις ιδιότητες συμπύκνωσης και στερεοποίησης των υλικών.

Δεσμοί υδρογόνου

Οι δεσμοί υδρογόνου είναι αποτέλεσμα μόνιμων δίπολων που σχηματίζονται στα μόρια νερού. Η υψηλή ηλεκτραρνητικότητα που εμφανίζουν τα άτομα του οξυγόνου, τείνει να «έλκει περισσότερο» τα ηλεκτρόνια που «μοιράζονται» τα άτομα υδρογόνου και οξυγόνου σε ένα μόριο νερού. Έτσι με ελαφρώς αρνητικό φορτίο τα άτομα οξυγόνου, και αντίστοιχα ελαφρώς θετικό αυτά του υδρογόνου, σχηματίζεται ένα μόνιμο ηλεκτρικό δίπολο. Η ενέργεια σύνδεσης είναι μικρή και κυμαίνεται από 0.1 έως 0.3 eV ανά δεσμό, όμως επιδρά αρκετά ώστε το νερό να είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σε υγρή μορφή, ενώ παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση, σε συνθήκες περιβάλλοντος, της στερεής μορφής ορισμένων πολυμερών.



Σχηματική αναπαράσταση ενός (α) προσωρινού δίπολου/δεσμού Van der Waals και (β) δεσμού υδρογόνου
[Σχήμα 1.5]

Κρυσταλλική δομή

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφερθήκαμε σε «δομές» που σχηματίζουν τα άτομα προκειμένου να επιτύχουν ενεργειακή σταθερότητα. Οι δομές αυτές στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν είναι τυχαίες αλλά ακολουθούν συγκεκριμένα «μοτίβα»

Μέταλλα

Στα μέταλλα «στόχος» είναι μια διάταξη η οποία θα διευκολύνει τον «διαμοιρασμό» των ηλεκτρονίων για τη συμπλήρωση των εξωτερικών κελίων. Αποδεικνύεται ότι αυτό επιτυγχάνεται με μια πυκνή διάταξη των ατόμων, και με συγκεκριμένο τρόπο.

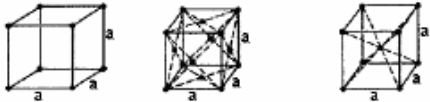
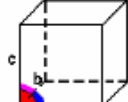



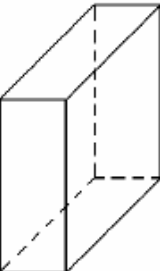

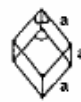

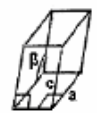
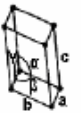
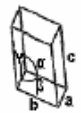
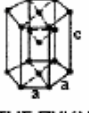
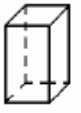
Ο μαθηματικός ορισμός της κρυσταλλικής δομής είναι: μια τρισδιάστατη κατανομή σημείων η οποία από οποιαδήποτε σημείο της και αν την «κοιτάξουμε» παραμένει ακριβώς ίδια (τριπλή περιοδικότητα). Στην περίπτωση που μελετάμε, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε σε κάθε προαναφερθέν σημείο και ένα άτομο. Ένα κρυσταλλικό πλέγμα (lattice), δημιουργεί μια τοπική, αλλά και μακροσκοπική «τάξη» (short – range, long – range order), και καθ' αυτό τον τρόπο μπορεί να «προβλεφθεί» η δομή του υλικού σε οποιοδήποτε σημείο του. Μια κρυσταλλική δομή αποτελείται από ένα σύνολο «στοιχειωδών κυττάρων» (unit cells), τα οποία έχουν συγκεκριμένες πιθανές μορφές, προκειμένου να μην δημιουργούνται κενά ανάμεσά τους. Συνολικά υπάρχουν δεκατέσσερις διαφορετικές γεωμετρικές δομές κι ονομάζονται «πλέγμα Bravais». Κάποια από κρυσταλλικά αυτά πλέγματα είναι σχεδόν όμοια (π.χ. το τετραγωνικό και το χωροκεντρωμένο διαφέρουν σε ένα άτομο που βρίσκεται στο κέντρο βάρους του δευτέρου).

Σε κάθε ένα από τα κρυσταλλικά πλέγματα παρατηρείται μια «συμμετρία», βάσει της οποίας το κατατάσσουμε σε ένα από τα επτά «κρυσταλλικά συστήματα» (crystal systems). Κάθε κρυσταλλικό πλέγμα χαρακτηρίζεται – ορίζεται από έξι χαρακτηριστικούς αριθμούς (lattice constants), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα μήκη των ακμών σε κάθε άξονα και τις τρεις σχηματιζόμενες γωνίες. Τυπικές τιμές μήκους είναι από 0.2 nm έως 0.6 nm. Η συμμετρία στο πλέγμα είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς πολύ συχνά επιδρά στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Μια κυβική συμμετρία για παράδειγμα δημιουργεί ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή έχουμε αύξηση της ανισοτροπίας του υλικού.

Στα μέταλλα συναντούμε, τις περισσότερες φορές, τριών ειδών πλέγματα. Τα δύο εξ αυτών ανήκουν στα «πλέγματα Bravais» με κυβική συμμετρία [σχήμα 1.7]

- Κυβικό εδροκεντρωμένο (face centered cubic “fcc”)
- Κυβικό χωροκεντρωμένο (body centered cubic “bcc”)
- Μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικό σύστημα (hexagonal closed packed structure “hcp”). Το συγκεκριμένο πλέγμα δεν ανήκει στα «πλέγματα Bravais» καθότι τα άτομα δεν καταλαμβάνουν ταυτόσημες – πανομοιότυπες θέσεις. Παρατηρώντας τη διάταξη “hcp” [σχήμα 1.8] διαπιστώνουμε ότι ξεκινώντας από την «μπροστινή δεξιά αιχμή» φτάνουμε στο επόμενο άτομο κινούμενοι προς τα πάνω κατά $c/2$ και προς τα αριστερά και πίσω κατά $a/\sqrt{3}$. Σε περίπτωση που επαναλάβουμε αυτή τη «διαδρομή» δεν θα συναντήσουμε πάλι κάποιο άτομο. Το πλέγμα αυτό μπορούμε να το ορίσουμε ως δυο απλά εξαγωνικά πλέγματα τα οποία έχουν τοποθετηθεί το ένα μέσα στο άλλο.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να ορίσουμε ως «στοιχειώδες κύτταρο - κυψελίδα» τη δομική μονάδα από την οποία προκύπτει η κρυσταλλική δομή. Το «στοιχειώδες κύτταρο» δεν ορίζεται μονοσήμαντα, παρόλα αυτά όλες οι πιθανές γεωμετρίες έχουν το ίδιο όγκο. Ένας διαχωρισμός που γίνεται στα «στοιχειώδη κύτταρα» είναι αυτός σε «πρωτογενή» (primitive unit cells) και σε «συμβατικά» (conventional unit cells). Ο διαχωρισμός αυτός έχει καθαρά πρακτικό χαρακτήρα, και γίνεται με βάση το εάν το «στοιχειώδες κύτταρο» περιλαμβάνει ένα (πρωτογενές) ή περισσότερα (συμβατικό) άτομα.

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ		ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
		ΚΥΨΕΛΙΔΑ
 ΚΥΒΙΚΟ ΕΔΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΚΥΒΙΚΟ ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΚΥΒΙΚΟ	 $\hat{\alpha} = \hat{\beta} = \hat{\gamma} = 90^\circ$ $a = b = c$ ΚΥΒΙΚΟ	
 ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ	 $\hat{\alpha} = \hat{\beta} = \hat{\gamma} = 90^\circ$ $a = b \neq c$ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ	
 ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ ΒΑΣΙΚΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ ΕΔΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ ΧΩΡΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ	 $\hat{\alpha} = \hat{\beta} = \hat{\gamma} = 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ ΟΡΘΟΡΟΜΒΙΚΟ	
 ΡΟΜΒΟΕΔΡΙΚΟ	 $\hat{\alpha} = \hat{\beta} = \hat{\gamma} = 90^\circ$ $a = b = c$ ΡΟΜΒΟΕΔΡΙΚΟ	
 ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ ΒΑΣΙΚΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ	 $\hat{\alpha} = \hat{\gamma} = 90^\circ$ $\hat{\beta} \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ ΜΟΝΟΚΛΙΝΕΣ	
 ΤΡΙΚΛΙΝΕΣ	 $\hat{\alpha} \neq \hat{\beta} \neq \hat{\gamma} \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$ ΤΡΙΚΛΙΝΕΣ	
 ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ	 $\hat{\alpha} = \hat{\beta} = 90^\circ$ $\hat{\gamma} = 120^\circ$ $a = b \neq c$ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟ	

Τα κρυσταλλικά πλέγματα και τα κρυσταλλικά συστήματα [Σχήμα 1.6]

Δυο βασικές ιδιότητες των κρυσταλλικών πλεγμάτων είναι ο «αριθμός συνδιάταξης» (coordination number) και ο «αριθμός ατομικής πλήρωσης» (atomic packing factor). Για τους λόγους που έχουν προαναφερθεί είναι σημαντικό κάθε άτομο σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα μετάλλου να έχει πολλά γειτονικά άτομα με τα οποία θα «μοιράζεται» τα απαραίτητα ηλεκτρόνια. Ο αριθμός αυτός, των γειτονικών ατόμων σε συγκεκριμένη απόσταση από τυχαίο άτομο αναφοράς, ονομάζεται «αριθμός συνδιάταξης». Υποθέτοντας σφαιρική ατομική μορφή ορίζουμε το «αριθμό ατομικής πλήρωσης» ως το πηλίκο του όγκου που καταλαμβάνουν τα άτομα ενός στοιχειώδους κυττάρου, προς τον όγκο αυτού V_c . Ο «αριθμός ατομικής πλήρωσης» παίρνει μέγιστη τιμή, 74%, για το «κυβικό εδροκεντρωμένο» πλέγμα, και για το «μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικό». Για λόγους πληρότητας παρατίθεται ο τύπος υπολογισμού του:

$$APF = \frac{\tau * \frac{4}{3} * \pi * r^3}{V_c}$$

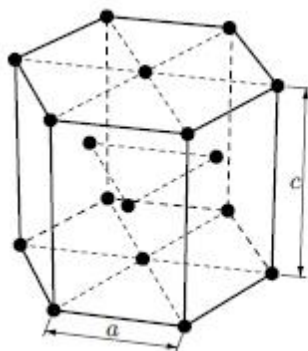
τ = αριθμός ατόμων στοιχειώδους κυττάρου
 r = ατομική ακίνα



(α) Face centered cubic lattice

(β) Body centered cubic lattice

[Σχήμα 1.7]



Hexagonal close packaged structure (lattice representation – sphere model)

[Σχήμα 1.8]

Πολυκρυσταλλικά μέταλλα (polycrystalline metals)

Καθώς τα μέταλλα ψύχονται και μεταβαίνουν από την υγρή στη στερεή φάση^[1] ξεκινάει η διαδικασία της «κρυσταλλοποίησης» συναρτήσει της ταχύτητας – ρυθμού ψύξης δημιουργούνται αρκετοί «κρυσταλλικοί πυρήνες» (“nuclei of crystallization form”). Οι πυρήνες αυτοί μεγαλώνουν – επεκτείνονται και τελικά ενώνονται μεταξύ τους. Καθώς ο κάθε πυρήνας δημιουργείται και αναπτύσσεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους, δεν υπάρχει ομοιόμορφη δομή πλέγματος μεταξύ τους. Τελικά τα μεταλλικά υλικά δεν αποτελούνται από έναν ενιαίο κρύσταλλο αλλά από πολλές «κρυσταλλικές περιοχές» οι οποίες ονομάζονται «κρυσταλλίτες» (crystallites) ή «κόκκοι» (grains). Εκτείνονται από μερικά μικρόμετρα, έως χιλιοστά, και σε ορισμένες εξαιρετικές περιπτώσεις αποκτούν μεγαλύτερο μέγεθος.

Τα «όρια των κόκκων» (grain boundaries) δεν έχουν την «τέλεια» κρυσταλλική δομή, καθώς αποτελούν σημείο συνάντησης περιοχών διαφορετικού προσανατολισμού. Έτσι μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως «ατέλειες πλέγματος», και επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού. Προσφέρουν μέσω μηχανισμών διάχυσης, δυνατότητα επίδρασης σε διαβρωτικά μέσα, αλλά ταυτόχρονα «αδυνατίζουν» το υλικό και οδηγούν ακόμα και σε αστοχία (intercrystalline failure) [σχήμα 1.9].

Από περιοχές με διαφορετικά πλέγματα, ακόμη και διαφορετική χημική σύσταση (phases), αποτελούνται επίσης και τα κράματα. Τα άτομα του «κραματικού στοιχείου» (second phase) που «εγκλωβίζονται» στο κρυσταλλικό πλέγμα του «μητρικού μετάλλου» (first phase) επηρεάζουν καταλυτικά τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Ανάλογα με το αν η κρυσταλλική δομή και ο προσανατολισμός των δύο στοιχείων ενός κράματος είναι όμοιος διακρίνουμε τις περιπτώσεις:

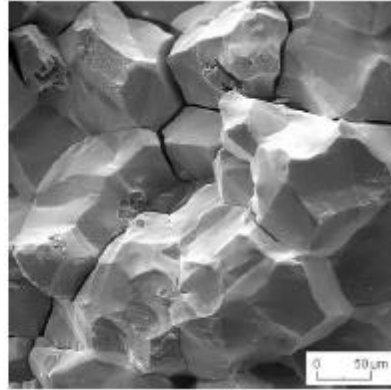
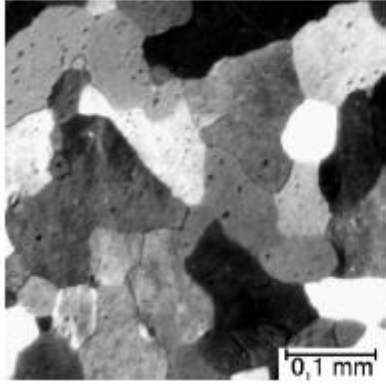
- «συναφής φάση» (coherent): έχουμε ίδια κρυσταλλική δομή και προσανατολισμό, και το πλέγμα συνεχίζεται και «εντός» του «κραματικού στοιχείου» [σχήμα 1.10α].
- «ημι-συναφής φάση» (semi coherent): έχουμε ίδια κρυσταλλική δομή και προσανατολισμό αλλά πολύ διαφορετικές «πλεγματικές σταθερές». Στην περίπτωση αυτή ορισμένο μόνο μέρος των «κρυσταλλικών γραμμών» συνεχίζουν εντός του «κραματικού στοιχείου» [σχήμα 1.10β].
- «μηδενική συνάφεια» (incoherent): στην περίπτωση αυτή τα πλέγματα διαφέρουν εξ ολοκλήρου [σχήμα 1.11].

Να σημειωθεί τέλος, πως ακόμα και στα πλέγματα ίδιας φάσης παρατηρούνται ατέλειες, οι οποίες οφείλονται είτε σε άτομα που λείπουν, είτε σε «ξένα» προς τη φάση αυτή άτομα.

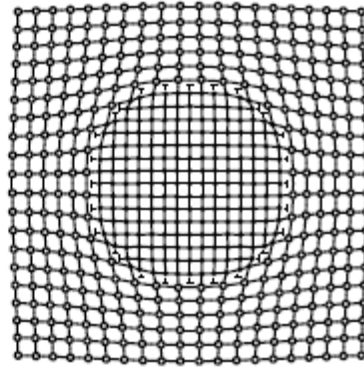
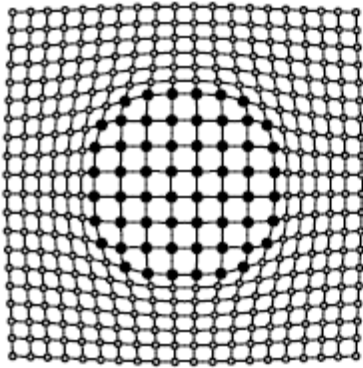
Metallic Glasses

Τα μέταλλα μπορούν να δημιουργήσουν και «άμορφες δομές» τις οποίες ονομάζουμε «μεταλλικό γυαλί» (metallic glasses). Λόγω των δεσμών που αναπτύσσονται σε ατομικό επίπεδο είναι πολύ δύσκολο τα άτομα μετάλλων να σχηματίσουν «άμορφες δομές». Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις υπερταχείας ψύξης, με ρυθμό μεγαλύτερο των $10^5 K/sec$, και με τη χρήση ειδικών κραμάτων. Το αποτέλεσμα είναι υλικά εξαιρετικής αντοχής και ολκιμότητας.

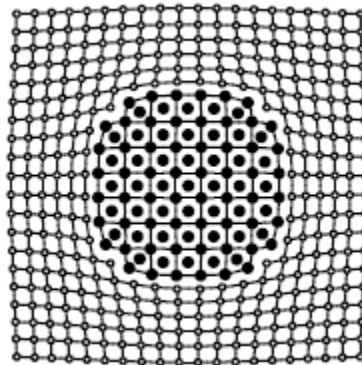
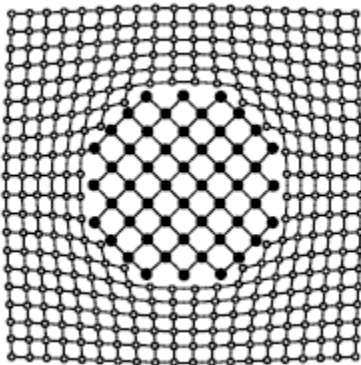
^[1]Αναλυτική αναφορά θα γίνει στο [κεφάλαιο 3]



Μικροδομή μετάλλων όπου φαίνονται οι σχηματιζόμενοι «κόκκοι» και τα «όρια των κόκκων»
[Σχήμα 1.9]



Πλέγματα δύο διαφορετικών φάσεων (α) συναφής φάση (coherent),
(β) ημι-συναφής φάση (semi coherent)
[Σχήμα 1.10]



Μηδενικής συνάφειας πλέγματα (α) λόγω διαφορετικού προσανατολισμού,
(β) λόγω διαφορετικής κρυσταλλικής δομής
[Σχήμα 1.11]

Μηχανική συμπεριφορά

[Για λόγους πληρότητας γίνεται μια σύντομη αναφορά στο σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων.]

«Μηχανική συμπεριφορά» του υλικού είναι ουσιαστικά η αντίδραση – απόκριση του υλικού σε μηχανικό φορτίο, σε θερμική καταπόνηση, αλλά και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στην πραγματικότητα υπάρχει συνδυασμός και αλληλεπίδραση των προαναφερθέντων παραμέτρων. Προτού όμως προχωρήσουμε στη συνολική αξιολόγηση του υλικού, προηγείται μια λεπτομερής μελέτη της συμπεριφοράς του σε μηχανική φόρτιση (ελαστική και πλαστική παραμόρφωση). Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού είναι η φύση – είδος της φόρτισης, διακρίνοντας έτσι περιπτώσεις ελαστικής (αντιστρέψιμης) παραμόρφωσης η οποία για υψηλότερα φορτία γίνεται πλαστική (μόνιμη). Επίσης η εναλλασσόμενη φόρτιση προκαλεί φαινόμενα κόπωσης τα οποία οδηγούν σε αστοχία υλικού ακόμα και για φορτία χαμηλότερα του ορίου αντοχής. Τα παραπάνω, μαζί με πολλές ακόμα παραμέτρους, μελετώνται στα πλαίσια της «μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών».

Εφελκυσμός και Θλίψη (tensile & compressive properties)

Αναφερόμαστε στην «αντίδραση» του υλικού σε αξονικό (σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων) φορτίο. Κατά τα γνωστά, φορτίο που έχει την τάση να «επιμηκύνει» τα όρια του συστήματος ονομάζεται εφελκυστικό, ενώ αυτό που τείνει να τα «συμπιέσει» θλιπτικό. Για σχετικά χαμηλά φορτία η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι πλήρως αντιστρέψιμη και καλείται ελαστική παραμόρφωση. Η ελαστική συμπεριφορά του υλικού μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη – γραμμική, ανάλογα με τη ατομική δομή του.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ελαστική παραμόρφωση είναι χρονικά εξαρτώμενη, και απαιτείται χρόνος για να επέλθει η αναμενόμενη μετατόπιση (prescribed displacement). Η χρονικά εξαρτώμενη ελαστική συμπεριφορά των υλικών ονομάζεται βισκοελαστικότητα (viscoelastic deformation), και χαρακτηριστικό της γνώρισμα είναι ότι το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση με χρονική καθυστέρηση, από τη στιγμή που παύει να ασκείται - επιδρά το φορτίο που προκαλούσε την παραμόρφωση. Βισκοελαστική συμπεριφορά συναντάμε σε πολυμερή, σε μέταλλα, και σε κεραμικά υλικά, ενώ συνδέεται με τη «υφέρπουσα μοριακή κινητικότητα» (“underlying molecular flow”).

Στις περιπτώσεις που ασκείται υψηλό σχετικά φορτίο, παρατηρείται εκτός από την ελαστική παραμόρφωση και πλαστική (μόνιμη), καθώς το υλικό δεν επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις – όρια, όταν απομακρυνθεί το φορτίο. Η πλαστική παραμόρφωση οφείλεται στην αδυναμία των μορίων να επανέλθουν στις αρχικές τους θέσεις, προκαλεί αλλαγή σχήματος του τεμαχίου, αλλά στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν προκαλεί μεταβολή όγκου. Τέλος είναι ανεξάρτητη του χρόνου και της θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες χαμηλότερες της ανακρυσταλλοποίησης).

Για τη μελέτη της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού εκτελούμε «δοκιμή εφελκυσμού» υποβάλλοντας ένα κατάλληλα διαμορφωμένο δοκίμιο σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Από τη δοκιμή αυτή «παίρνουμε» τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, η οποία εκφρασμένη σε τιμές «πραγματικής τάσης – πραγματικής παραμόρφωσης» μας δίνει την ^[1]«καμπύλη διαρροής» του υλικού (flow curve).

[1] Στο παράρτημα Α γίνεται εκτενής αναφορά στην καμπύλη διαρροής.

Αντοχή σε διάτμηση

Όταν ασκείται στρεπτική ροπή σε ένα στερεό, υπάρχει σχετική μετακίνηση των επιπέδων – επιφανειών του. Η «συμπεριφορά» του υλικού στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται, σχετίζεται άμεσα με το μέτρο διάτμησης “G” (shear modulus), το οποίο εξαρτάται από την ισχύ των χημικών δεσμών, και τη θερμοκρασία, εκφράζοντας ουσιαστικά την «αντίσταση» του υλικού σε στρεπτική φόρτιση. Η γωνιακή μετατόπιση – παραμόρφωση μπορεί να είναι ελαστική ή πλαστική (κατά αναλογία με την αξονική), και μπορούμε να έχουμε και εδώ βισκοελαστική συμπεριφορά. Το όριο διαρροής σε στρέψη πιθανόν να είναι «χαμηλότερο» από αυτό σε αξονική φόρτιση, γενικά όμως ο συνδυασμός αξονικής και διατμητικής φόρτισης καθορίζει την πλαστική παραμόρφωση των υλικών.

Αντοχή

Με εξαίρεση τα μέταλλα, τα περισσότερα υλικά οφείλουν την αντοχή τους στους «ισχυρούς» και «ασθενείς» χημικούς δεσμούς. Η αντοχή στην πραγματικότητα είναι «μικρότερη» από τη θεωρητική, κυρίως λόγω ατελειών – ελαττωμάτων (defects) που οδηγούν σε αστοχία αρκετά πριν φτάσουμε τα «ιδανικά – θεωρητικά» όρια αντοχής. Οι επιπτώσεις των σημείων «συγκέντρωσης τάσεων» (stress concentrators) είναι ιδιαίτερα έντονες σε ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά ή τα διαμεταλλικά (intermetallics) και η αντοχή τους εξαρτάται – σχετίζεται με την στατιστική κατανομή των ατελειών.

Στα μέταλλα ισχύουν διαφορετικές αρχές. Σε συνδυασμό με τους μεταλλικούς δεσμούς, τα περισσότερα μεταλλικά υλικά «αντλούν» την αντοχή τους από την αλληλεπίδραση των μετατοπίσεων στο πλέγμα και των ατελειών που εμφανίζονται σε αυτό (ως ατέλειες μπορούμε να θεωρήσουμε συμπαγή – στερεά διαλύματα (solid solutions), στοιχεία κράματος (alloying elements), στοιχεία ιζημάτων (precipitates)). Αυτός είναι και ένας βασικός λόγος της δημιουργίας υλικών με προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας «κραματικών στοιχείων» όταν χρειαζόμαστε υλικά υψηλότερης αντοχής. Υπάρχει βέβαια ο κίνδυνος λόγω υπερβολικού περιορισμού της «κινητικότητας –μετατόπισης» σε ατομικό επίπεδο, ή εξ’ αιτίας ρυγματώσεων που δημιουργούνται κατά την κατασκευή, να γίνει το κράμα επικίνδυνα ψαθυρό.

Θραύση

Η δημιουργία ρηγματώσεων ως αποτέλεσμα φόρτισης αυξανόμενης συναρτήσεως του χρόνου (monotonic load), προκαλείται είτε από τον διαχωρισμό – διάσπαση των ατομικών δεσμών, είτε ως αποτέλεσμα της «επέκτασης» των «κενών» που δημιουργούν οι υπάρχουσες ατέλειες πλέγματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θραύση ακολουθεί τη πλαστική παραμόρφωση του υλικού, με εξέλιξη φαινομένων δημιουργίας «πυρήνων ρηγμάτωσης» οι οποίοι και μεγαλώνουν (crack nucleation and crack growth) φτάνοντας τελικά σε ένα κρίσιμο μέγεθος. Η ψαθυρή θραύση (brittle fracture) του υλικού εξαρτάται από τη μέγιστη αντοχή σε αξονική καταπόνηση (άμεση σχέση με τους χημικούς δεσμούς του υλικού).

Σε αντιδιαστολή η «μικρο – όλκιμη θραύση» (microductile fracture) προκαλείται από πλαστική παραμόρφωση λόγω διατμητικών τάσεων, οι οποίες και τείνουν να «ενισχύουν» την «κίνηση» «γραμμικών ατελειών» (line defects). Η εμφάνιση «όλκιμης θραύσης» (ductile fracture) εξαρτάται από τους πυρήνες των ατελειών και τη σύζευξη αυτών (nucleation and linkage). Σε όλκιμα μέταλλα είναι συχνό το φαινόμενο δημιουργίας κυψελοειδών ρηγματώσεων (ductile dimpled fractures).

Ερπυσμός

Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης ($\sim 0.3 - 0.5$ της θερμοκρασίας απόλυτης τήξης του υλικού), η ροή υλικού λόγω θερμικής και μηχανικής φόρτισης, «συμμετέχει» σε μεγάλο βαθμό στη παραμόρφωσή του. Η ροή αυτή είναι αποτέλεσμα είτε της κίνησης – μετακίνησης σημειακών ατελειών – κενών (point defects – vacancies), είτε γραμμικών ατελειών (line defects), υπό την επίδραση στατικής φόρτισης. Η παραμόρφωση που προκαλείται λόγω ερπυσμού συνδέεται με την ύπαρξη μικρο – κενών (microvoid) και την συνένωσή τους, ειδικά στο σημείο λίγο πριν την θραύση του υλικού. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ρωγμές στο υλικό, η θραύση προκαλείται από την «ανάπτυξη – αλληλεπίδραση» του φαινομένου «γύρω» από την «κύρια ρωγμή» (dominant crack).

Ερπυσμό έχουμε τόσο στα κρυσταλλικά υλικά, όσο και στα μη κρυσταλλικά υλικά, με το χρόνο αστοχίας να κυμαίνεται από μερικά λεπτά ή ώρες, αναλόγως τη θερμοκρασία και τη φόρτιση, μέχρι και σε τάξη μεγέθους γεωλογικής χρονικής κλίμακας για υλικά στον φλοιό της γης. Μέσω της μελέτης του φαινομένου αναπτύσσονται μοντέλα τα οποία συνδέουν μηχανική φόρτιση και θερμοκρασία.

Σε ειδικές κατασκευές με πολύ μικρές ανοχές, ανάγκη ακρίβειας και λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες (παραδείγματα οι στρόβιλοι), είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται υλικά με εξαιρετική αντοχή στο φαινόμενο του ερπυσμού. Για παρόμοιες κατασκευές χρησιμοποιούνται κράματα νικελίου και κοβαλτίου, με ειδική μικροδομή η οποία παρέχει μια εγγενή «αντίσταση» στον ερπυσμό.

Κόπωση

Κόπωση χαρακτηρίζεται η «συμπεριφορά» του υλικού σε χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση. Η «κόπωση υλικού» είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας και «εξάπλωσης» ρωγμών στο υλικό, υπό την επίδραση φόρτισης σημαντικά χαμηλότερης του ορίου αντοχής σε εφελκυσμό. Η δημιουργία μακρο – ρωγμών (macrocrack) σχετίζεται είτε με την «αντίστροφη ολίσθηση» των επιφανειών του πλέγματος (reversible slip on crystallographic planes), είτε με την «εξάπλωση» των ρωγμών που προϋπήρχαν λόγω ατελειών πλέγματος. Η περιοδική φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε «τοπική συσσώρευση πλαστικής παραμόρφωσης» (accumulation of localized plasticity), και δημιουργία πυρήνων μικρορωγμών (microcrack nucleation). Στις περισσότερες των περιπτώσεων η κόπωση είναι εντονότερη στις εξωτερικές επιφάνειες του υλικού, απ' όπου και συχνά ξεκινάει η ρηγμάτωση, και γίνεται εύκολα αντιληπτό με την εκτράχυνση τους. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι φαινόμενα κόπωσης έχουμε και λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιορίζουν τα όρια αντοχής του υλικού.

Σκληρότητα

Στο σημείο αυτό θα γίνει σύντομη αναφορά, ενώ σε επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε αναλυτικά, καθώς αποτελεί το θέμα της εργασίας.

Σκληρότητα υλικού είναι η αντίσταση που παρουσιάζει το υλικό στη διείσδυση ξένου σώματος, το οποίο πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού, με συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Το σώμα που τείνει να διεισδύσει στο υλικό καλείται εντυπωτής (ή διεισδυτής) και για τις ανάγκες μέτρησης και ορισμού της σκληρότητας υλικού χρησιμοποιούμε κωνικούς, σφαιρικούς ή σε πυραμιδοειδείς εντυπωτές. Ως προς το μέγεθος διακρίνουμε τους εντυπωτές σε μικρο – εντυπωτές (nano or micro indenters) και σε μεγαλύτερους (macroindenters). Δεδομένης της πρακτικής ευκολίας με την οποία πραγματοποιείται η

μέτρηση σκληρότητας, (η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος που δημιουργεί ο εντυπωτής στο υλικό), υπάρχουν εμπειρικές σχέσεις οι οποίες επιχειρούν να συνδέσουν την αντοχή του υλικού με τη σκληρότητά του. Οι μικρο – εντυπωτές χρησιμοποιούνται για να γίνει εκτίμηση της αντοχής σε πολυφασικά κράματα.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι υπολογισμού της σκληρότητας υλικού είναι οι δοκιμές:

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

Δοκιμή Brinell

Κατά τη δοκιμή αυτή ο εντυπωτής είναι σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα ή καρβίδιο, με αποτέλεσμα να δημιουργεί σφαιρικό αποτύπωμα στο υλικό. Η εφαρμοζόμενη δύναμη, και η διάμετρος του εντυπωτή ποικίλουν, για τη τυποποιημένη μέθοδο Brinell χρησιμοποιούμε σφαίρα διαμέτρου 10 mm και ασκούμε φορτίο 300 kp διάρκειας 30 sec. Η σκληρότητα υλικού υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$HB = \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

D = διάμετρος εντυπωτή σε [mm]

d = διάμετρος αποτυπώματος σε [mm]

F = φορτίο σε [kp]

Τη δοκιμή αυτή τη χρησιμοποιούμε κυρίως για μαλακά υλικά με μεγάλη μεταλλουργική ανομοιογένεια. Οι μονάδες μέτρησης βάσει του τύπου είναι $\left[\frac{kp}{mm^2} \right]$ ή [HB].

Δοκιμή Rockwell

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη μέτρηση του βάθους αποτυπώματος και όχι της διαμέτρου. Η δοκιμή εξελίσσεται σε δύο φάσεις:

- Την προφόρτιση κατά την οποία ασκούμε μικρό φορτίο (10 kp)
- Την κύρια φόρτιση κατά την οποία ασκούμε μεγαλύτερο φορτίο, το οποίο είναι καθορισμένο στα 100 ή 150 kp

Αναλόγως με το είδος του εντυπωτή, των επιβαλλόμενων φορτίων και το είδος του δοκιμαζόμενου υλικού υπάρχουν δύο κυρίως ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι μέτρησης κατά Rockwell:

- Rockwell C: Χρησιμοποιούμε ως εντυπωτή κώνο από διαμάντι, γωνίας 120° και ακμής με ακτίνα καμπυλότητας 0.02 mm. Κατά τη διάρκεια προφορτίσεως η εφαρμοζόμενη δύναμη ισούται με 10 kp και κατά τη κύρια φόρτιση ισούται με 150 kp. Η κλίμακα της σκληρότητας εκτείνεται από 20 έως 70 [HRC]. Η δοκιμή σκληρότητας κατά Rockwell C εφαρμόζεται ευρύτατα στην περίπτωση θερμικά κατεργασμένων χαλύβων και γενικότερα μετάλλων και κραμάτων μετά από κατεργασίες σκλήρυνσης (βαμμένοι χάλυβες, επιφανειακά κατεργασμένα κράματα αλουμινίου μετά από γήρανση).

- Rockwell B: Χρησιμοποιείται ως εντυπωτής σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα, διαμέτρου $1/16 \text{ in.}$ (περίπου 1.59 mm). Η ασκούμενη δύναμη προφορτίσεως είναι 10 kp και η κύρια φόρτιση 100 kp . Η κλίμακα ξεκινά από 35 HRB και φτάνει έως τα 100 HRB . Τα υλικά για τα οποία χρησιμοποιείται είναι οι κοινοί χάλυβες, ακατέργαστοι κραματωμένοι χάλυβες, κράματα χαλκού, κράματα αλουμινίου και γενικά υλικά προτού υποστούν κατεργασίες σκλήρυνσης.

Δοκιμή Vickers

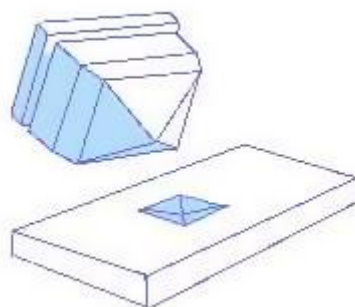
Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως εντυπωτή πυραμίδα διαμαντιού γωνίας 136° . Τα εφαρμοζόμενα φορτία ποικίλουν από μερικά [p] έως εκατοντάδες [kp]. Ο εντυπωτής δημιουργεί τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανική περίπτωση. Στην πραγματικότητα έχει σχήμα ρόμβου λόγω της μικροσκοπικής ανισοτροπίας υλικού. Η τιμή της σκληρότητας δίνεται από τον τύπο:

$$HV = 1.854 * \frac{F}{\bar{d}^2}$$

$$F = \text{φορτίο σε [kp]}$$

$$\bar{d} = \text{μέσος όρος διαγωνίων αποτυπώματος σε [mm]} \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)$$

Το αριθμητικό αποτέλεσμα έχει $\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$ ή [HV]. Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιείται για μεγάλο εύρος υλικών, τόσο σκληρών όσο και μαλακών, λόγω της «ευελιξίας» στο φορτίο που χρησιμοποιούμε. Επίσης λόγω του «ρηχού» αποτυπώματος υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης σκληρότητας σε λεπτά ελάσματα. Η δυνατότητα χρήσης πολύ μικρών φορτίων κάνει τη μέθοδο κατάλληλη για μικροσκληρομέτρηση υλικών, βασική για την μελέτη της κατανομής της σκληρότητας αλλά και τη μέτρηση σκληρότητας διαφόρων φάσεων και συστατικών που εμπεριέχονται στο υλικό.



Σχηματική απόδοση εντυπωτή και αποτυπώματος κατά τη μέθοδο Vickers
[Σχήμα 1.12]

Κατεργασίες

Κλείνοντας την εισαγωγή θεωρείται σκόπιμη μια γρήγορη επισκόπηση των κατεργασιών συνολικά, προτού εστιάσουμε στη συνέχεια στην σκλήρυνση μέσω λείανσης, η οποία αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

Ορίζουμε ως κατεργασία (manufacturing process) την διαδικασία μορφοποίησης των υλικών, εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητά τους να παραμορφώνονται πλαστικά (μόνιμες μεγάλες παραμορφώσεις) και ελέγχοντας κατάλληλα τις συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και ταχύτητας, με σκοπό το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Ταξινόμηση των κατεργασιών

Κατά DIN

- **Αρχέγονες κατεργασίες:** το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα άλλα αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία).
- **Διαμορφώσεις:** Χαρακτηριστικό τους είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή) και κατεργασίες διαμόρφωσης επίπεδου ελάσματος. (κάμψη, απότμηση βαθεία κοίλανση).
- **Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού:** Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτμηση, φρεζάρισμα, λείανση).
- **Επιφανειακές κατεργασίες:** Δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο αλλά μεταβολή ιδιοτήτων της κατεργασμένης επιφάνειας (ενίσχυση και προστασία). Διακρίνονται σε θερμικές και θερμοχημικές επικαλύψεις.
- **Κατεργασίες σύνδεσης:** Διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις).

Με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό

- **Συμβατικές:** χρησιμοποιούμε μηχανική ενέργεια και συμβατικό μηχανουργικό εξοπλισμό.
- **Μη Συμβατικές:** ως βασική μορφή ενέργειας χρησιμοποιείται κάποια άλλη μορφή ενέργειας πέραν της μηχανικής, με τον εξοπλισμό να προσαρμόζεται κατάλληλα, ανάλογα με της ιδιαιτερότητες της κατεργασίας (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση).

Με κριτήριο την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία κατεργασίας

Για την ταξινόμηση αυτή λαμβάνονται υπόψη δύο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του κατεργαζόμενου υλικού: τη θερμοκρασία τήξης T_M και τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης T_r ($0.4 \div 0.5 T_M$).

- Ψυχρές κατεργασίες (cold process): επιτελούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_e .
- Θερμές κατεργασίες (hot process): Πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία $T \rightarrow [T_r, T_M]$
- Ημίθερμες κατεργασίες (warm process): Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και μετριάζουν τα μειονεκτήματα των δύο παραπάνω ομάδων $T \rightarrow [T_e, T_r]$.

Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα των κατεργασιών σύμφωνα με τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνουν χώρα.

Ψυχρές κατεργασίες	Θερμές κατεργασίες
Απαιτούνται μεγαλύτερες τάσεις για την κατεργασία	Απαίτηση πρόσθετων εγκαταστάσεων (κλιβάνων)
Ταχύτερη μηχανική φθορά εργαλείου	Φθορά εργαλείων λόγω οξείδωσης που ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες
Απαίτηση μεγαλύτερου και στιβαρότερου εξοπλισμού (εργαλειομηχανών) και κατά συνέπεια και μεγαλύτερου χώρου εργασίας	Αστοχία εργαλείου λόγω θερμικής κόπωσης
Σύνθετες γεωμετρικές μορφές τεμαχίου επιτυγχάνονται σε περισσότερες από μία φάσεις με απαίτηση για ενδιάμεσες θερμικές κατεργασίες (ανόπτηση) και λίπανση	Κακής ποιότητας κατεργασμένη επιφάνεια
	Πιθανή ανάγκη δευτερογενούς κατεργασίας αποβολής υλικού για τελική διαμόρφωση ή λείανση τεμαχίου

Μειονεκτήματα κατεργασιών σύμφωνα με τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνουν χώρα [Πίνακας 1.1]

Με κριτήριο την εντατική κατάσταση του τεμαχίου

- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση: Η ροή υλικού είναι ίδια σε κάθε επίπεδο κάθετο προς έναν από τους άξονες του συστήματος αναφοράς (x, y, z), είναι δηλαδή ανεξάρτητη της τρίτης διάστασης με αποτέλεσμα να ισχύει $\varepsilon_z = 0$ (για τον άξονα z επί παραδείγματι) και $\sigma_z = \frac{1}{2} * (\sigma_x + \sigma_y)$.
- Επίπεδη εντατική κατάσταση: Αναφερόμενοι στο ίδιο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, η ροή υλικού δεν είναι πλέον ανεξάρτητη του ενός άξονα (παραδείγματος z), αλλά δεν έχουμε τάση κατά αυτόν τον άξονα $\sigma_z = 0$.
- Αξονοσυμμετρική πλαστική παραμόρφωση: υφίσταται αξονοσυμμετρία ροής υλικού, με σύστημα αναφοράς σε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z) εντατική κατάσταση περιγράφεται από τη σχέση: $\sigma_r = \sigma_\theta \neq \sigma_z$.
- Τρισδιάστατη πλαστική παραμόρφωση: Σε όρους κυρίων τάσεων και ανεξάρτητα από το είδος του συστήματος αναφοράς η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο είναι της μορφής: $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$.

Κατεργασία Λείανσης

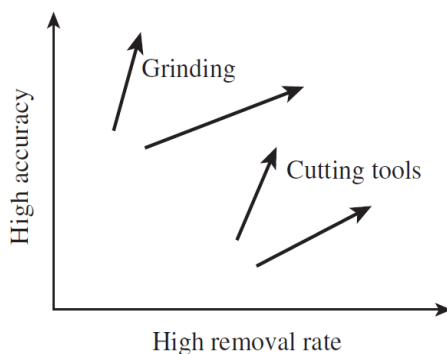
[Ενότητα 2]

Γενικά Στοιχεία

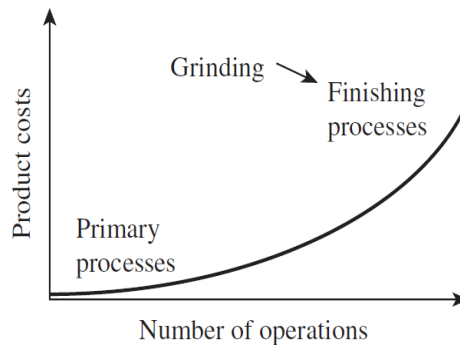
Η λείανση ως κατεργασία αποτελεί μια από τις «αρχαιότερες» (υφίσταται περισσότερα από 2000 χρόνια), και αποτελούσε μέθοδο κατασκευής εργαλείων, όπλων, αντικειμένων καθημερινής χρήσης, αλλά χρησιμοποιήθηκε και για ανάγκες επεξεργασίας υλικών μεγάλων δομικών κατασκευών – έργων. Φυσικά εξελίχθηκε και σήμερα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες κατεργασίες της βιομηχανίας με πληθώρα εφαρμογών σε όλα τα κατασκευαστικά πεδία. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι αρχές και τα μεγέθη που «ορίζουν» την κατεργασία.

Η λείανση στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία περιγράφει την μέθοδο κατά την οποία κατεργαζόμαστε ένα τεμάχιο με υψηλής ταχύτητας λειαντικό μέσο το οποίο μπορεί να είναι είτε τροχός (abrasive wheel), είτε κάποιο σπογγώδες υλικό (abrasive pad), είτε κάποιος ιμάντας (abrasive belt). Περιλαμβάνει διαδικασίες στίλβωσης, λείανσης, και «τελικής υπερ-λείανσης - φινιρίσματος» (“superfinishing”). Η λείανση καθιερώθηκε από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα ως κατεργασία δομική για προϊόντα υψηλής τεχνολογίας.

Η κατεργασία της λείανσης αποτελεί «λογική» και «φυσική» επιλογή για κατεργασία εξαιρετικά σκληρών υλικών. Αποτελεί ιδανική κατεργασία για βαμμένους χάλυβες, κράματα αεροναυπηγικής, οξειδία του αλουμινίου, καρβίδια του πυριτίου, και άλλα δυσκατέργαστα υλικά. Με την συγκεκριμένη κατεργασία μπορούμε να διαχειριστούμε εκτός από πολύ σκληρά υλικά, και εύθραυστα (π.χ. εξαιρετικής σκληρότητας κεραμικά υλικά). Ταυτόχρονα επιτυγχάνουμε υψηλή ακρίβεια, επιθυμητές ανοχές. Για τεμάχια όπως εξαρτήματα μηχανών, με ανάγκη απόλυτης ευθυγράμμισης – ευθύτητας και ανοχές στα όρια των «μικρομέτρων» η λείανση θεωρείται ιδανική κατεργασία. Η τραχύτητα και η ποιότητα επιφανείας αποτελούν θεμελιώδεις παράγοντες σωστής λειτουργίας των εξαρτημάτων. Με σωστή επιλογή παραμέτρων λείανσης (λειαντικού μέσου, εργαλειομηχανής, ρυθμού αποβολής υλικού), μπορούμε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τέλος ένα πλεονέκτημα έναντι εναλλακτικών κατεργασιών είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος της κατεργασίας.



Σύγκριση λείανσης με εναλλακτικές κατεργασίες συναρτήσε επιθυμητής ακρίβειας και ρυθμού αποβολής υλικού [Σχήμα 2.1]

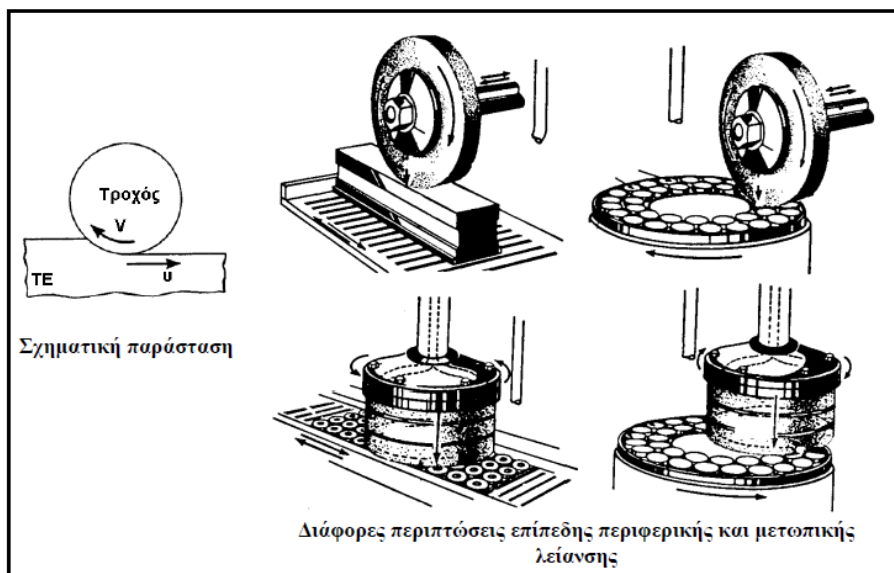


Κόστος κατεργασίας [Σχήμα 2.2]

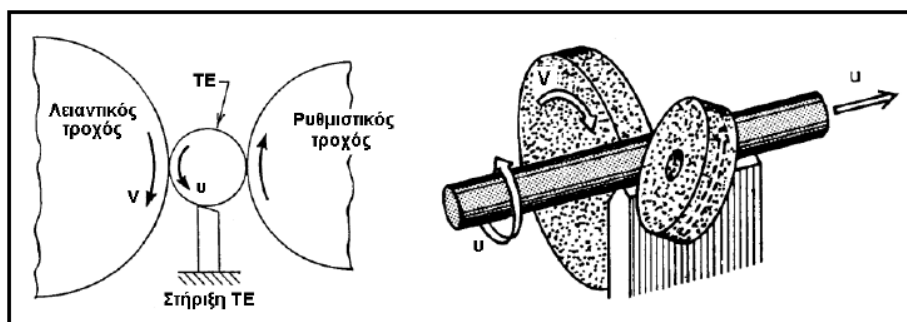
Είδη Λείανσης

Με βάση τη γεωμετρία της κατεργασίας διακρίνεται σε:

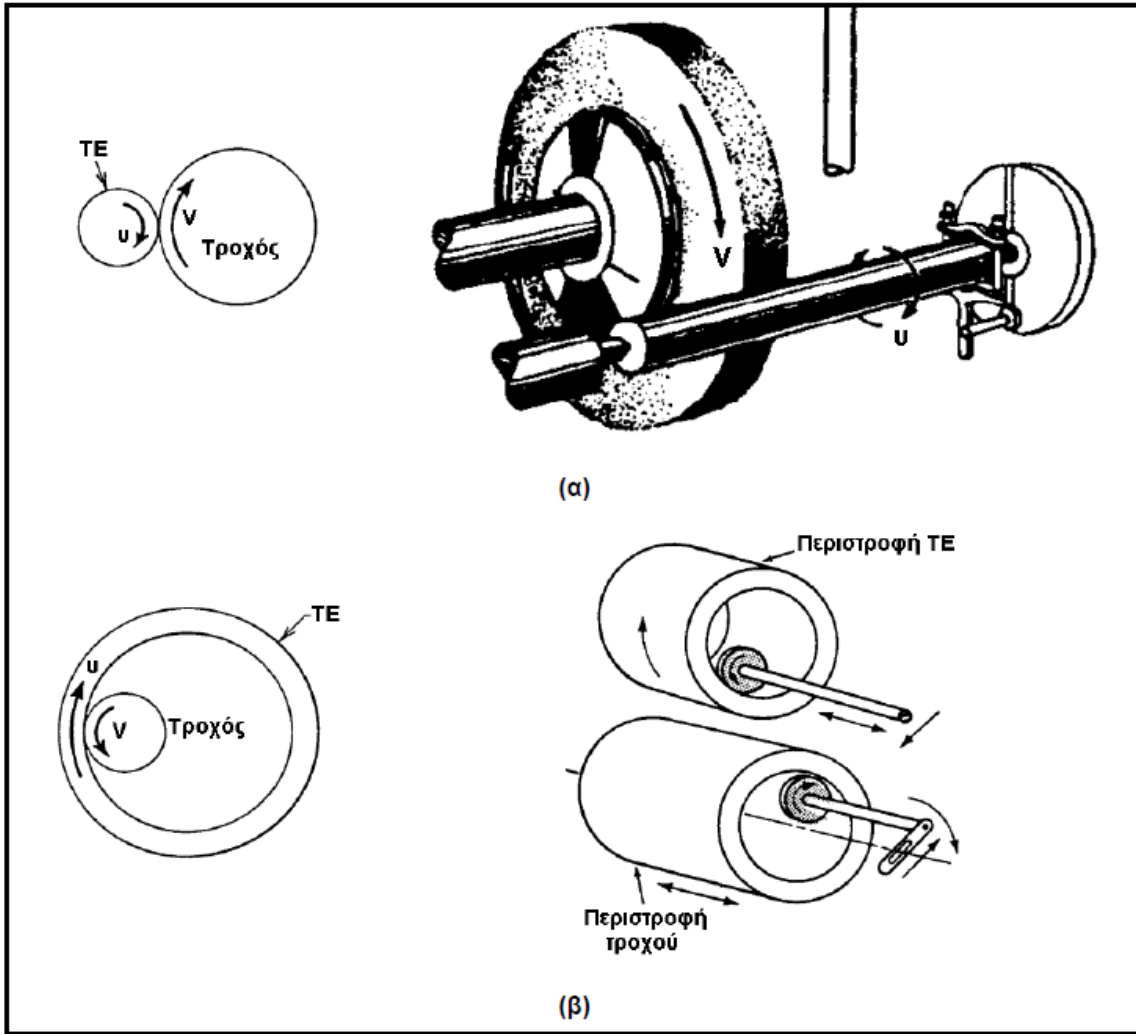
- **Επίπεδη λείανση:** Αναφέρεται σε λείανση επίπεδων επιφανειών και διακρίνεται σε περιφερειακή και μετωπική λείανση, ανάλογα με τη διάταξη του κοπτικού τμήματος του τροχού ως προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια [σχήμα 2.3].
- **Άκεντρη λείανση:** Το τεμάχιο λειανίνεται ελεύθερα μεταξύ των τροχών [σχήμα 2.4].
- **Κυλινδρική λείανση:** Αναφέρεται σε κατεργασία κυλινδρικών επιφανειών και διακρίνεται σε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική λείανση [σχήμα 2.5].
- **Λείανση μορφής:** Ο λειαντικός τροχός έχει ειδικά διαμορφωμένο περίγραμμα το οποίο αποδίδει στο τεμάχιο κατά την κατεργασία [σχήμα 2.6]
- **Αποκοπή με λειαντικό τροχό** [σχήμα 2.7]



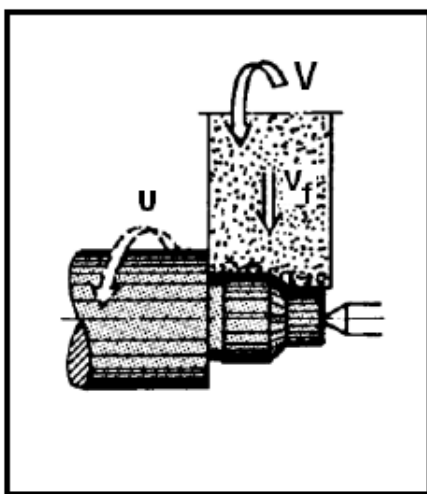
Επίπεδη λείανση [Σχήμα 2.3]



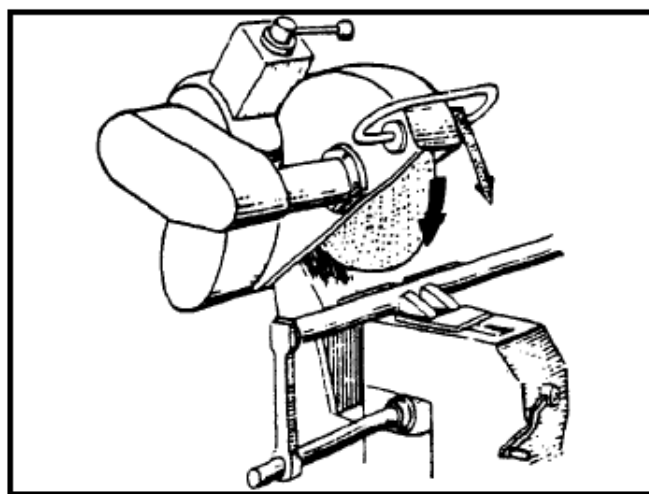
Άκεντρη λείανση [Σχήμα 2.4]



Κυλινδρική λείανση α) Εξωτερική, β) Εσωτερική [Σχήμα 2.5]



Λείανση μορφής [Σχήμα 2.6]



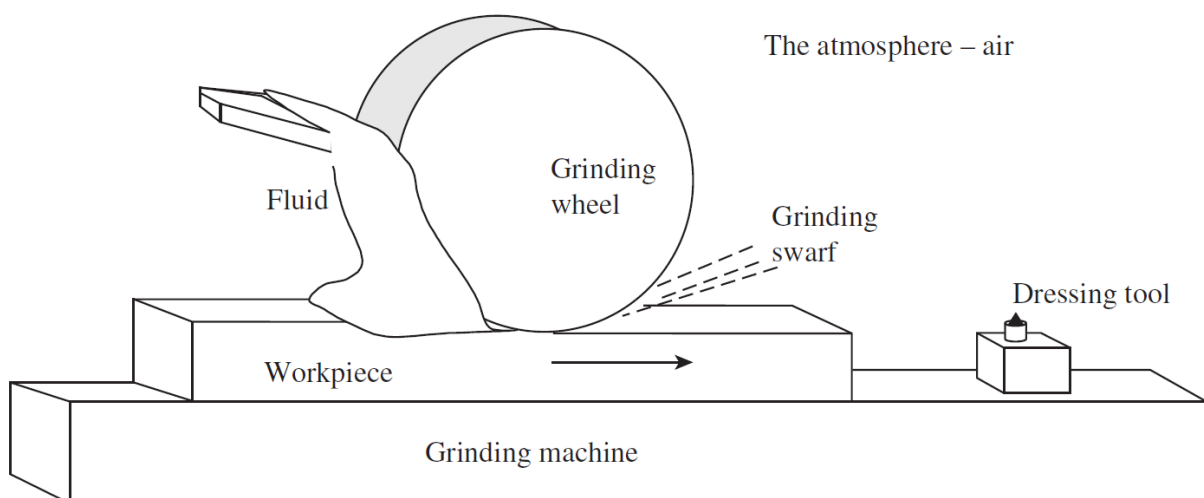
Αποκοπή με λειαντικό τροχό [Σχήμα 2.7]

Βασικά στοιχεία της κατεργασίας

Τα στοιχεία αυτά είναι βασικά και απαραίτητα για την κατεργασία, ενώ ο υπολογισμός τους είναι απαραίτητος για τη σωστή λειτουργία και «συνεργασία» αυτών, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα στοιχεία αυτά είναι η εργαλειομηχανή, ο λειαντικός τροχός (ή γενικότερα το λειαντικό μέσο), το τεμάχιο, το υγρό λείανσης (αν υπάρχει), το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία και τα παραχθέντα ρινίσματα (απόβλητα) λείανσης [σχήμα 2.8]. Οι λεπτομέρειες που «ορίζουν» το σύστημά μας είναι:

- **Τεμάχιο:** υλικό, σχήμα, σκληρότητα, στιβαρότητα, θερμικές και χημικές ιδιότητες.
- **Εργαλειομηχανή:** τύπος, σύστημα ελέγχου, ακρίβεια, στιβαρότητα, θερμοκρασιακή και μηχανική σταθερότητα.
- **Δυναμική της κατεργασίας:** η γεωμετρία και η κινηματική τεμαχίου – λειαντικού τροχού, καθώς και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση (παράμετροι όπως ταχύτητες, ρυθμοί πρόωσης τροχού και τεμαχίου).
- **Λειαντικός τροχός:** είδος λειαντικού μέσου, μέγεθος κόκκων, δεσμοί, δομή, σκληρότητα, ταχύτητα, στιβαρότητα, χημικές και θερμικές ιδιότητες.
- **Υγρό λείανσης:** παροχή, ταχύτητα, πίεση, φυσικές χημικές και θερμικές ιδιότητες.
- **Περιβάλλον λείανσης:** θερμοκρασία και ποσοστό υγρασίας.

Τα στοιχεία που συμμετέχουν στην κατεργασία δημιουργούν ένα πολύπλοκο σύστημα. Η επιφάνεια του υλικού του τεμαχίου θερμαίνεται, και της επιβάλλεται «βίαιη αλληλεπίδραση» με το λειαντικό μέσο, το λειαντικό υγρό και την ατμόσφαιρα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι άμεσα συνδεδεμένο και εξαρτώμενο από το είδος του υλικού, και των χημικών διεργασιών που εξελίσσονται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας με δεδομένες τις υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες. Είναι σημαντικό λοιπόν να προσδιορίζεται η χημική και μηχανική συμπεριφορά του τεμαχίου, λαμβάνοντας υπ όψη το σύνολο των προαναφερθέντων παραγόντων.



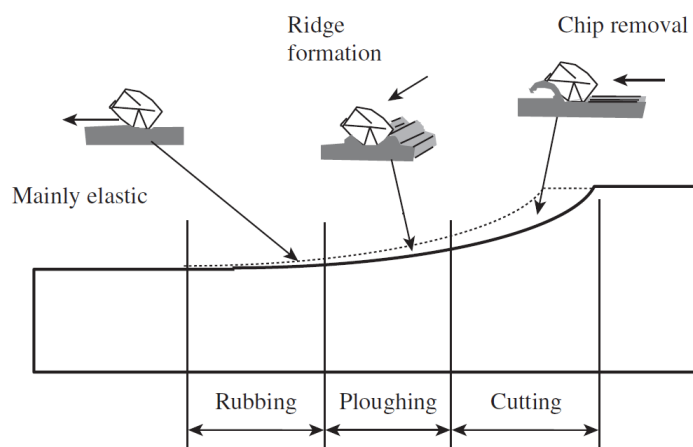
Βασικά στοιχεία κατεργασίας λείανσης [Σχήμα 2.8]

Διαδικασία αποβολής υλικού

Ο λειαντικός τροχός «διασχίζει» (cuts through) το υλικό του τεμαχίου καθώς αυτό περνάει από κάτω. Αναπτύσσονται κάθετες και εφαπτομενικές δυνάμεις, οι οποίες οδηγούν τους κόκκους στο να διεισδύουν στο τεμάχιο. Ένας κόκκος εκτός από το να διεισδύσει στο υλικό και να απομακρύνει το ανάλογο απόβλητο, υπάρχει η πιθανότητα να διεισδύσει και απλά να χαράξει την επιφάνεια χωρίς να απομακρυνθεί υλικό. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα απλά να «τριφτεί» στην επιφάνεια προκαλώντας ήπια φθορά συχνά μη ορατή δια γυμνού οφθαλμού. Οι τρεις αυτές διαφορετικές περιπτώσεις αποτελούν τους μηχανισμούς απομάκρυνσης (με τη γενική έννοια) υλικού κατά τη διάρκεια της κατεργασίας [σχήμα 2.9]. Αν και σε θεωρητικό επίπεδο οι μηχανισμοί αυτοί εμφανίζονται κατά την κατεργασία όλων των υλικών, η επίδραση – συνεισφορά του κάθε ένα εξαρτάται έντονα από τα φυσικά – μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Πολλές σημαντικές παράμετροι της κατεργασίας εξαρτώνται από την έκταση των τριών αυτών φαινομένων. Οι λειαντικοί κόκκοι οι οποίοι προκαλούν αποβολή υλικού φθείρονται διαφορετικά από αυτούς που απλά τρίβονται στο υλικό, και κατά συνέπεια οι δυνάμεις και η ενέργεια λείανσης, η υφή της επιφάνειας, η διάρκεια ζωής του τροχού, επηρεάζονται.

Σε περιπτώσεις ομόρροπης λείανσης οι κόκκοι διεισδύουν άμεσα στο μέγιστο βάθος κοπής, και σταδιακά καθώς κινείται το τεμάχιο η διείσδυση μηδενίζεται. Αντίθετα στην αντίρροπη λείανση οι κόκκοι διεισδύουν σταδιακά στο υλικό του τεμαχίου. Αν και μεταξύ ομόρροπης και αντίρροπης λείανση δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές, στην ομόρροπη λείανση η απομάκρυνση υλικού εμφανίζεται με το που ξεκινάει η επαφή τεμαχίου και κόκκου, με τις δυνάμεις να τείνουν να είναι χαμηλότερες, να έχουμε καλύτερη επιφάνεια τεμαχίου και μειωμένη φθορά. Αντίθετα στην αντίρροπη λείανση οι κόκκοι αρχικά τρίβονται στο τεμάχιο, με την απομάκρυνση υλικού να γίνεται καθώς εξελίσσεται η διαδικασία.

Αν και το βάθος διείσδυσης κόκκου παίζει σημαντικό ρόλο στην κατεργασία όπως υπέδειξαν οι Guest (1915) και Alden (1914), πρακτικά είναι σχεδόν αδύνατον να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Παράμετροι που επηρεάζουν έντονα τη κατεργασία και μπορούμε να ελέγχουμε είναι η ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού τροχού u_s , η ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου u_w , και το βάθος κοπής a_e .



Μηχανισμοί απομάκρυνσης υλικού [Σχήμα 2.9]

Βάθος κοπής

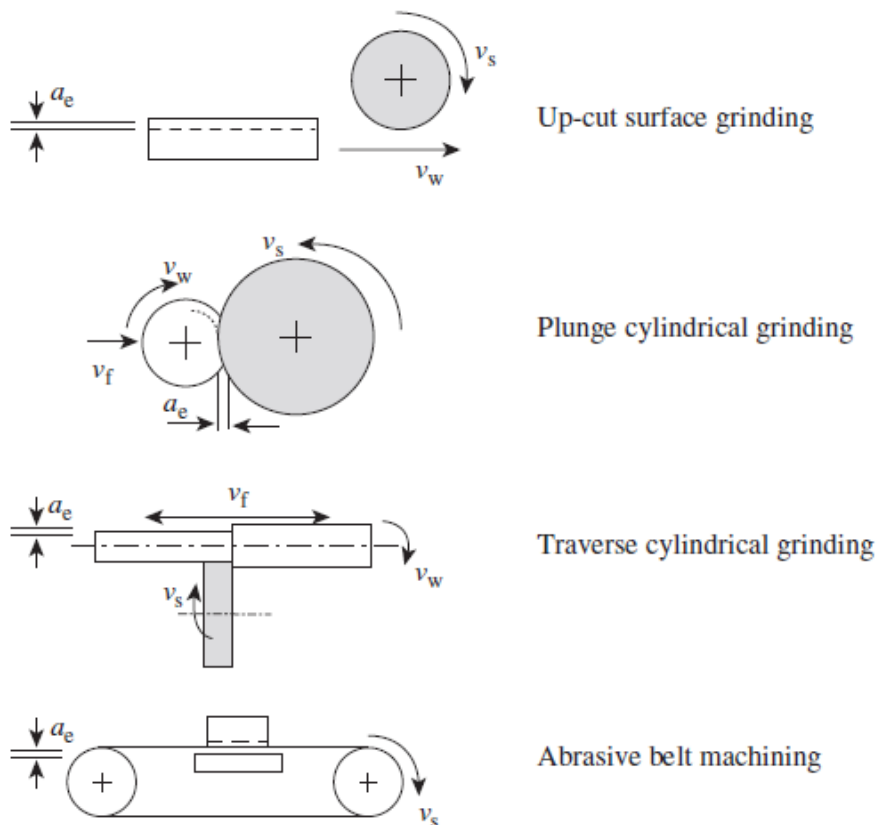
Αποτελεί τη πλέον βασική παράμετρο της κατεργασίας. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι λόγω παραμορφώσεων και μετατοπίσεων το πραγματικό βάθος κοπής $\{a_e\}$ μπορεί να διαφέρει από αυτό που ορίζεται στην εργαλειομηχανή $\{a_p\}$. Η διαφορά αυτή εξαρτάται από μεγέθη όπως η σκληρότητα του υλικού, η παλαιότητα του λειαντικού τροχού, η στιβαρότητα της εργαλειομηχανής, η ταχύτητες κ.τ.λ..

Στην κυλινδρική λείανση το βάθος κοπής ορίζεται ανά περιστροφή τεμαχίου. Με d_w τη διάμετρο του τεμαχίου, u_f τη ταχύτητα πρόωσης, και u_w τη ταχύτητα περιστροφής του τεμαχίου:

$$a_e = \pi * d_w * \frac{u_f}{u_w}$$

Στην άκεντρη λείανση το βάθος κοπής υπολογίζεται ανά μισή περιστροφή τεμαχίου και άρα:

$$a_e = \pi * d_w * \frac{u_f}{2 * u_w}$$



Απεικόνιση των ταχυτήτων της κατεργασίας και του βάθους κοπής για τις διαφορετικού είδους λειάνσεις [Σχήμα 2.10]

Ισοδύναμο πάχος αποβλήτου

Το βάθος κοπής a_e είναι σαφώς μεγαλύτερο από το πάχος της επιφάνειας που «συμμετέχει» στην «ζώνη λείανσης». Το υλικό επιταχύνεται από την αρχική ταχύτητα πρόωσης του τεμαχίου στην ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού τροχού. Έτσι ορίζουμε το ισοδύναμο πάχος αποβλήτου $\{h_{eq}\}$, το οποίο είναι μειωμένο σε σχέση με το βάθος κοπής a_e και ορίζεται ως:

$$h_{eq} = a_e * \frac{u_w}{u_s}$$

Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται συχνά αντί του πραγματικού πάχους αποβλήτου, καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να το υπολογίσουμε με ακρίβεια. Το ισοδύναμο πάχος αποβλήτου συσχετίζεται εύκολα με μεγέθη όπως ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού για συγκεκριμένο λειαντικό τροχό. Έχει αποδειχθεί ότι αυξανόμενο βάθος κοπής, και αύξηση της ταχύτητας πρόωσης αυξάνει και το ισοδύναμο πάχος αποβλήτου, ενώ αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του λειαντικού τροχού το μειώνει (τα συμπεράσματα αυτά συνάδουν και με τη σχέση υπολογισμού του h_{eq}). Αύξηση του ισοδύναμου πάχους αποβλήτου συνεπάγεται και αύξηση της καταπόνησης των λειαντικών κόκκων, και αντίστροφα. Βέβαια η παραπάνω ανάλυση είναι ποιοτική καθώς τα απόβλητα δεν συμπεριφέρονται ως ενιαίο σώμα αλλά «διαχωρίζονται-σπάζουν» σε πολλά μικρά κομμάτια, ανάλογα και με τις μηχανικές ιδιότητες του επεξεργαζόμενου υλικού.

Ρυθμός αποβολής υλικού και επιφάνεια επαφής

Ο ρυθμός αποβολής υλικού εξαρτάται, όπως είναι λογικό, από το βάθος κοπής, τη ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου και από το πλάτος λείανσης $\{b_w\}$. Ο ρυθμός αποβολής υλικού σχετίζεται άμεσα με τις δυνάμεις κατεργασίας, και την ισχύ της κατεργασίας, με αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού να συνεπάγεται αύξηση δυνάμεων και κατ' επέκταση και της ισχύος. Για την επίπεδη λείανση ο ρυθμός αποβολής υλικού υπολογίζεται ως:

$$Q = b_w * l_c * u_w$$

Ο ρυθμός αποβολής υλικού για κυλινδρική λείανση υπολογίζεται ως:

$$Q = b_w * a_e * u_w$$

Το πλάτος λείανσης ορίζεται ως το πάχος κατά το οποίο υπάρχει «πραγματικά αλληλεπίδραση» του λειαντικού τροχού και του τεμαχίου. Εργαλειομηχανές που προορίζονται για κατεργασίες με μεγάλα πλάτη επαφής πρέπει να σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να αντέχουν τις αυξημένες καταπονήσεις και να μπορούν να αποδίδουν την απαραίτητα ισχύ.

Η επιφάνεια επαφής τέλος ορίζεται ως γινόμενο του πλάτους λείανσης και το μήκος τόξου του λειαντικού τροχού που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο $\{l_c\}$.

$$A_c = b_w * l_c$$

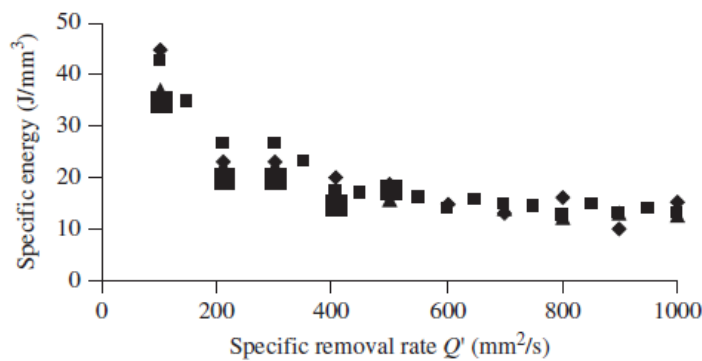
Η παραπάνω προσέγγιση εμπεριέχει αρκετές απλοποιήσεις βέβαια καθώς υπάρχουν παραμορφώσεις και η διαδικασία είναι δυναμική και η αλληλεπίδραση του τεμαχίου με το λειαντικό τροχό και τους κόκκους εξελίσσεται χρονικά.

Ειδική ενέργεια

Η ενέργεια λείανσης αποτελεί ένα εύχρηστο και αξιόπιστο μέσο για να εκτιμήσουμε την ικανότητα αποβολής υλικού του λειαντικού τροχού. Εξαρτάται άμεσα από τη ποιότητα του τροχού και από την κατεργασιμότητα του τεμαχίου. Ο ορισμός της ειδικής ενέργειας $\{e_c\}$ είναι το πηλίκο της ισχύος προς το ρυθμό αποβολής υλικού:

$$e_c = \frac{P}{Q}$$

Ερευνητές έχουν αποδείξει πειραματικά, ότι η ειδική ενέργεια μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αποβολής υλικού [σχήμα 2.11].



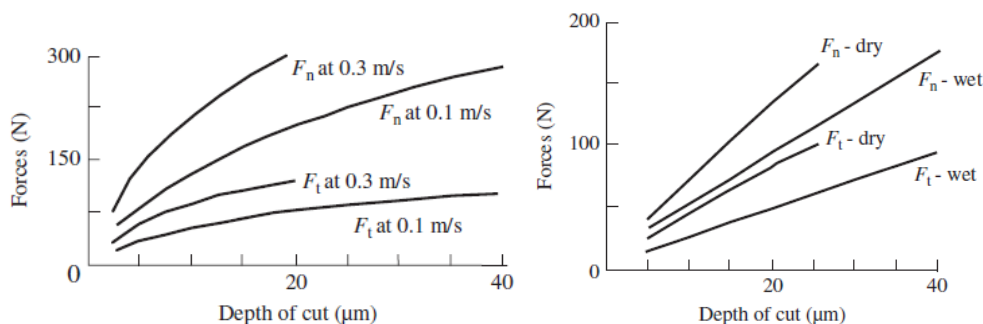
Μεταβολή της ειδικής ενέργειας συναρτήσει του ειδικού ρυθμού αποβολής υλικού (Comley et al.(2004)) [Σχήμα 2.11]

Δυνάμεις και ισχύς κατεργασίας

Η ισχύς της κατεργασίας υπολογίζεται μέσω των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Οι δυνάμεις αναλύονται σε τρεις συνιστώσες: την εφαπτομενική F_t , τη ορθή F_n και την αξονική F_a [σχήμα 2.12]. Σε κυλινδρική λείανση με πολύ μικρό βάθος κοπής η εφαπτομενική συνιστώσα είναι κάθετη και η ορθή είναι οριζόντια. Ο υπολογισμός ισχύος γίνεται με το τύπο:

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

Οι δυνάμεις κοπής μειώνονται με χρήση ψυκτικού υγρού και αυξάνονται καθώς αυξάνει το βάθος κοπής [σχήμα 2.12].



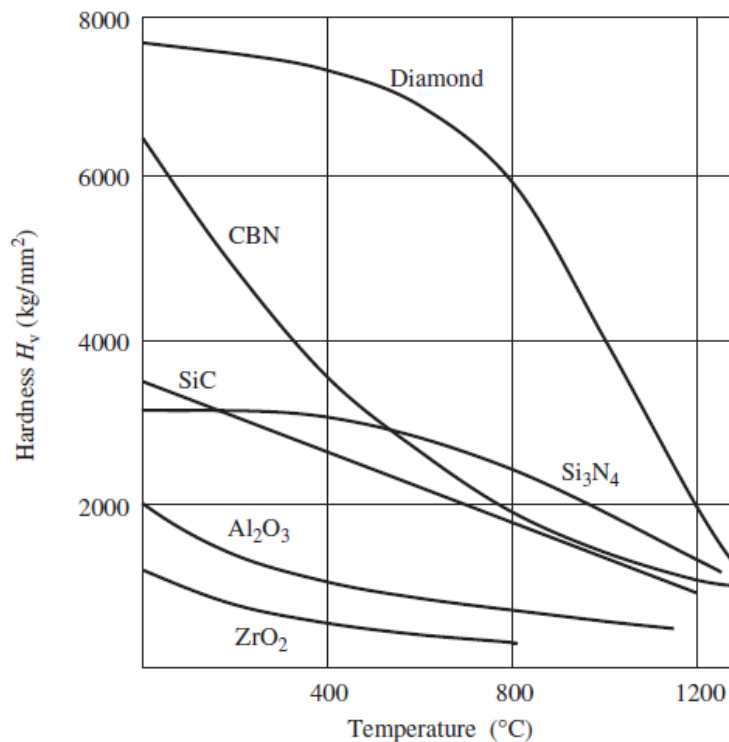
Δυνάμεις κοπής συναρτήσει του βάθος κοπής για διάφορες συνθήκες κατεργασίας. [Σχήμα 2.12]

Λειαντικοί τροχοί

Τις τελευταίες δεκαετίες καινούργια είδη και γεωμετρίες λειαντικών τροχών έχουν εισαχθεί στην βιομηχανία, αλλάζοντας άρδην τις δυνατότητες κατεργασίας, με τα νέα είδη λειαντικών τροχών να παρέχουν δυνατότητες για υψηλή ακρίβεια και αυξημένους ρυθμούς αποβολής υλικού. Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής εξειδικευμένων λειαντικών τροχών, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες της κατεργασίας. Ο λειαντικός τροχός αποτελείται από τους κόκκους λείανσης οι οποίοι αποτελούν και τις κοπτικές ακμές, και το συνδετικό υλικό το οποίο διατηρεί τη απαραίτητη τοπογραφία επιφανείας, προκειμένου να επιτευχθεί η κατεργασία.

Κόκκοι λείανσης

Η πλέον σημαντική ιδιότητα των κόκκων λείανσης είναι η σκληρότητα τους. Αποτελούν μείζονος σημασίας χαρακτηριστικά η διατήρηση της σκληρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και η δυνατότητα να μην αντιδρούν οι λειαντικοί κόκκοι με το τεμάχιο μέσω χημικών μηχανισμών ή μηχανισμών διάχυσης. Η σκληρότητα στην πλειοψηφία των λειαντικών τροχών μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας [σχήμα 2.13], με εξαίρεση το υλικό SiO_2 του οποίου η σκληρότητα αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο μαλακά υλικά είναι κατάλληλα και χρησιμοποιούνται κυρίως για κατεργασίες φινιρίσματος. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για κατασκευή λειαντικών τροχών εξαρτώνται από τη μέθοδο κατασκευής, και τα κραματικά στοιχεία που προστίθενται. Η ευθραυστότητα των κόκκων είναι επίσης ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του λειαντικού τροχού. Πιο «ψαθυρά – εύθραυστα» υλικά δημιουργούν κόκκους πιο «κοφτερούς», χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες με χαμηλότερα φορτία, και έχουν υψηλότερους ρυθμούς φθοράς. Τα υλικά των κόκκων κατηγοριοποιούνται σε συμβατικά υλικά λείανσης (conventional), και υπέρ-υλικά (superabrasives).



Μεταβολή της σκληρότητας υλικού των κόκκων συναρτήσει της θερμοκρασίας [Σχήμα 2.13]

Superabrasives

Με τον όρο αυτό εννοούμε το **διαμάντι** και το **CBN**, υλικά πολύ υψηλότερης σκληρότητας από αυτά των συμβατικών λειαντικών τροχών. Φυσικά είναι πολύ ακριβότερα από τα συμβατικά υλικά, αλλά χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η κατεργασία είναι εφικτή μόνο με τέτοιου είδους λειαντικό τροχό, και όταν λόγω χαμηλότερων ρυθμών φθοράς μειώνεται το συνολικό κόστος κατεργασίας ανά τεμάχιο.

Το διαμάντι είναι το σκληρότερο γνωστό υλικό, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λείανση εξαιρετικά δυσκατέργαστων και σκληρών υλικών, ακόμα και κεραμικών. Με δεδομένο ότι το διαμάντι είναι μορφή άνθρακα, δεν ενδείκνυται για κατεργασία χάλυβα. Η διαλυτότητα του άνθρακα σε χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα, οδηγεί σε αυξημένη φθορά η οποία και αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Παρά την μεγάλη αντοχή σε μηχανική καταπόνηση, οι λειαντικοί τροχοί από διαμάντι είναι ευάλωτοι σε χημική αποδόμηση (chemical degradation), σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας παρουσία οξυγόνου.

Το CBN (Cubic Boron Nitride) είναι το δεύτερο σκληρότερο υλικό και χρησιμοποιείται ευρέως στην κατεργασία χάλυβα. Αν και ακριβότερο από τα συμβατικά υλικά, αποτελεί βέλτιστη επιλογή σε οικονομίες κλίμακας. Έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα συμβατικά υλικά για κατεργασίες χάλυβα λόγω της αυξημένης αντοχής σε φθορά, και τη δυνατότητα να έχουμε υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια στο τελικό προϊόν. Σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργεί στρώματα οξειδίων βορίου, τα οποία είναι διαλυτά σε νερό. Για το λόγο αυτό ως υγρό λείανσης χρησιμοποιείται ιδανικά υγρά με βάση έλαια.

Συμβατικά υλικά

Αναφέρονται κυρίως σε **οξείδια αλουμινίου (Al_2O_3)**, **καρβίδια πυριτίου (SiC)**, (**ZrO₂** ή **zirconia**). Το καρβίδιο πυριτίου είναι σκληρότερο από τα συμβατικά υλικά, αλλά έχει χαμηλότερη αντοχή σε κρουστικά φορτία σε σχέση με τα οξείδια αλουμινίου και παρουσιάζει υψηλούς ρυθμούς φθοράς. Η φθορά αυτή αυξάνεται κι άλλο όταν κατεργαζόμαστε μέταλλα «συναφή» με τον άνθρακα, όπως σίδηρο και νικέλιο, για αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε κατεργασίες μη σιδηρούχων υλικών. Το οξείδιο του αλουμινίου ή αλλιώς κορούνδιο χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος κατεργασιών σιδηρούχων υλικών, συμπεριλαμβανομένου και του χάλυβα. Ανάλογα με την διαδικασία κατασκευής οι κόκκοι μπορεί να είτε αιχμηροί είτε πιο «χονδροί». Χονδρόκοκκοι λειαντικοί τροχοί, οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή σε κρουστικά φορτία χρησιμοποιούνται για κατεργασίες με αυξημένους ρυθμούς αποβολής υλικού. Επίσης σε περιπτώσεις με αυξημένους ρυθμούς αποβολής υλικού, όπου χρειαζόμαστε υλικά υψηλής αντοχής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε **ζirkονία**.

Superabrasives

Diamond 64 GPa

Cubic boron nitride (CBN) 45 GPa

Conventional abrasives

Silicon carbide 24.5 GPa

Aluminium oxide 13.5–22.2 GPa

Cemented carbides 14–18 GPa

Quartz 0.78 GPa

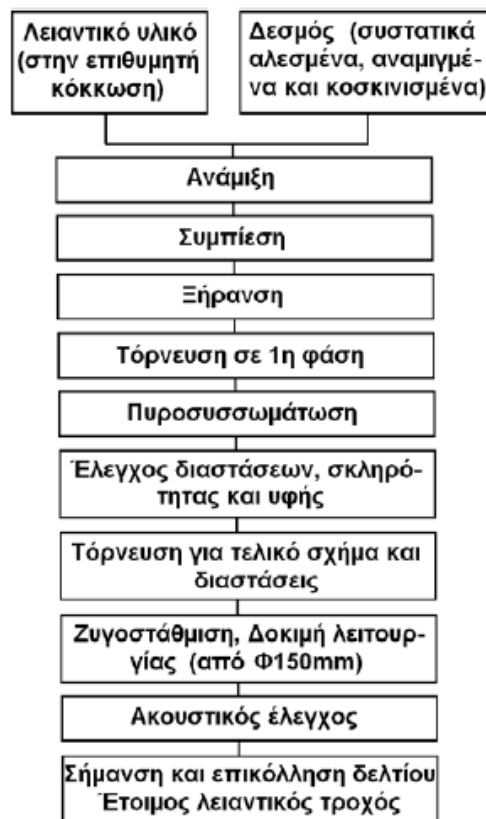
Glass 0.3–0.5 GPa

Σκληρότητα υλικών λειαντικών τροχών [Σχήμα 2.14]

Συνδεδειγμένο Υλικό

Ανάλογα με το υλικό του δεσμού, ο λειαντικός τροχός χαρακτηρίζεται ως εξής:

- **V:** Δεσμός από κεραμικό υλικό το οποίο είναι υαλώδες, ψαθυρό και υψηλής αντοχής. Δεν επηρεάζεται από το νερό ή το λάδι και αντέχει σε ήπια θέρμανση. Είναι κατάλληλος τόσο για υγρή όσο και ξηρή λείανση. Αντιπροσωπεύει πάνω από το 75% του συνόλου των λειαντικών τροχών.
- **S:** Δεσμός από υδρύαλο (πυριτικό υλικό). Κατάλληλος για τρόχισμα ειδικών εργαλείων, όπου η παραγωγή θερμότητας πρέπει να είναι κατά το δυνατόν χαμηλότερη και δεν ενδιαφερόμαστε για τη φθορά του λειαντικού τροχού.
- **B:** Δεσμός από σύνθετες ρητίνες με σημαντική αντοχή σε κρουστικά φορτία. Χρησιμοποιείται σε λείανση υψηλών ταχυτήτων και με αυξημένο ρυθμό αφαίρεση υλικού, και σε λειαντικούς τροχούς κοπής.
- **BF:** Δεσμός από ρητινικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- **R:** Δεσμός από ελαστικό με πολύ υψηλή αντοχή σε κρούση. Ιδανικό για υψηλές ταχύτητες λείανσης, ευαίσθητο σε υψηλές θερμοκρασίες και χρήση ψυκτικού υγρού. Μέγιστο πάχος κατασκευής 3mm και χρήση σε απαιτητικές κατεργασίες σκληρών υλικών.
- **RF:** Δεσμός από ελαστικό υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- **M:** Δεσμός από μεταλλικό υλικό (Al, κράματα Cu, μπρούτζου, και σπάνια χάλυβα). Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε αδαμαντοτροχούς λόγω υψηλής αντοχής, και σε τροχούς ηλεκτροχημικής λείανσης λόγω της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας.



Διαδικασία κατασκευής λειαντικού τροχού [Σχήμα 2.15]

Διαδικασία Σκλήρυνσης

[Ενότητα 3]

Μηχανισμοί σκλήρυνσης – ισχυροποίησης

Για πληρότητα θα αναφέρουμε συνοπτικά τις μεθόδους σκλήρυνσης, αν και ο μηχανισμός που μελετάται στη παρούσα εργασία είναι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ο οποίος και θα αναλυθεί ξεχωριστά.

Σκλήρυνση μεταλλικού υλικού είναι η ισχυροποίησή του έναντι πλαστικής παραμόρφωσης και χαρακτηρίζεται από την αύξηση σκληρότητας, του ορίου διαρροής (σ_y) και της αντοχής του (UTS).

Η πλαστική παραμόρφωση ενός μετάλλου προέρχεται από την ολίσθηση των αταξιών πάνω σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (επίπεδα ολίσθησης), όταν εφαρμόζεται εξωτερική διατμητική τάση (τ_c). Η κρίσιμη διατμητική τάση (τ_c) σχετίζεται άμεσα με το όριο διαρροής (σ_y).

Η αντίσταση που προβάλλει ένα μέταλλο σε πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται με την παρεμπόδιση ολίσθησης των αταξιών μέσα στον όγκο του.

Οι βασικότεροι μηχανισμοί ισχυροποίησης των μεταλλικών υλικών είναι:

- Η **πλεγματική αντίσταση – μαρτενσιτικό μετασχηματισμό**, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλει το ίδιο το κρυσταλλικό πλέγμα στην ολίσθηση γραμμικών αταξιών μέσα σε αυτό. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από την πυκνότητα του επιπέδου και της διεύθυνσης ολίσθησης.
- Η **ενδοτράχυνση**, που οφείλεται στη ραγδαία αύξηση της πυκνότητας των γραμμικών αταξιών και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το υλικό.
- Η ισχυροποίηση **στερεού διαλύματος ή κραμάτωσης**, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των γραμμικών αταξιών με άτομα παρεμβολής ή αντικατάστασης. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από την περιεκτικότητα του κράματος στα διάφορα κραματικά στοιχεία.
- Η ισχυροποίηση από **σύνορα κόκκων**, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν τα σύνορα των κόκκων στην ολίσθηση των γραμμικών αταξιών. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το μέγεθος των κόκκων.
- Ισχυροποίηση από **καθίζηση και διασπορά δευτερευουσών φάσεων**, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν σωματίδια άλλων φάσεων. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το κλάσμα όγκου και το μέσο μέγεθος των σωματιδίων των δευτερευουσών φάσεων.

Σκλήρυνση με μαρτενσιτικό μετασχηματισμό

Διάγραμμα Φάσεων

Με τον όρο «φάση» ορίζουμε μια ξεχωριστή και διακριτή κατάσταση ύλης, στην οποία μπορεί να βρίσκεται ένα υλικό. Ο ορισμός «εφαρμόζεται» τόσο σε κρυσταλλικά όσο και μη κρυσταλλικά υλικά παρέχοντας έναν «εύχρηστο» τρόπο να εκφράζουμε την κατάσταση – δομή του υλικού. Έτσι ο «καθαρός σίδηρος» δεδομένου ότι μπορεί να «εμφανιστεί» σε στερεά μορφή με τρεις διαφορετικές κρυσταλλικές δομές, σε υγρή μορφή και σε αέρια, συνολικά συναντάται σε πέντε διαφορετικές «φάσεις». Υπό συγκεκριμένες συνθήκες δύο ή περισσότερες φάσεις μπορούν να συνυπάρχουν.

Όταν αναφερόμαστε σε μια συγκεκριμένη «φάση υλικού» θα εννοούμε μια περιοχή που περιλαμβάνει έναν «αρκούντως μεγάλο» αριθμό από άτομα ή μόρια (π.χ. σιδήρου), και διαχωρίζεται με «σαφή όρια» (existence of a bounding surface) από παρακείμενες φάσεις. Τοπικές «διαταραχές» αγνοούνται. Παρότι ένα καθαρό μέταλλο, σε θεωρητικό επίπεδο, ορίζεται ως μονοφασικό στερεό, είναι πιθανόν να περιέχει (όπως έχουμε προαναφέρει) κόκκους και τα όρια αυτών, διαφοροποιήσεις συγκέντρωσης (concentration gradients), και «ατέλειες» (κενά και μετατοπίσεις πλέγματος κ.τ.λ.). Οι μέθοδοι κατεργασίας ευνοούν την δημιουργία μετασταθών φάσεων, οι οποίες στη συνέχεια χρειάζονται μια επιπλέον διεργασία (π.χ. θερμική) για να «ισορροπήσουν» σε θερμοδυναμικά σταθερή κατάσταση.

Ισορροπία Φάσεων

Θερμοδυναμική ισορροπία συστήματος υφίσταται όταν το σύστημα ευρίσκεται ταυτόχρονα σε μηχανική (ελάχιστη δυναμική), θερμική (δεν υφίστανται θερμοκρασιακές διαφορές και άρα ροή θερμότητας), και χημική ισορροπία.

Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων είναι η γραφική παράσταση με συντεταγμένες τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση κάποιου συστατικού του συστήματος, που περιγράφει τις περιοχές ύπαρξης – συνύπαρξης των φάσεων αυτού.

Από τη μελέτη ενός διαγράμματος ισορροπίας φάσεων προκύπτουν:

- Το είδος, ο αριθμός, και η χημική σύσταση των υπαρχουσών φάσεων σε διάφορες συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες και υπό συνθήκες **πολύ αργής απόψυξης** (ισορροπία).
- Η διαλυτότητα σε στερεά κατάσταση των διαφόρων συστατικών μεταξύ τους (και πάλι υπό συνθήκες ισορροπίας).
- Οι θερμοκρασίες τήξης των διάφορων φάσεων, οι θερμοκρασίες στερεοποίησης των σχηματιζόμενων κραμάτων σε συνθήκες ισορροπίας, και το θερμοκρασιακό εύρος της στερεοποίησης αυτής (η περιοχή θερμοκρασιών που ολοκληρώνεται η στερεοποίηση αυτή).

Σε κάθε διάγραμμα ισορροπίας διακρίνουμε:

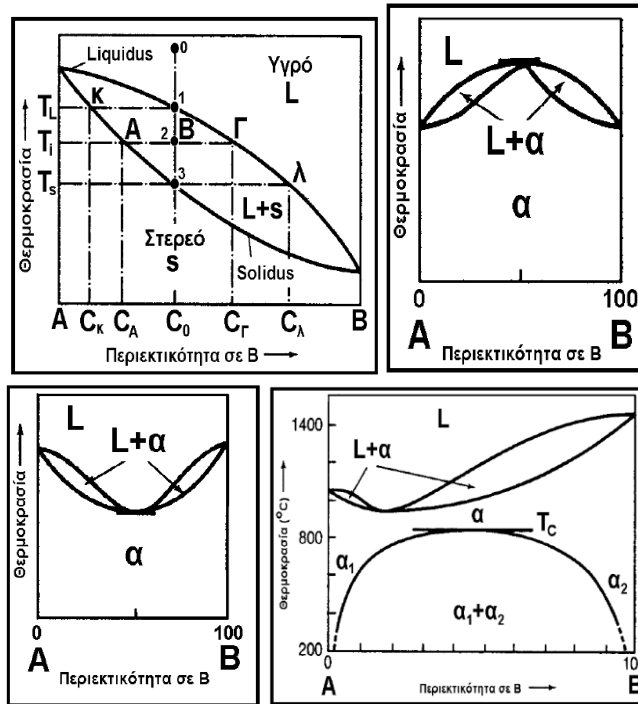
- **Καμπύλη liquidus:** ορίζει τη θερμοκρασία πάνω από την οποία έχουμε μόνο υγρή φάση κράματος.
- **Καμπύλη solidus:** ορίζει τη θερμοκρασία κάτω από την οποία έχουμε μόνο στερεό κράμα.
- **Καμπύλη solvus:** Καμπύλη στο διάγραμμα που ορίζει την θερμοκρασιακή εξάρτηση της στερεάς διαλυτότητας του μετάλλου Β στο κρυσταλλικό πλέγμα του Α.
- **Περιοχή αποχωρισμού φάσεων:** περιοχή του διαγράμματος που οριοθετείται από τις καμπύλες liquidus και solidus.
- **Καμπύλη απόψυξης:** μεταβολή της θερμοκρασίας απόψυξης για σταθερή περιεκτικότητα.

Τα διαγράμματα ισορροπίας ανάλογα με τη διαλυτότητα στις διάφορες φάσεις και το είδος των συστατικών των φάσεων κατηγοριοποιούνται σε:

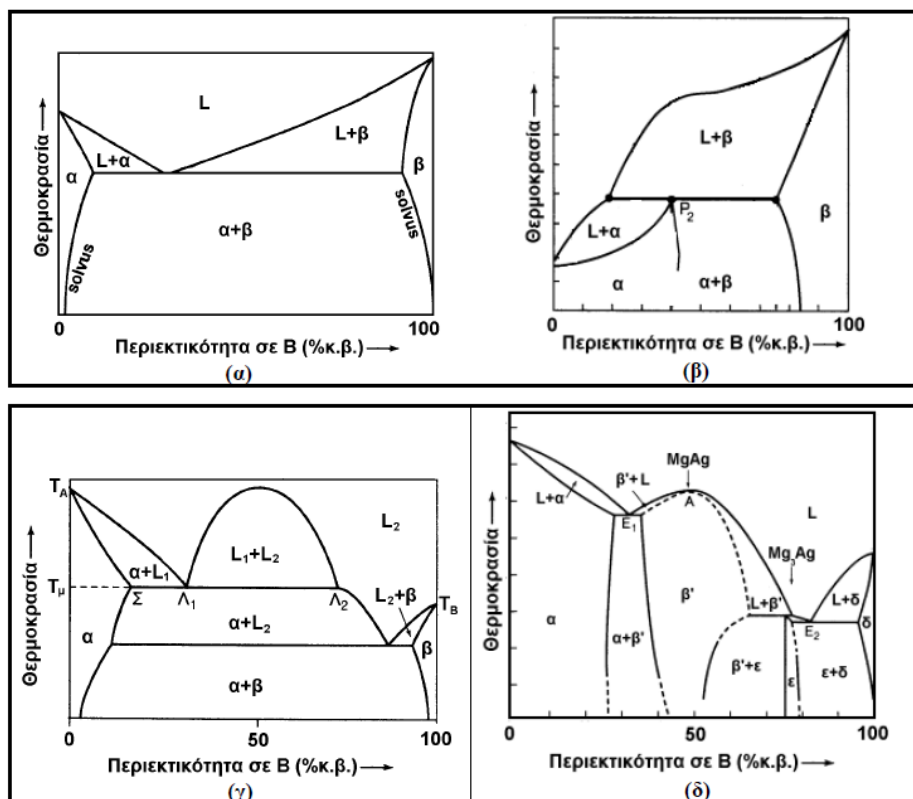
- Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων με πλήρη αναμιξιμότητα και στην υγρή και στην στερεά φάση και σε κάθε αναλογία [σχήμα 3.1], τα οποία με τη σειρά τους διακρίνονται σε:
 - Διαγράμματα χωρίς ενδιάμεσο ακρότατο
 - Διαγράμματα με ενδιάμεσο ακρότατο
 - Διαγράμματα με τοπικό ελάχιστο
 - Διαγράμματα με χάσμα αναμιξιμότητας
- Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων με μερική αναμιξιμότητα στη στερεή ή / και στην υγρή φάση [σχήμα 3.2], τα οποία και αυτά διακρίνονται σε:
 - Διαγράμματα με ευτηκτικό σημείο
 - Διαγράμματα με περιτηκτικό σημείο
 - Διαγράμματα με μονοτηκτικό σημείο
 - Διαγράμματα με ενδιάμεσες φάσεις

Μετασχηματισμός	Αντίδραση (μέσω απόψυξης)	Χαρακτηριστική μορφή στο διάγραμμα φάσεων
Ευτηκτικός	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Ευτηκτοειδής	$\alpha \rightarrow \beta + \gamma$	
Περιτηκτικός	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Περιτηκτοειδής	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	
Μονοτηκτικός	$L_1 \rightarrow \alpha + L_2$	

$\alpha / \beta / \gamma$: στερεές φάσεις, L, L_1, L_2 : υγρές φάσεις
 Μετασχηματισμοί χάλυβα [Πίνακας 3.1]



Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων πλήρους αναμιξιμότητας: α) χωρίς ενδιάμεσο ακρότατο, β) με μέγιστο, γ) με ελάχιστο, δ) με χάσμα διαλυτότητας. [Σχήμα 3.1]



Διαγράμματα ισορροπίας φάσεων μη πλήρους αναμιξιμότητας: α) με ευτηκτικό σημείο, β) με περιτηκτικό σημείο γ) με μονοτηκτικό σημείο, δ) με ενδιάμεσες φάσεις [Σχήμα 3.2]

Διάγραμμα ισορροπίας Fe – C

Το διάγραμμα ισορροπίας Fe – C απεικονίζεται με δύο τρόπους:

- Ως μετασταθές διάγραμμα Fe – Fe₃C (σιδήρου – σεμεντίτη) [σχήμα 3.3].
- Ως ευσταθές διάγραμμα Fe – C (σιδήρου – γραφίτη).

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας αν και δεν είναι πραγματικό διάγραμμα ισορροπίας (αλλά μετασταθές), διότι παρέχει την ευχέρεια καλύτερης παρακολούθησης των μεταλλογραφικών μετασχηματισμών κατά τη θέρμανση ή τη ψύξη ενός κράματος Fe – C.

Οι διαφορές ανάμεσα στα δύο διαγράμματα ισορροπίας είναι:

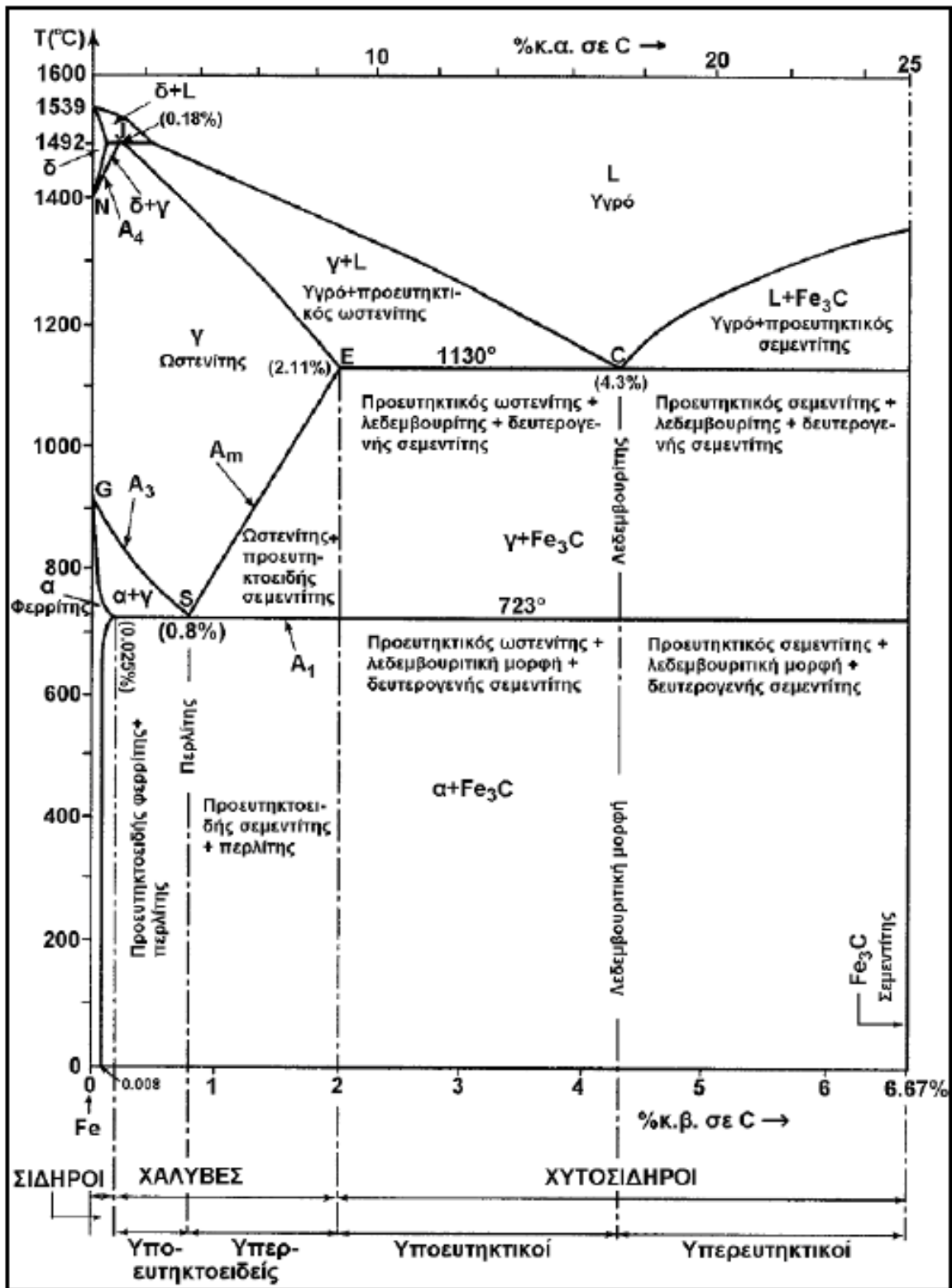
- Η ταχύτητα απόψυξης του ευσταθούς διαγράμματος είναι πολύ μικρότερη αυτής του μετασταθούς.
- Η ευτηκτική θερμοκρασία στο ευσταθές είναι 1135 °C ενώ στο μετασταθές 1130 °C.
- Η ευτηκτική περιεκτικότητα σε C στο ευσταθές είναι 4.25% ενώ στο μετασταθές 4.30%.
- Η ευτηκτοειδής θερμοκρασία στο ευσταθές διάγραμμα είναι 738 °C ενώ στο μετασταθές 723 °C.
- Η ευτηκτοειδής περιεκτικότητα C είναι για το ευσταθές 0.69% ενώ για το μετασταθές 0.80%.
- Οι χυτοσίδηροι του ευσταθούς διαγράμματος ονομάζονται «φαιοί χυτοσίδηροι» και έχουν κύριο συστατικό γραφίτη υπό μορφή φυλλιδίων (“flakes”) και περιεκτικότητα σε πυρίτιο {Si} > 0.7% κ.β., ενώ οι χυτοσίδηροι του μετασταθούς διαγράμματος ονομάζονται «λευκοί χυτοσίδηροι» και έχουν ως κύριο συστατικό σεμεντίτη υπό μορφή δενδριτική με περιεκτικότητα σε πυρίτιο {Si} < 0.5% κ.β..

Ανάλογα με τη περιεκτικότητα σε C διακρίνουμε:

- Περιοχή καθαρού σιδήρου: $\pi(C) < 0.008\%$
- Περιοχή χαλύβων με περιεκτικότητα: $0.008\% < \pi(C) < 2.11\%$ (με περιεκτικότητες όμως μεγαλύτερες από 1% σπανίως να χρησιμοποιούνται).
- Περιοχή χυτοσιδήρων με περιεκτικότητα: $2.11\% < \pi(C) < 6.67\%$ (στην πράξη έχουμε περιεκτικότητες έως 4.5%).

Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

- A₀: θερμοκρασία του σημείου Curie του σεμεντίτη (210 °C)
- A1: ευτηκτοειδής θερμοκρασία (723 °C)
- A2: θερμοκρασία του σημείου Curie του φερρίτη (768 °C)
- A3: θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης για $\pi(C) \leq 0.8\%$, που αντιστοιχεί στα σημεία της καμπύλης GS και είναι συνάρτηση της $\pi(C)$.
- A4: θερμοκρασία μετασχηματισμού του ωστενίτη σε δ – φερρίτη, που αντιστοιχεί στα σημεία της καμπύλης NJ και είναι συνάρτηση της $\pi(C)$.
- A_m: θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης για $0.8\% \leq \pi(C) \leq 2.11\%$, που αντιστοιχεί στα σημεία της καμπύλης SE και είναι συνάρτηση της $\pi(C)$.



Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe - Fe₃C
[Σχήμα 3.3]

Διάγραμμα TTT και CCT

Οι περισσότεροι μετασχηματισμοί που λαμβάνουν χώρα σε στερεά κατάσταση δεν πραγματοποιούνται στιγμιαία, καθώς υπάρχουν «εμπόδια» τα οποία επιβραδύνουν την εξέλιξη της αντίδρασης, η οποία εξαρτάται από το χρόνο. Ένα τέτοιο «εμπόδιο» είναι το γεγονός ότι οι περισσότεροι μετασχηματισμοί οδηγούν στο σχηματισμό τουλάχιστον μια νέα φάση, η οποία εμφανίζει διαφορετική κρυσταλλική δομή από εκείνη του μητρικού πλέγματος. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για ανακατανομή ατόμων μέσω διάχυσης, φαινόμενο χρονικά εξαρτώμενο. Ταυτόχρονα υπάρχει αύξηση της ενέργειας λόγω δημιουργίας περατωτικών ορίων μεταξύ της παλαιάς και της νέας φάσης, γεγονός που «δυσχεραίνει» το σχηματισμό της νέας φάσης.

Μελετώντας τη μικροδομή, το πρώτο στάδιο του σχηματισμού μιας νέας φάσης είναι η πυρηνοποίηση, ο σχηματισμός δηλαδή υπομικροσκοπικών σωματιδίων, των πυρήνων της νέας φάσης, σε σημεία συγκέντρωσης διαταραχών ή στα περατωτικά όρια των κόκκων. Σε δεύτερο στάδιο παρατηρείται η ανάπτυξη, κατά τη διάρκεια της οποίας οι πυρήνες αναπτύσσονται σε μέγεθος, ενώ συγχρόνως μέρος του όγκου της μητρικής φάσης εξαφανίζεται. Μετά από κάποιο χρόνο, για τον οποίο η καμπύλη μετασχηματισμού παρουσιάζει σημείο καμπής, η ταχύτητα αντίδρασης επιβραδύνεται. Η επιβράδυνση αυτή είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των αναπτυσσόμενων πυρήνων. Το τέλος του μετασχηματισμού πολλές φορές απαιτεί πολύ χρόνο και, ιδίως για χαμηλές θερμοκρασίες, και το σύστημα παραμένει σχεδόν συνεχώς εκτός ισορροπίας.

Η μελέτη της ισοθερμοκρασιακής εξέλιξης ενός κράματος εκτός ισορροπίας, αφορά τη μελέτη του ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού μετά από πυρηνοποίηση και ανάπτυξη κρυστάλλων και οδηγεί συνήθως σε κάποια «σιγμοειδή καμπύλη». Μελετώντας τους χάλυβες παρουσιάζεται συναρτήσε του χρόνου, για δεδομένη θερμοκρασία ο μετασχηματισμός ωστενίτη σε άλλες φάσεις (Temperature – Time – Transformation (TTT)).

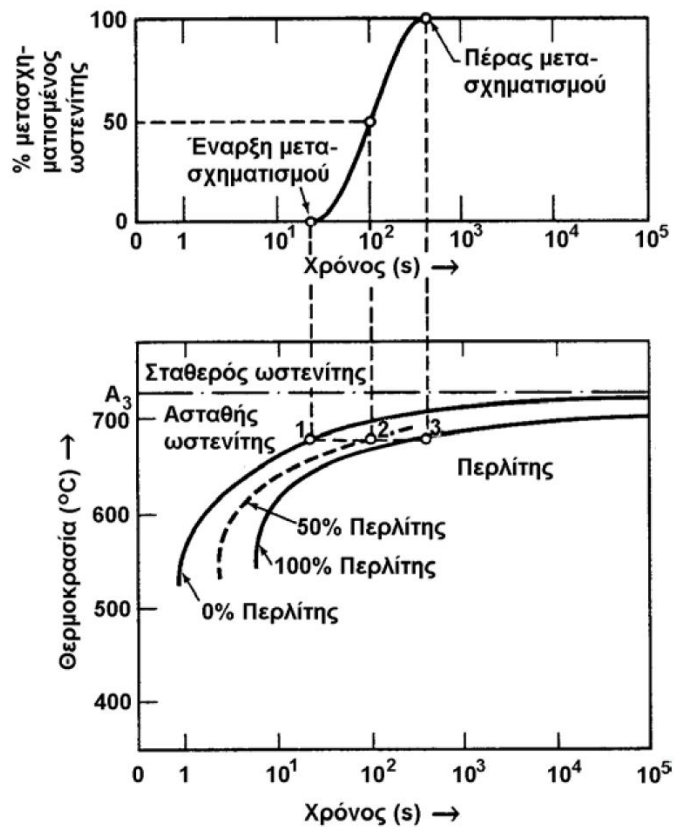
Η γνώση ενός νόμου ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού ενός κράματος εκτός ισορροπίας είναι ανεπαρκής εάν αυτός περιορίζεται σε μία μόνο θερμοκρασία. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα σύνολο καμπυλών ισοθερμοκρασιακών μετασχηματισμών για όλη τη περιοχή αστάθειας του κράματος. Για το μετασχηματισμό στερεάς κατάστασης το ποσοστό του μετασχηματισμού $\{y\}$ είναι συνάρτηση του χρόνου, και καλείται εξίσωση Avrami (Γ. Χρυσουλάκης, 2008).

$$y = 1 - e^{-k \cdot t^n}, \quad k, n \text{ σταθερές ανεξάρτητες χρόνου}$$

Ο τρόπος χάραξης των διαγραμμάτων TTT προτάθηκε από τον Bain και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.

Η περιεκτικότητα σε άνθρακα επηρεάζει την «θέση» των καμπυλών TTT. Αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα μετατοπίζει τις καμπύλες TTT προς τα δεξιά. Μεγαλύτερες μετατοπίσεις προκαλούν τα στοιχεία κραμάτωσης.

Τέλος σε ένα «πλήρες διάγραμμα TTT» απεικονίζεται τόσο ο περλιτικός όσο και ο μπαινιτικός μετασχηματισμός. Οι δύο αυτοί μετασχηματισμοί είναι ανταγωνιστικοί. Εάν μέρος του κράματος μετασχηματιστεί σε περλίτη ή μπαινίτη ο περαιτέρω μετασχηματισμός στο άλλο μικροσυστατικό είναι αδύνατος εάν δεν προηγηθεί ωστενιτοποίηση.



Δημιουργία ενός διαγράμματος ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού TTT από ένα διάγραμμα του % ποσοστού μετασχηματισμού του ωστενίτη σε περλίτη συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου, ενός χάλυβα. [Σχήμα 3.4]

Στις βιομηχανικές κατεργασίες, για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, οι μετασχηματισμοί των κραμάτων και ιδιαίτερα των χάλυβων, επιτυγχάνονται κατά τη διάρκεια μιας συνεχούς απόψυξης περισσότερο ή λιγότερο ταχείας. Οι μετασχηματισμοί δομής κατά τη συνεχή απόψυξη ενός χάλυβα από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι δυνατό να καταγραφούν βάσει μετρήσεων διαστολομετρίας, για διαφορετικές ταχύτητες απόψυξης. Τα σημεία έναρξης και τέλους των διάφορων μετασχηματισμών, καθώς το ποσοστό του μετασχηματισθέντος ωστενίτη, για κάθε τύπο χάλυβα συγκεντρώνονται σε ένα διάγραμμα, το οποίο καλείται συνεχές διάγραμμα CCT (Continuous Cooling Transformation). Τα διαγράμματα CCT χρησιμεύουν για την επιλογή της ταχύτητας απόψυξης, σε μια θερμική κατεργασία, έτσι ώστε το μέταλλο να αποκτήσει την απαιτούμενη τελική δομή.

Η κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης ή βαφής είναι εκείνη η ταχύτητα, που απαιτείται για 100% μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Επομένως στο διάγραμμα είναι εκείνη η ταχύτητα απόψυξης που εφάπτεται στην αριστερή πλευρά της «προεξοχής» του διαγράμματος. Η παρουσία του άνθρακα και άλλων κραματικών στοιχείων, όπως Cr, Ni, Mo, Mn, Si και W μετατοπίζουν την προεξοχή του περλίτη και του μπαϊνίτη προς τα δεξιά (όπως προαναφέρθηκε), με συνέπεια την ελάττωση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής, έτσι ώστε η θερμική κατεργασία να είναι πραγματοποιήσιμη πρακτικά.

Μηχανισμός Σκλήρυνσης

Ο μηχανισμός σκλήρυνσης για χάλυβες, στον οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια, συνηθίζεται στη βιβλιογραφία να ορίζεται απλά ως «σκλήρυνση», εν αντιθέσει με άλλες κατεργασίες σκλήρυνσης που ορίζονται με βάση τη διαδικασία που ακολουθείται (π.χ. εργοσκλήρυνση, σκλήρυνση με κραματοποίηση κ.τ.λ.).

Ο «καθαρός σίδηρος» συναντάται – σχηματίζει τρεις διαφορετικές «φάσεις»:

- Φερρίτη: Χωροκεντρωμένο σύστημα (fcc) → «α φάση».
- Ωστενίτη: Κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (bcc) → «γ φάση».
- Δ – Φερρίτη: Κυβικά χωροκεντρωμένο σύστημα → «δ φάση».

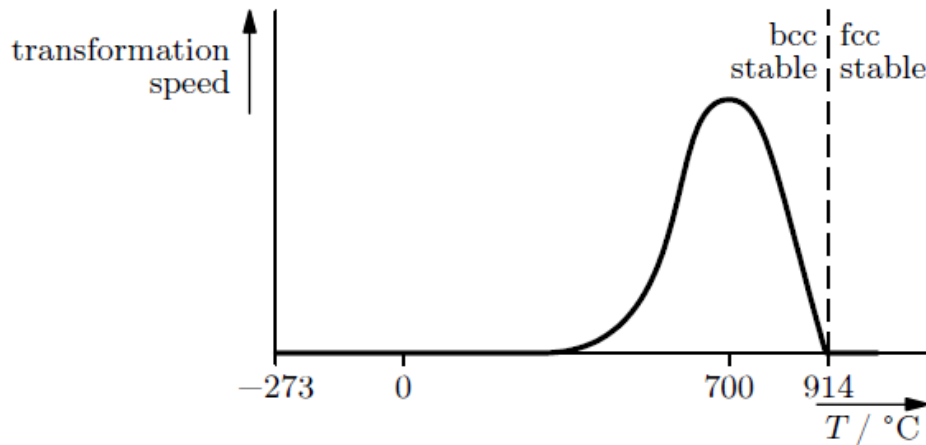
Στον «καθαρό σίδηρο», ο μετασχηματισμός ανάμεσα στη «α φάση» και στη «γ φάση», λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία 912 °C. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί επαρκώς αργή ψύξη από υψηλότερη θερμοκρασία, το κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένο. Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται με μηχανισμούς διάχυσης, με τα άτομα να «ανταλλάσσουν» θέσεις και να σχηματίζουν πυρήνες «α φάσης», οι οποίοι εν συνεχεία μεγαλώνουν – αναπτύσσονται, ενσωματώνοντας περισσότερα άτομα προερχόμενα από την «γ φάση».

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία βρίσκονται σε «μεταξύ τους αντίθεση». Η «κινητήριος δύναμη» (driving force) του μετασχηματισμού αυξάνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία. Η «κινητήριος δύναμη» είναι η ενεργειακή διαφορά (διαφορά ελεύθερης ενθαλπίας) ανάμεσα στη «α φάση», με τη χαμηλότερη ενέργεια, και στη «γ φάση», για θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας μετασχηματισμού. Ισχύει ότι όσο περισσότερο ψύχεται η «γ φάση» τόσο η αυξάνεται η «οδηγούσα δύναμη». Ταυτόχρονα όμως η δυνατότητα μοριακής διάχυσης μειώνεται εκθετικά με τη μείωση της θερμοκρασίας. Με έντονη ψύξη του υλικού, η μετακίνηση των ατόμων σε «νέες» θέσεις είναι εξαιρετικά δύσκολο. Έτσι η ταχύτητα μετασχηματισμού καθορίζεται από τις δύο αυτές παραμέτρους. Παρατηρείται μέγιστη ταχύτητα για θερμοκρασία περίπου 700 °C, και με περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας η ταχύτητα μειώνεται δραματικά [σχήμα 3.5]. Σε θεωρητική περίπτωση που μπορούσαμε να πετύχουμε ρυθμό ψύξης 10^5 K/sec ενός κρυστάλλου σιδήρου από τη «γ φάση» σε θερμοκρασία δωματίου, η «γ φάση» θα κρυσταλλοποιείτο σε μια μετασταθή κατάσταση με μηδενική δυνατότητα διάχυσης και με μεγάλη ενεργειακή διαφορά από τη θερμοδυναμικά σταθερή «α φάση».

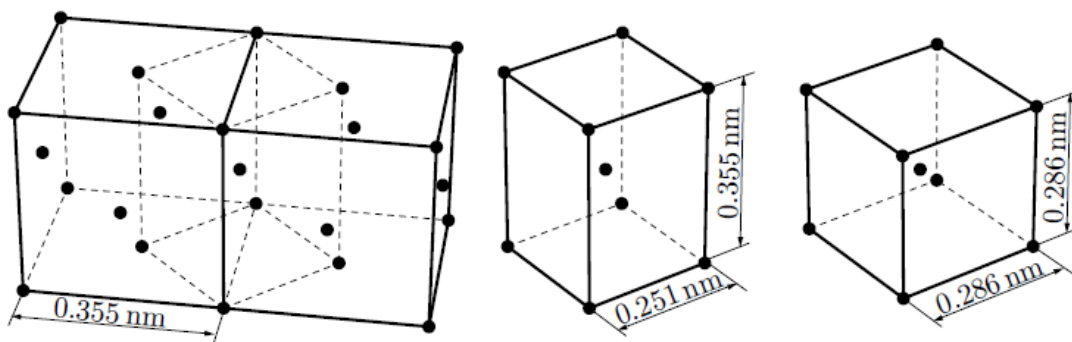
Πρακτικά δεν είναι δυνατόν να επιτύχουμε τέτοιους ρυθμούς ψύξης σε ένα κρύσταλλο σιδήρου. Αντί του μετασχηματισμού φάσεων με μηχανισμούς διάχυσης, έχουμε έναν μηχανισμό μετασχηματισμού που ονομάζεται «μαρτενσιτικός μετασχηματισμός» και ο οποίος δεν περιλαμβάνει διάχυση και άρα «ανταλλαγή ατόμων». Τα άτομα απλά «μετακινούνται ελαφρώς» (“slightly rearrange”) προκειμένου να σχηματίσουν την επιθυμητή χωροκεντρωμένη διάταξη από την προϋπάρχουσα εδροκεντρωμένη.

Η διαδικασία αυτή μπορεί εύκολα να απεικονιστεί συγκρίνοντας τα «στοιχειώδη κύτταρα» ενός χωροκεντρωμένου και ενός εδροκεντρωμένου συστήματος. Παρατηρώντας δύο γειτονικά «κύτταρα» στο εδροκεντρωμένο σύστημα, βλέπουμε ένα χωροκεντρωμένο «κύτταρο», συμπίεσμένο κατά τις δύο διαστάσεις και διεσταλμένο κατά τη τρίτη διάσταση [σχήμα 3.6]. Μια πολύ μικρή μετατόπιση των ατόμων αυτού του συστήματος, μπορούν να το μετατρέψουν σε χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα. Ο μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει χώρα δίχως διάχυση,

και η απαραίτητη ενέργεια προέρχεται από το ότι θερμοδυναμικά η «α φάση» βρίσκεται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από τη «γ φάση». Λόγω του ότι κόκκοι με διαφορετική κατεύθυνση παραμορφώνονται αυτόνομα και σε διαφορετικές χωρικές διευθύνσεις (spatial directions), αναπτύσσονται σημαντικές παραμένουσες τάσεις στο τεμάχιο.



*Ταχύτητα μετασχηματισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας
[Σχήμα 3.5]*



*α) Δύο εδροκεντρωμένα κύτταρα ωστενίτη, β) Τμήμα του «πλέγματος»
ωστενίτη του σχήματος «α», γ) Μαρτενσίτης
[Σχήμα 3.6]*

Η παρούσα προσέγγιση, παντελούς απουσίας διάχυσης, δεν είναι απόλυτα ακριβής σύμφωνα με κάποιους μελετητές (Bain). Πειράματα με χρήση ακτίνων - X έδειξαν ότι στην πραγματικότητα οι επιφάνειες (111) ενός εδροκεντρωμένου πλέγματος, γίνονται οι επιφάνειες (011) ενός χωροκεντρωμένου πλέγματος.

Ο προαναφερθείς μετασχηματισμός ξεκινάει σε διάφορα σημεία εντός του κρυσταλλικού πλέγματος και συνεχίζεται με ταχύτητα σχεδόν ίση με τη ταχύτητα του ήχου. Η κίνηση των ατόμων είναι «συντονισμένη», με τα άτομα που «γεινιάζουν» σε είδη μετασχηματισμένες περιοχές να «αλλάζουν» δομή. Ο προσανατολισμός του νέου πλέγματος δεν είναι τυχαίος αλλά εξαρτάται από αυτόν που είχε η «γ φάση». Η «α φάση» συνήθως «αναπτύσσεται» σε δύο διαστάσεις, σχηματίζοντας βελονοειδή δομή (lens shaped structure) [σχήμα 3.7]. Λόγω του ότι σε κάθε κόκκο εξελίσσονται ταυτόχρονα διάφοροι μετασχηματισμοί, η μικροδομή που δημιουργείται είναι εξαιρετικά «λεπτή» (fine microstructure). Η «λεπτή» αυτή μικροδομή που δημιουργεί ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, έχει ως αποτέλεσμα τη σκλήρυνση του υλικού, με τον μεγάλο αριθμό «περιοχών διεπαφής» (interfaces), να λειτουργούν κατά παρεμφερή τρόπο με «όρια κόκκων» (grain boundaries). Επιπλέον η «πυκνότητα των μετατοπίσεων» (dislocation density) αυξάνεται σημαντικά χάρη στην «μηχανική παραμόρφωση» (mechanical distortion) που εμφανίζεται.

Πρακτικά είναι σχεδόν αδύνατον να επιτευχθεί σκλήρυνση «καθαρού σιδήρου» με αυτόν τον τρόπο λόγω του εξαιρετικά υψηλού ρυθμού ψύξης που απαιτείται. Παρ' όλα αυτά η προσθήκη άνθρακα μειώνει σημαντικά τους απαιτούμενους ρυθμούς ψύξης, καθιστώντας δυνατή την ανάπτυξη – εξέλιξη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Επιπλέον η προσθήκη άνθρακα στο κράμα, σκληραίνει αυτούσια το υλικό. Η διαλυτότητα του άνθρακα είναι πού μικρότερη σε «χωροκεντρωμένο» πλέγμα σε σχέση με αυτή σε «εδροκεντρωμένο», καθώς τα διάκενα είναι μικρότερα. Στην περίπτωση που «γ φάση» με σημαντική ποσότητα διαλυμένου άνθρακα (>0.008 wt%) ψυχθεί, ο άνθρακας παραμένει διαλυμένος στο «χωροκεντρωμένο» πλέγμα. Τα άτομα άνθρακα παραμορφώνουν έντονα το «κυβικό χωροκεντρωμένο πλέγμα» σε τετραγωνικό [σχήμα 3.8]. Αυτό το «παραμορφωμένο» πλέγμα αποκτά ιδιαίτερη αντοχή όταν υφίσταται υπερκορεσμό (oversaturated), καθώς τα τασικά πεδία (stress fields) δεν μπορούν να «διέλθουν των μετατοπίσεων». Ως γενικό κανόνα θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο παραπάνω μηχανισμός λαμβάνει χώρα για συγκεντρώσεις άνθρακα υψηλότερες του 0.2%. Το υλικό όμως γίνεται με αυτό τον τρόπο εξαιρετικά ψαθυρό.

Για να μειώσουμε – περιορίσουμε τη ψαθυρότητα του υλικού ακολουθεί μετέπειτα θερμική κατεργασία που ονομάζεται «βαφή – επαναφορά» (tempering). Με τον τρόπο αυτό μειώνεται μέρος της παραμόρφωσης του πλέγματος, με το «λεπτό διαχωρισμό και ανακατανομή καρβιδίων σεμενίτη» (precipitation finely distributed carbide Fe₃O). Με τον τρόπο αυτό αν και μειώνεται η σκληρότητα, αυξάνεται σημαντικά η ολκιμότητα του υλικού.

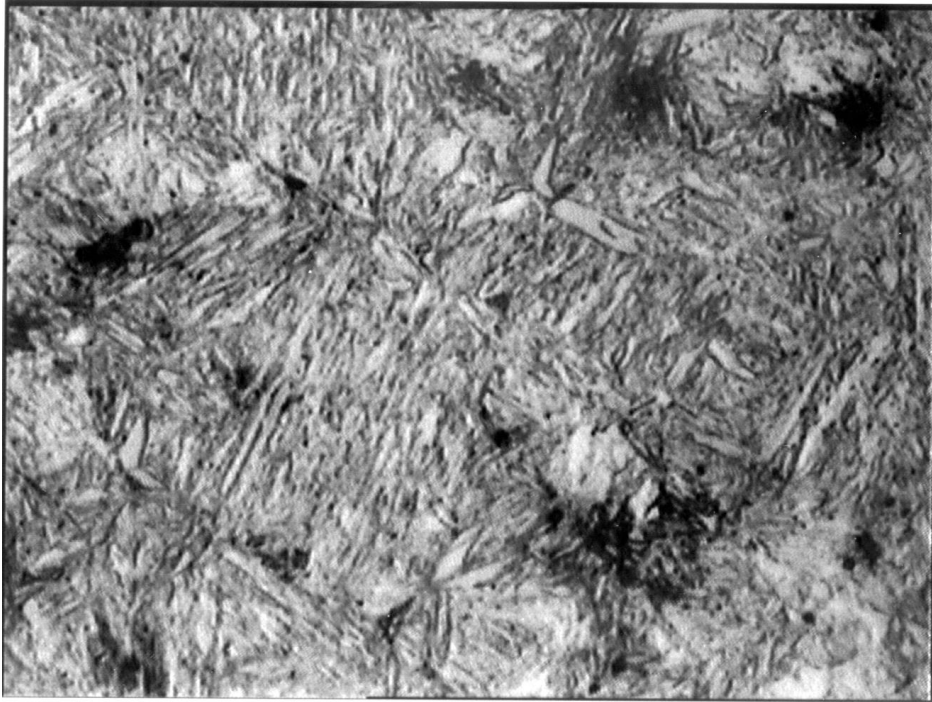
Η δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα «έντονα υπερκορεσμένο» υλικό αποτελεί βασικό στόχο – πρόκληση στην βιομηχανία χάλυβα. Τέλος η ωστενιτική φάση μπορεί να σταθεροποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση διάφορων υλικών – πρόσθετων και τη δημιουργία πιο «σύνθετων» κραμάτων.

Η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού {M_s} εξαρτάται από τη σύσταση του χάλυβα. Μια εμπειρική σχέση που προσδιορίζει τη θερμοκρασία αυτή είναι:

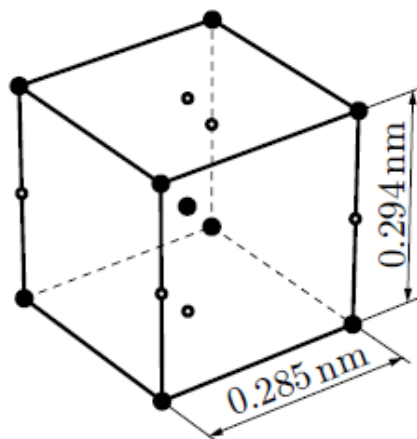
$$M_s = 539 - 463 * C - 30.4 * Mn - 17.7 * Ni - 12.1 * Cr - 7.5 * Mo$$

Τέλος μια εμπειρική σχέση που υπολογίζει το ποσοστό μαρτενσίτη για θερμοκρασίες ανάμεσα στις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες έναρξης $\{M_s\}$ και λήξης $\{M_f\}$ του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι η εμπειρική σχέση:

$$\mu(T) = 1 - e^{-a*(M_s-T)}, \quad \text{α σταθερά και } T \text{ η θερμοκρασία}$$



Μαρτενσίτης από χάλυβα 0.35% C με ψύξη σε νερό από τους 870 °C
[Σχήμα 3.7]



«Παραμορφωμένο» κύτταρο μαρτενσίτη. Ο διαλυμένος άνθρακας μπορεί να βρεθεί σε κάποια από τις «τονισμένες» θέσεις.

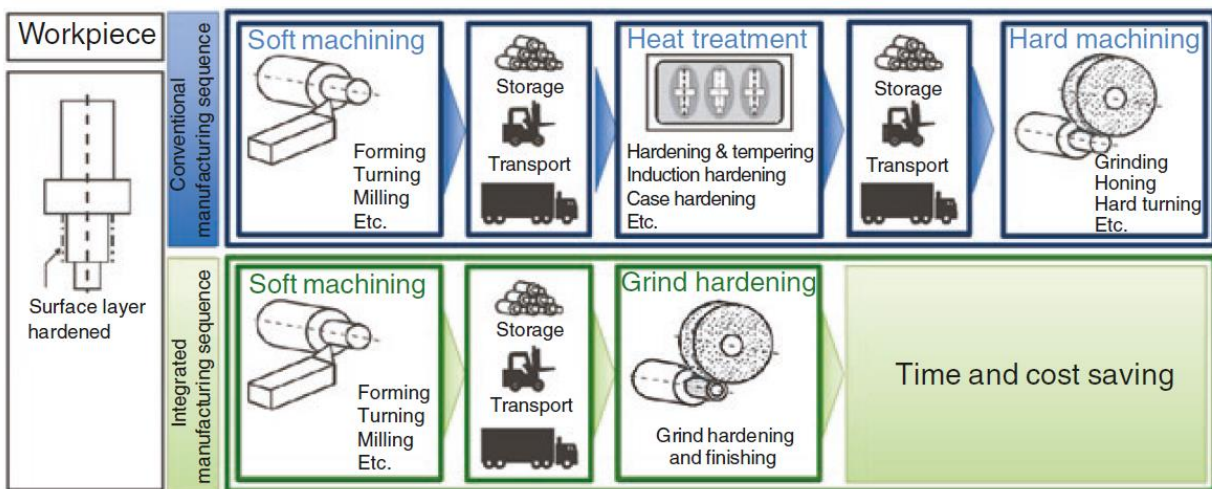
[Σχήμα 3.8]

Σκλήρυνση Μέσω Λείανσης

[Ενότητα 4]

Η παραγωγή χαλύβδινων εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας, συνήθως περιλαμβάνει και την κατεργασία σκλήρυνσης, προκειμένου να «αλλάξει» η επιφανειακή δομή. Οι συμβατικές μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας χαρακτηρίζονται από αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση, και χρήση ρυπογόνων διαλυμάτων – αλάτων. Ταυτόχρονα, η κατεργασία σκλήρυνσης σε πολλές περιπτώσεις, λαμβάνει χώρα εκτός εργοστασίου και της αλυσίδας παραγωγής, με αποτέλεσμα η ανάγκη μεταφοράς των τεμαχίων να δημιουργεί επιπλέον ενεργειακό, περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος. Τέλος η ανάγκη για καθαρισμό των τεμαχίων πριν και μετά τη κατεργασία καταναλώνει άφθονη ποσότητα νερού.

Η σκλήρυνση μέσω λείανσης (grind-hardening ή grinding hardening) είναι μια υβριδική κατεργασία^[1], η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη σκλήρυνση επιφανείας και λείανση του μεταλλικού τεμαχίου, εξαλείφοντας όλα τα προαναφερθέντα βήματα της παραγωγικής αλυσίδας, μαζί με τα μειονεκτήματα που αυτά παρουσιάζουν [σχήμα 4.1]. Η συγκεκριμένη κατεργασία πραγματοποιείται σε ένα μηχάνημα, με ίδιο «set up». Η κατεργασία του grind hardening βασίζεται στον έλεγχο της θερμοότητας που παράγεται από την κατεργασία, με αποτέλεσμα την τοπική θέρμανση του τεμαχίου, με σκοπό την αύξηση της επιφανειακής του σκληρότητας μέσω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.



Σύγκριση αλυσίδας παραγωγής συμβατικών κατεργασιών με αυτή που περιλαμβάνει το grind hardening. [Σχήμα 4.1]

^[1]Με τον όρο υβριδική ορίζουμε την κατεργασία η οποία βασίζεται στην ταυτόχρονη και ελεγχόμενη αλληλεπίδραση των μηχανισμών κατεργασίας και/ή των πηγών θερμότητας, με αξιοσημείωτη επίδραση στο αποτέλεσμα της κατεργασίας. Η κατηγοριοποίηση των υβριδικών κατεργασιών γίνεται με βάση το αν χρησιμοποιούμε περισσότερες από μια πηγές προκειμένου μέσω συνέργειας να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, ή αν χρησιμοποιούμε ταυτόχρονα περισσότερες από μία κατεργασίες (Lauwers et al.).

Στη συμβατική λείανση χάλυβα ο οποίος έχει υποστεί σκλήρυνση, η θερμότητα που παράγεται ενδέχεται να προκαλέσει ζημιά στην επιφάνεια, εξ αιτίας μεταβολών της δομής λόγω ανόπτησης, ή επανασκλήρυνσης (re hardening). Με την ανόπτηση, η σκληρότητα στα «επιφανειακά στρώματα» μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση της αντοχής σε φθορά. Όταν το τεμάχιο υποστεί επανασκλήρυνση, λόγω της μεγάλης σκληρότητας και ευθραυστότητας του μαρτενσίτη, σε σχέση με τα στρώματα κάτω από αυτόν, που έχουν υποστεί ανόπτηση, δημιουργούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις στην σκληρότητα (steep hardness gradient). Οι διαφοροποιήσεις αυτές, σε συνδυασμό με τις επιφανειακές τάσεις λόγω κατεργασίας, οδηγεί σε έναρξη και διάδοση ρηγματώσεων. Σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα, στην κατεργασία του grinding hardening, η διαχεόμενη θερμότητα στην επιφάνεια επαφής του λειαντικού τροχού με το τεμάχιο, αξιοποιείται για την ωστενιτοποίηση του επιφανειακού στρώματος. Ο κρίσιμος ρυθμός απόψυξης που απαιτείται για το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό επιτυγχάνεται με τη «αυθόρμητη απόψυξη» του τεμαχίου (self quenching), και με την συμβολή του ψυκτικού υγρού, όταν και αν χρησιμοποιείται. Λόγω της φύσης της κατεργασίας, οι διαδικασίες εξελίσσονται σε χρόνο δευτερολέπτων.

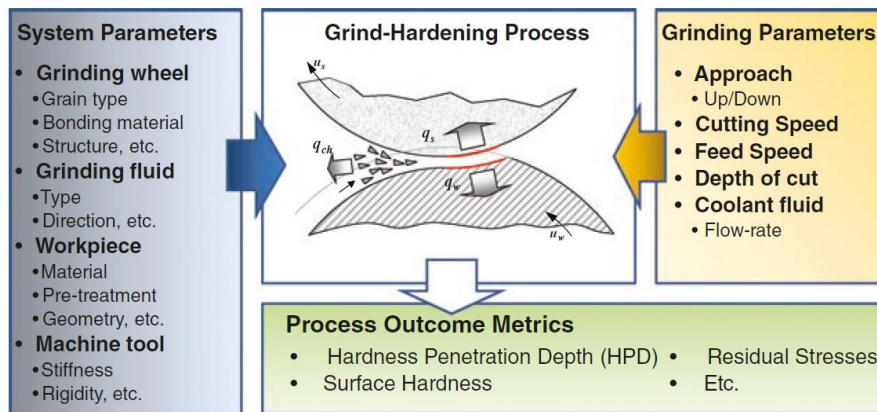
Η κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης είναι μια σχετικά νέα κατεργασία, η οποία προτάθηκε από τους Brinksmeier και Brockhoff στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί η παραγόμενη θερμότητα της κατεργασίας λείανσης είχε είδη υπαινιχθεί – προταθεί. Μετά την πρώτη παρουσίαση της κατεργασίας εκδηλώθηκε παγκοσμίως ενδιαφέρον, με σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων, ερευνών, και διδακτορικών διατριβών να την μελετούν.

Στη σκλήρυνση μέσω λείανσης, το τεμάχιο απορροφά μέρος της παραγόμενης θερμότητας, με τη θερμοκρασία επιφανειακά να φτάνει στα επίπεδα του ωστενιτικού μετασχηματισμού. Λόγω των υψηλών θερμικών ροών, και της ταχείας προαγωγής (rapid advancement) του λειαντικού τροχού, η περιοχή του τεμαχίου που έχει υποβληθεί σε λείανση ψύχεται με γρήγορους ρυθμούς, με τη θερμότητα να κατευθύνεται προς το ψυχρό εσωτερικό του τεμαχίου. Ο ρυθμός αυτός απόψυξης ευνοεί το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που έχει ως αποτέλεσμα την επιφανειακή σκλήρυνση.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία, όπως άλλωστε και την συμβατική λείανση, είναι η ταχύτητα πρόωσης, το βάθος κοπής, η ταχύτητα του λειαντικού τροχού, το υλικό του τεμαχίου και το είδος του λειαντικού τροχού. Οι παράμετροι αυτοί επιδρούν - συνδέονται με το αποτέλεσμα, που είναι η σκληρότητα επιφανείας που επιτυγχάνουμε, και το βάθος διείσδυσης σκληρότητας (Hardness Penetration Depth (HPD)). Με τον όρο HPD εννοούμε το βάθος στο οποίο η σκληρότητα είναι έως και 80% της σκληρότητας επιφανείας. Είναι εξαιρετικά σημαντική και κρίσιμη η σωστή επιλογή παραμέτρων, ώστε να παραχθεί ικανή θερμότητα, και ταυτόχρονα βέλτιστος ρυθμός ψύξης για μέγιστη σκληρότητα. Η επιφανειακή σκληρότητα που επιτυγχάνουμε εξαρτάται από την περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα και τους ρυθμούς απόψυξης, ενώ το HPD εξαρτάται κυρίως από το είδος του υλικού και το θερμοκρασιακό προφίλ που δημιουργείται.

Παράμετροι Κατεργασίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα σύνολο παραμέτρων ορίζουν την κατεργασία. Διαχωρίζονται σε παράμετροι του συστήματος (system parameters) και σε παράμετροι της κατεργασίας (process parameters). Το είδος του λειαντικού τροχού, το αν και ποιο ψυκτικό υγρό θα χρησιμοποιηθεί, το υλικό και η γεωμετρία του τεμαχίου, και η εργαλειομηχανή θεωρούνται παράμετροι συστήματος. Η ταχύτητα πρόωσης και η ταχύτητα λειαντικού τροχού, το βάθος κοπής, η παροχή και η πίεση του υγρού ψύξης, είναι παράμετροι της διαδικασίας [σχήμα 4.2].



Η κατεργασία ως σύστημα, με τις παραμέτρους που το ορίζουν και τα αποτελέσματα αυτών. [Σχήμα 4.2]

Παράμετροι Συστήματος

Υλικό τεμαχίου

Έρευνες και μελέτες της κατεργασίας, υποδεικνύουν εξάρτηση του αποτελέσματος από τη χημική σύσταση και τη μικροδομή του υλικού του τεμαχίου. Η αλληλεξάρτηση αυτή είναι παρόμοια με κάθε άλλη θερμική κατεργασία. Ως τα πλέον ιδανικά προς εφαρμογή της κατεργασίας υλικά είναι, οι θερμικά κατεργαζόμενοι χάλυβες και οι χάλυβες των ρουλεμάν [σχήμα 4.3]. Το αποτέλεσμα της σκλήρυνσης, όπως έχουμε προαναφέρει, εξαρτάται από την συγκέντρωση άνθρακα στο υλικό και από την παρουσία και άλλων κραματικών στοιχείων. Η μέγιστη επιφανειακή σκληρότητα που μπορεί να παρατηρηθεί είναι περίπου 60 HRC. Ερευνητές έχουν μελετήσει πληθώρα υλικών, εστιάζοντας όμως στα: AISI 52100, AISI 1045, AISI 1065, AISI 4140, και AISI 5140.

Ο χάλυβας AISI 52100 είναι από τα πρώτα υλικά που μελετήθηκαν. Είναι υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, και χρώμιο και αποτελεί «κλασικό» χάλυβα ρουλεμάν. Η μέγιστη σκληρότητα που επιτυγχάνεται είναι συνήθως περί τα 800 HV, με βάθος σκλήρυνσης περί τα 0.6mm. Σε ορισμένες έρευνες έχουμε βάθους σκλήρυνσης μέχρι και 1mm, χρησιμοποιώντας χαμηλές ταχύτητες πρόωσης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων έχουμε παραμένουσες τάσεις, οι οποίες μπορούν να «ελεγχθούν» με σωστή επιλογή παραμέτρων κατεργασίας.

Ο χάλυβας AISI 1045 είναι μέσης αντοχής (medium tensile) και χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως κατασκευή γριναζιών, αξόνων και κυλίνδρων, με συχνή ανάγκη τοπικής σκλήρυνσης. Έχει περιορισμένες δυνατότητες για σκλήρυνση, αλλά τοπικά μπορούμε να επιτύχουμε 400 – 500 HV. Συνήθως χρησιμοποιούμε σκλήρυνση με χρήση φλόγας. Υπό

συνθήκες μπορούμε να επιτύχουμε και πολύ υψηλή σκληρότητα. Σε μελέτη (Nguyen et al.) παρουσιάζεται σκληρότητα έως και 700 HV με λείανση χωρίς υγρό, και έως και 1000 HV με χρήση υγρού αζώτου ως ψυκτικό υγρό. Το βάθος σκλήρυνσης είναι περί τα 0.5mm και οι παραμένουσες επιφανειακές τάσεις μπορούν να ελεγχθούν.

Ο χάλυβας AISI 1065 είναι υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Με τέτοιου είδους υλικά μπορούμε να επιτύχουμε επιφανειακή σκληρότητα από 810 έως 870 HV με βάθος σκλήρυνσης έως και 2mm.

Ο χάλυβας AISI 4140 ήταν και αυτός από τα πρώτα υλικά που μελετήθηκαν. Η σκληρότητα που επιτεύχθηκε είναι γύρω στα 800 HV και βάθος σκλήρυνσης γύρω στα 1mm. Σε μια δημοσίευση (Fricke et al.) παρουσιάστηκε βάθος σκλήρυνσης κοντά στα 2mm.

Ο χάλυβας AISI 5140 έχει μελετηθεί κατά κόρον, με σκληρότητα γύρω στα 750 HV, βάθος σκλήρυνσης περί τα 1.6mm, ενώ μπορούμε να έχουμε παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του τεμαχίου.

Ο χάλυβας AISI D2 είναι υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και χρώμιο και χρησιμοποιείται ως υλικό για κατασκευή εργαλείων. Έχει τη δυνατότητα να υποστεί θερμική κατεργασία, και επιτυγχάνουμε σκληρότητες από 55 έως 62 HRC. Τυπικές χρήσεις είναι η κατασκευή καλουπιών, εμβόλων, και κυλίνδρων. Έχουν δημοσιευτεί λίγες μελέτες σχετικά με το συγκεκριμένο υλικό. Σε μία από αυτές έγινε παρουσίαση της κατεργασίας με χρήση AISI 1060, AISI 1066 και AISI 4340, αλλά λόγω έλλειψης περισσότερων αποτελεσμάτων δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Προϋπόθεση για την κατεργασία είναι η επαρκής περιεκτικότητα σε άνθρακα, και άλλα κραματικά στοιχεία. Συνηθίζεται η ελάχιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα να είναι 0.3%, με έρευνες όμως να έχουν δείξει ότι μπορούμε να επιτύχουμε σκλήρυνση μέσω λείανσης και για χαμηλότερες περιεκτικότητες (π.χ. AISI 1020). Επίσης η αρχική μικροδομή του υλικού είναι καίριας σημασίας με τα υλικά που έχουν υποστεί ανόπτηση ή άλλη θερμική επεξεργασία να είναι τα πλέον ιδανικά. Η καλύτερη διασπορά του άνθρακα στο υλικό, ευνοεί φαινομένων διάχυσης, και δημιουργεί ευνοϊκότερες συνθήκες ωστενιτοποίησης. Μεγαλύτερα βάθη σκλήρυνσης έχουμε σε υλικά που έχουν υποστεί βαφή, σε σχέση με όσα έχουν υποστεί ανόπτηση. Τέλος σε βαμμένους χάλυβες έχουμε πιο «ομαλή – σταδιακή» μετάβαση από τη μέγιστη σκληρότητα στην αρχική, κατά βάθος του τεμαχίου, γεγονός που οφείλεται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης.

Alloy steel designation	Nominal composition (wt%)						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 1020	0.17–0.23	0.30–0.60	–	–	–	–	Balance
AISI 1045	0.42–0.50	0.50–0.80	0.17–0.37	≤0.25	≤0.3	–	Balance
AISI 1060	0.55–0.66	0.60–0.90	–	–	–	–	Balance
AISI 1065	0.60–0.70	0.60–0.90	–	–	–	–	Balance
AISI 1066	0.60–0.71	0.80–1.10	–	–	–	–	Balance
AISI 4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.10–0.35	0.80–1.10	≤0.25	0.15–0.25	Balance
AISI 4340	0.37–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	0.70–0.90	1.65–2.00	0.20–0.30	Balance
AISI 5140	0.37–0.44	0.50–0.80	0.17–0.37	0.80–1.10	≤0.030	–	Balance
AISI 52100	0.95–1.05	0.25–0.45	0.15–0.35	1.30–1.65	–	–	Balance
AISI D2	1.5	0.45	0.25	12	–	1	Balance

Πίνακας υλικών κατάλληλων για σκλήρυνση μέσω λείανσης [Σχήμα 4.3]

Γεωμετρία τεμαχίου

Η κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεμάχια τόσο επίπεδα όσο και κυλινδρικής ή πρισματικής γεωμετρίας. Το κρίσιμο σημείο σε κατεργασία τεμαχίων πολύπλοκης γεωμετρίας, είναι η θέρμανση σημείων που ήδη έχουν υποστεί θερμική κατεργασία, καθώς ο λειαντικός τροχός πρέπει να περάσει περισσότερες από μια φορές από γειτνιάζουσες περιοχές. Σε ιδανική περίπτωση ο λειαντικός τροχός πρέπει να είναι αρκετά πλατύς ώστε να κατεργάζεται ταυτόχρονα τη συνολική περιοχή.

Στις περιπτώσεις που έχουμε να κατεργαστούμε κυλινδρικά τεμάχια, τα πολλαπλά περάσματα είναι αναπόφευκτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαδοχική θέρμανση του υλικού, καθώς όταν ο λειαντικός τροχός επιστρέψει στο σημείο εκκίνησης, το υλικό έχει ψυχθεί σε θερμοκρασίες μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Έχουν δημοσιευτεί αρκετές τεχνικές για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, όπως προσαρμοστικός έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του λειαντικού τροχού (“adaptive control of the grinding wheel rotation speed”), ή αλλαγή στα βάθη κοπής. Προσφάτως ερευνάται η δυνατότητα αποφυγής – περιορισμού του overlapping μέσω εφαπτομενικής μετακίνησης του λειαντικού τροχού ως προς το τεμάχιο.

Λειαντικός τροχός

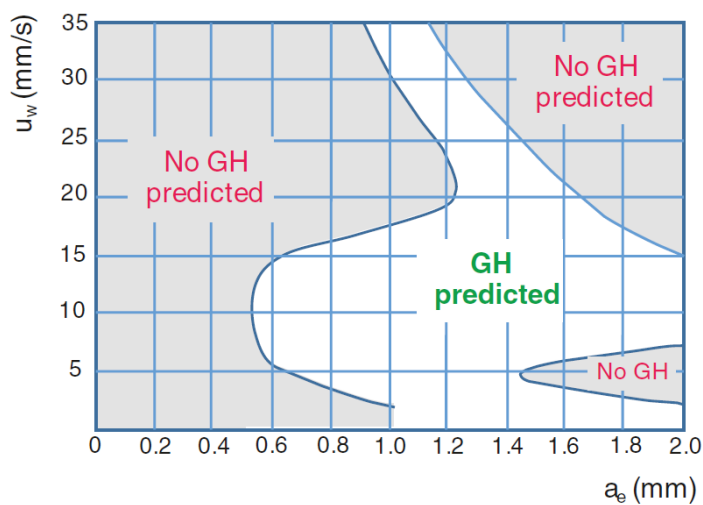
Το είδος λειαντικού τροχού επιδρά στην κατανομή της θερμότητας που παράγεται από τη κατεργασία, και κατά συνέπεια στην σκλήρυνση που επιτυγχάνεται. Η πλειοψηφία των μελετών έγιναν για λειαντικούς τροχούς κορουνδίου και πολύ περιορισμένος αριθμός για τροχούς CBN (38 δημοσιεύσεις για τροχούς κορουνδίου και 4 για τροχούς CBN). Η επιλογή αυτή γίνεται λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του κορουνδίου, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη θερμική ροή προς το τεμάχιο.

Οι περισσότεροι ερευνητές χρησιμοποιούν λεπτόκοκκους (fine grained) λειαντικούς τροχούς, με δεσμούς ρητίνης (resin bonded), υψηλής σκληρότητας, και πυκνής δομής (closed structure). Η χρησιμοποίηση μαλακότερων τροχών (όπως έχουμε προαναφέρει), οδηγεί σε μειωμένες δυνάμεις κατεργασίας, αλλά και σε μεγαλύτερα βάθη σκλήρυνσης, γεγονός που οφείλεται στην δυνατότητα αυξημένης παραμόρφωσης και άρα αυξημένου αριθμού λειαντικών κόκκων που αλληλεπιδρούν με το τεμάχιο. Με χρήση «πυκνότερων» (denser) λειαντικών τροχών, έχουμε αυξημένες δυνάμεις κατεργασίας. Το μέγεθος των κόκκων φαίνεται να έχει τη μικρότερη επίδραση στη κατεργασία. Ισχύει βέβαια ότι λεπτόκοκκοι λειαντικοί τροχοί, λόγω αυξημένου αριθμού κόκκων που συμμετέχουν στη κατεργασία, παρουσιάζουν αυξημένες δυνάμεις κατεργασίας και παραγωγή περισσότερων αποβλήτων. Παρ όλα αυτά το βάθος σκλήρυνσης τείνει να μειώνεται καθώς με την παραγωγή και απομάκρυνση μεγαλύτερης ποσότητας αποβλήτων, απομακρύνεται ταυτόχρονα και ποσότητα θερμότητας από τη περιοχή κατεργασίας. Η χρήση λειαντικών τροχών με δεσμούς υδρύαλου, οδηγούν σε αυξημένα φορτία, αυξημένη φθορά και αστάθεια της κατεργασίας.

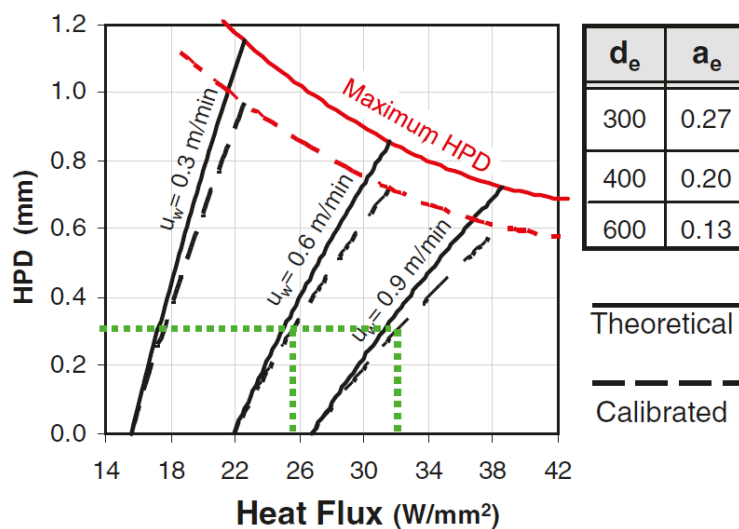
Σε τροχούς CBN, λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, η θερμότητα μεταφέρεται – απομακρύνεται μέσω των λειαντικών κόκκων, από το τεμάχιο και τη ζώνη λείανσης προς τη μεταλλική πλήμη (hub) του λειαντικού τροχού. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί πειραματικά, ότι τροχοί CBN μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην σκλήρυνση μέσω λείανσης, με περιορισμούς όμως στην ανώτερη ταχύτητα του τεμαχίου.

Παράμετροι διαδικασίας

Για να είναι η κατεργασία του grinding hardening αποτελεσματική, υπάρχει ένα μικρό «παράθυρο» συνδυασμών των παραμέτρων. Ένας ικανός αριθμός μελετών έχουν δημοσιευτεί με στόχο να προσδιοριστεί το «παράθυρο» αυτό. Παράδειγμα αποτελεί η παρουσίαση χαρτών κατεργασίας για τροχούς CBN και υλικό τεμαχίου AISI 4140 από το Flicker et al. [σχήμα 4.4], και η μελέτη του Σαλωνίτη για λειαντικούς τροχούς κορουνδίου και υλικό τεμαχίου AISI 52100. Οι διαθέσιμοι αυτοί χάρτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων κατεργασίας, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις αλλά και τους περιορισμούς που υπάρχουν. Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση, από τους Σαλωνίτη και Χρυσολούρη, προσδιορίζει το μέγιστο εκτιμώμενο βάθος σκλήρυνσης, βάσει της υπόθεσης ότι αυτό εμφανίζεται όταν η θερμοκρασία επιφανείας φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου [σχήμα 4.5].



Χάρτης κατεργασίας για CBN λειαντικό τροχό και υλικό AISI 4140
[Σχήμα 4.4]



Χάρτης κατεργασίας για λειαντικό τροχό κορουνδίου και υλικό AISI 5120
[Σχήμα 4.5]

Βάθος κοπής

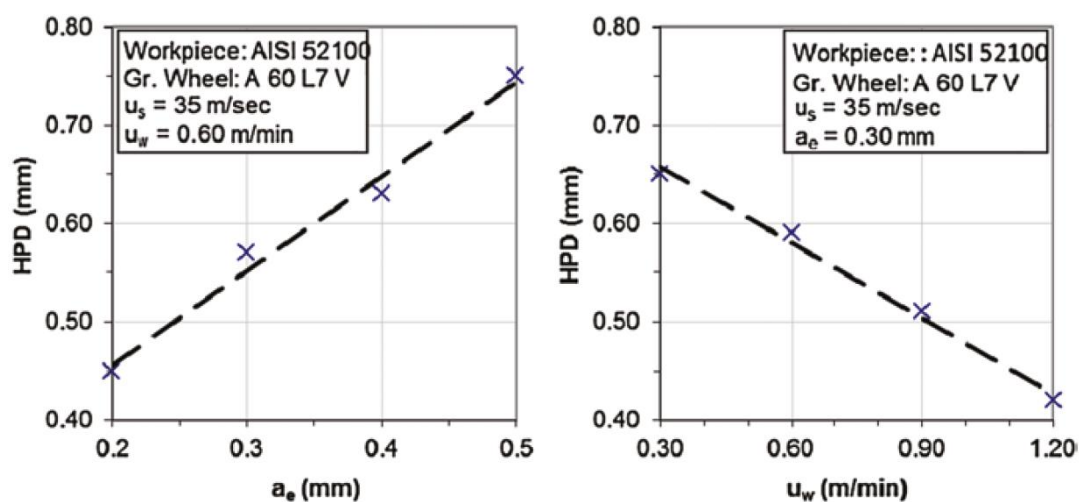
Σε κατεργασίες λείανσης με σταθερή ταχύτητα πρόωσης το βάθος κοπής είναι ανάλογο του ρυθμού απομάκρυνσης υλικού και του πάχους αποβλήτων. Για συγκεκριμένο ρυθμό απομάκρυνσης υλικού η αύξηση του βάθους κοπής οδηγεί σε αύξηση του βάθους λείανσης [σχήμα 4.6]. Για μέγιστο HPD πρέπει να εφαρμόσουμε μεγάλα βάθη κοπής, τα οποία όμως περιορίζονται από την ικανότητα (ισχύ και αντοχή) της εργαλειομηχανής, και από τις απαιτήσεις για ακρίβεια κατεργασίας. Επιπλέον υπερβολική ροή θερμότητας προς το τεμάχιο μπορεί να έχει αρνητικά αποτελέσματα στους μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα, με δημιουργία ρηγματώσεων για παράδειγμα. Η επιλογή βάθους κοπής πρέπει να γίνεται με βάση τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος, την επίτευξη δηλαδή ενός επιθυμητού βάθους σκλήρυνσης, συγκεκριμένη ποιότητα επιφανείας (τραχύτητα), χωρίς να θέτουμε σε κίνδυνο λόγω θερμικής φόρτισης το τεμάχιο, και προσέχοντας να μην καταστρέψουμε από υπερβολική φθορά τον λειαντικό τροχό.

Ταχύτητα πρόωσης

Η ταχύτητα πρόωσης συνδέεται άμεσα με την ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από το τεμάχιο. Για χαμηλές ταχύτητες έχουμε παραγωγή μικρής θερμικής ισχύος, και πιθανόν λιγότερη από όση απαιτείται για να φτάσει το τεμάχιο στην θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Σε υψηλές ταχύτητες, η παραγωγή ισχύος είναι αυξημένη, με αποτέλεσμα την αύξηση και του HPD. Υπερβολική αύξηση της ταχύτητας, μειώνει το χρόνο επαφής, με αποτέλεσμα μείωση και του HPD. Μέσες ταχύτητες αποτελούν βέλτιστη επιλογή [σχήμα 4.6].

Ταχύτητα κοπής

Το πώς επηρεάζεται η κατεργασία με μεταβολή της ταχύτητας του λειαντικού τροχού είναι αρκετά πολύπλοκο, καθώς αύξηση της ταχύτητας μπορεί να προκαλέσει και αύξηση αλλά και μείωση της ισχύος ανάλογα με τη περίπτωση. Σε μελέτες (Σαλωνίτης, 2006) έχει παρουσιαστεί η επιρροή της ταχύτητας κοπής στην τελική ποιότητα επιφανείας του τεμαχίου.



Ενδεικτικά διαγράμματα για το πώς επηρεάζεται το βάθος κοπής από μεταβολή του βάθους κοπής και της ταχύτητας πρόωσης. [Σχήμα 4.6]

Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρατίθενται εν συντομία μελέτες και δημοσιεύσεις σχετικά με την κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης.

Ερευνητής	Χρονολογία	Υλικό	Γεωμετρία	Συνθήκες Κατεργασίας					Μελέτη		
				Ταχύτητα Λειαντικού Τροχού [m/sec]	Ταχύτητα Πρόωσης [m/sec]	Feed Rate [mm/sec]	Βάθος Κοπής [mm]	Χρήση Υγρού κοπής	Πειραματική	Αναλυτική	FEM
Κ. Τσίμπας	2002	AISI 52100	Κυλινδρική	30 - 45	0,0025 - 0,0291	-	0,25 - 0,65	-	•	•	-
Chryssolouris	2005	AISI 52100	Κυλινδρική	45	0,0025 - 0,167	-	0,45 - 1,55	-	•	•	•
Thai Nguyen et al.	2006	1045 Steel	Ορθογωνική	23	0,0066	-	0,02	Liquid N	•	-	-
Σαλωνίτης	2006	AISI 52100	Ορθογωνική	-	0,005 - 0,02	-	0,1 - 1	-	•	•	•
HAN Zheng-tong et al.	2007	40Cr Steel	Ορθογωνική	<40	0,005 - 0,025	-	0,05 - 0,25	-	•	-	-
Jianhua Zhang et al.	2008	AISI 1020	Ορθογωνική	19,6	0,01 - 0,05	-	0,1 - 0,3	-	•	-	•
Thai Nguyen et al.	2010	1045 Steel	Ορθογωνική	25	0,0166	-	0,05 - 0,1	Liquid N	•	•	-
Liu Judong et al.	2012	1060 Steel	Ορθογωνική	26,3	0,008	-	0,2 - 0,5	-	•	-	-
B. Kolkwitz et al.	2012	AISI 52100	Κυλινδρική	35	0,00355 - 0,00708	0,01 - 0,05	0,5 - 1,0	•	•	-	•
T. Foeckerer et al.	2012	AISI 52100	Ορθογωνική	-	0,01	-	0,5	-	•	•	-
Jianping Li et al.	2013	C45E4	Κυλινδρική	29 - 31	0,0003	0,03	0,1 - 0,5	-	•	-	•
Mei Liu et al.	2014	BS970 EN26	Κυλινδρική	65,34	-	0,01	0,105 - 0,525	-	•	-	-
Ju Dong LIU v	2014	65Mn Steel	Ορθογωνική	25	0,005 - 0,013	-	0,3	-	•	-	-
U. Alonso et al.	2014	AISI 52100 42CrMo4 AISI 1045	Ορθογωνική	23 - 30	0,02 - 0,34 0,02 - 0,34 0,02 - 0,09	-	0,002 - 0,310 0,02 - 0,310 0,020 - 0,245	-	•	-	-

Δημοσιεύσεις – μελέτες σχετικά με την κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης. [Πίνακας 4.1]

Υπολογισμοί μέσω αναλυτικών σχέσεων

[Ενότητα 5]

Τοπογραφία λειαντικού τροχού

Μεθοδολογία - Σχέσεις

Αρχικά θα πρέπει με κάποια μέθοδο να προσδιορίσουμε βασικά χαρακτηριστικά του λειαντικού τροχού, τα οποία επιδρούν άμεσα στην κατεργασία, και κυρίως στα μεγέθη τα οποία μελετάμε στην παρούσα εργασία.

Αρχικά είναι σκόπιμο να δοθούν βασικοί ορισμοί, προς ευκολότερη κατανόηση της μεθοδολογίας.

Στατικοί κόκκοι: χαρακτηρίζονται όλοι οι κόκκοι που βρίσκονται στη διεπιφάνεια λειαντικού τροχού – τεμαχίου και σε βάθος ίσο με το βάθος του προφίλ του λειαντικού τροχού, είτε συμμετέχουν στην αφαίρεση υλικού είτε όχι.

Ενεργοί κόκκοι: οι κόκκοι που έρχονται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και συνεισφέρουν στην δημιουργία και το σχηματισμό των αποβλήτων, καθώς και στην ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής.

Οι πρώτες έρευνες για την ανάλυση και προσδιορισμό της τοπογραφίας των λειαντικών τροχών ξεκίνησαν το 1957 από τον Peklenik (Peklenik J., 1957). Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάστηκαν μελέτες οι οποίες εκτός από την ανάλυση σε στατικούς και ενεργούς κόκκους μελετούσαν και τη γεωμετρία αυτών. Χρησιμοποιήθηκαν από απλοποιημένα εμπειρικά μοντέλα, μέχρι στοχαστικά και χρήση fractal. Στην συγκεκριμένη εργασία εμείς θα υπολογίσουμε τα απαραίτητα μεγέθη μέσω ημιεμπειρικών σχέσεων που λαμβάνουν υπ όψιν τα χαρακτηριστικά του τροχού.

Για ένα πεπερασμένο όγκο λειαντικού τροχού που περιλαμβάνει το σύνολο των κόκκων που βρίσκονται στη διεπιφάνεια μεταξύ τροχού και τεμαχίου [σχήμα 5.1], θεωρούμε σφαιρικούς κόκκους με διάμετρο ίση με το ύψος του κόκκου.

Η ογκομετρική συγκέντρωση των πόρων δίνεται από την εμπειρική σχέση συναρτήσεως της τυποποίησης του λειαντικού τροχού (Malkin, 1989).

$$V_p = \frac{1}{100} * \left[45 + \frac{S - 2 * n}{1.5} \right]$$

V_p = ογκομετρική συγκέντρωση πόρων λειαντικού τροχού

$n = 1,2,3,4 \dots$ αντιστοιχεί στη τυποποιημένη κλίμακα σκληρότητας του λειαντικού τροχού (E, F, G, H ...)

S = αριθμός της δομής λειαντικού τροχού

Η ογκομετρική συγκέντρωση των κόκκων υπολογίζεται και αυτή από εμπειρική σχέση συναρτήσεως της τυποποίησης του λειαντικού τροχού (Malkin, 1989).

$$V_g = \frac{2}{100} * (32 - S)$$

$V_g =$ ογκομετρική συγκέντρωση κόκκων λειαντικού τροχού

Η ογκομετρική συγκέντρωση του συνδετικού υλικού προκύπτει από την εξίσωση των στοιχείων που αποτελούν το λειαντικό τροχό.

$$V_b = 1 - V_g - V_p$$

$V_b =$ ογκομετρική συγκέντρωση συνδετικού υλικού λειαντικού τροχού

Η αναλογία στατικών – ενεργών κόκκων εξαρτάται από παράγοντες όπως η ελαστικότητα του τροχού, οι παραμορφώσεις αυτού και του τεμαχίου, η διάρκεια κατεργασίας, κ.τ.λ. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε μια σχέση η οποία συνδέει την ογκομετρική συγκέντρωση του συνδετικού υλικού και την αναλογία ενεργών – στατικών κόκκων. Η σχέση αυτή προέκυψε συνδυάζοντας τα πειράματα των Malkin και Cook το 1971 και την έρευνα των Hou και Komanduri 2003. Υπολογίζεται ένας «συντελεστής κανονικοποίησης» ο οποίος ανάγει έναν λόγο αναφοράς Φ_{ref} στα δεδομένα του εκάστοτε λειαντικού τροχού [σχήμα 5.2].

$$N.F. = 20.535 * V_b - 0.217$$

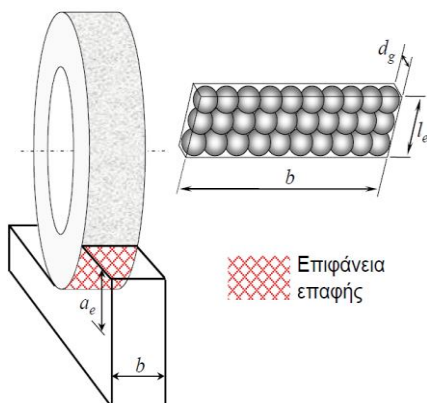
$$\Phi_a = \Phi_{ref} * (N.F.)$$

$$\Phi_a = \frac{n_a}{n_s}$$

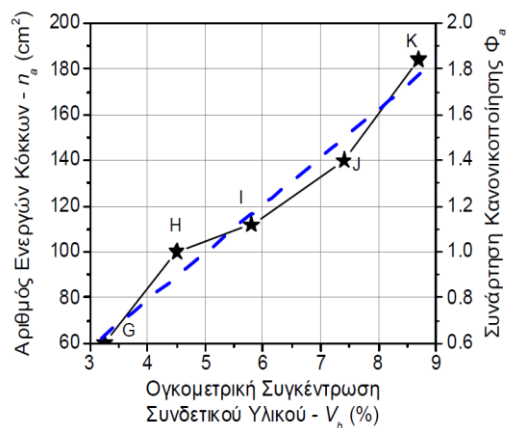
$n_a =$ ενεργοί κόκκοι λειαντικού τροχού

$n_s =$ στατικοί κόκκοι λειαντικού τροχού

$\Phi_{ref} =$ λόγος αναφοράς (3.8%)



Μοντελοποίηση επιφάνειας λειαντικού τροχού [Σχήμα 5.1]



Αριθμός ενεργών κόκκων ανά μονάδα επιφάνειας και συναρτήσεως της ογκομετρικής συγκέντρωσης συνδετικού υλικού τροχού [Σχήμα 5.2]

Υπολογίζουμε την ισοδύναμη διάμετρο λειαντικού τροχού από τη σχέση:

$$d_e = d_s * \frac{1}{1 + \frac{d_s}{d_w}}$$

d_e = ισοδύναμη διάμετρος λειαντικού τροχού [mm]

d_s = διάμετρος λειαντικού τροχού [mm]

d_w = διάμετρος προς κατεργασία τεμαχίου [mm]

για επίπεδο τεμάχιο $d_w = \infty \rightarrow d_w = d_s$

Το μήκος του τόξου επαφής μεταξύ λειαντικού τροχού και τεμαχίου ταυτίζεται με το γεωμετρικό μήκος επαφής και υπολογίζεται από την γεωμετρία της «εμπλοκής» του λειαντικού τροχού και του τεμαχίου από τη σχέση:

$$l_c = \sqrt{d_e * a_e}$$

l_c = μήκος τόξου επαφής λειαντικού τροχού – τεμαχίου [mm]

a_e = βάθος κοπής [mm]

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέση διάμετρο κόκκων μέσω συσχετισμού με το συντελεστή τυποποίησης του μεγέθους των κόκκων (Malkin,1989):

$$d_g = 15.2 * M^{-1}$$

d_g = μέση διάσταση κόκκου [mm]

M = τυποποιημένη διάσταση κόκκων λειαντικού τροχού

Έχοντας υπολογίσει πλέον όλα τα απαραίτητα μεγέθη μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των στατικών κόκκων:

$$V_g = \frac{n_s * V_{grain}}{V_{tot.}} \rightarrow n_s = \frac{V_g * V_{tot.}}{V_{grain}} = 12 * \frac{32 - S}{100} * \frac{l_c * b}{\pi * d_g^2}$$

b = πάχος λειαντικού τροχού [mm]

Και εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον και τον αριθμό των ενεργών κόκκων:

$$n_a = \Phi_\alpha * n_s$$

Στοιχεία του λειαντικού τροχού που χρησιμοποιήθηκε

Χρησιμοποιήθηκε λειαντικός τροχός της εταιρείας NORTON διαστάσεων 300X50X76, και τυποποίησης 38A36-K8VG. Από τα χαρακτηριστικά αυτά έχουμε:

- Διάμετρος: $d_s = d_e = 300$ [mm]
- Πλάτος λειαντικού τροχού: $b = 50$ [mm]

Ανατρέχοντας στους καταλόγους της εταιρείας (A Handbook on Tool Room Grinding, 1947) βρίσκουμε ότι με βάση την τυποποίηση που χρησιμοποιεί είναι:

- Κόκκοι από ALUNDUM
- Μέγεθος κόκκων: $M = 36$
- Σκληρότητα (GRADE): $K \rightarrow$ μέση σκληρότητα \rightarrow για τους υπολογισμούς $n = 11$
- Δομή του λειαντικού τροχού: $8 \rightarrow$ για τους υπολογισμούς $S = 8$
Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στην σχετική απόσταση των κόκκων μεταξύ τους.
- Δεσμός: *Vitrified*

Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις προαναφερθείσες σχέσεις και να συνεχίσουμε τους υπολογισμούς μας.



Τυποποίηση της εταιρείας NORTON [Σχήμα 5.3]

Δυνάμεις Κατεργασίας

Προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική ροή στο τεμάχιο, πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς της κατεργασίας. Αυτό θα γίνει μέσω υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Αρχικά διακρίνουμε τη δύναμη που αναπτύσσεται σε εφαπτομενική $\{F_t\}$ και ορθή συνιστώσα $\{F_n\}$ [σχήμα 5.4]. Επειδή η διάμετρος του λειαντικού τροχού είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το βάθος κοπής μπορούμε να θεωρήσουμε την εφαπτομενική συνιστώσα ίση με τη οριζόντια. Η ολική εφαπτομενική δύναμη της κατεργασίας μπορεί να υπολογιστεί ως άθροισμα των δυνάμεων ολίσθησης, σχηματισμού των αποβλήτων και πλαστικής παραμόρφωσης τεμαχίου. Οι δύο τελευταίες δυνάμεις ονομάζονται και δυνάμεις κοπής.

$$F_t = F_{t,sl} + F_{t,c}$$

$$F_t = \text{ολική εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης της κατεργασίας [N]}$$

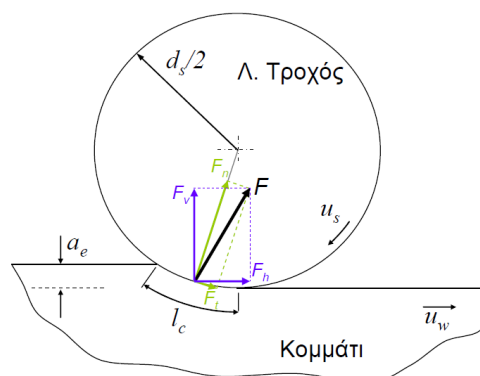
$$F_{t,sl} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης ολίσθησης [N]}$$

$$(F_{t,c} = F_{t,ch} + F_{t,pl})$$

$$F_{t,c} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης κοπής [N]}$$

$$F_{t,ch} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης σχηματισμού αποβλήτων [N]}$$

$$F_{t,pl} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης πλαστικής παραμόρφωσης [N]}$$



Δυνάμεις διεργασίας [Σχήμα 5.4]

Δύναμη ολίσθησης

Ο υπολογισμός της δύναμης ολίσθησης θα γίνει μέσω του υπολογισμού της μέσης πίεσης επαφής κόκκων με την επιφάνεια του τεμαχίου, της επιφάνειας επαφής και του μέσου συντελεστή τριβής.

$$F_{t,sl} = \mu * p_m * A_a$$

$$p_m = \text{μέση πίεση επαφής κόκκων στην επιφάνεια του τεμαχίου} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$A_a = \text{πραγματική επιφάνεια επαφής [mm}^2\text{]}$$

$$\mu = \text{συντελεστής τριβής μεταξύ κόκκων και τεμαχίου}$$

Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα που συνέλεξε ο Malkin το 1989 κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής τριβής είναι ανεξάρτητος της τοπογραφίας του λειαντικού τροχού και του υλικού του τεμαχίου, και εξαρτάται αποκλειστικά από το εάν η κατεργασία προκαλεί θερμική βλάβη στο τεμαχίο ή όχι. Στην κατεργασία που μελετάμε δεν προκαλείται θερμική βλάβη τεμαχίου και προτείνεται συντελεστής τριβής $\mu = 0.38$.

Η μέση πίεση επαφής είναι η γραμμική συνάρτηση της διαφοράς καμπυλότητας Δ [σχήμα 5.5]. Η διαφορά καμπυλότητας ορίζεται ως η διαφορά της ακτίνας του λειαντικού τροχού από την ακτίνα της τροχιάς κοπής. Στην περίπτωση που μελετάμε και με την ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού τροχού πολύ μεγαλύτερη της ταχύτητας πρόωσης του τεμαχίου ($u_w \ll u_s$) η διαφορά στην ακτίνα καμπυλότητας υπολογίζεται ως:

$$\Delta = \frac{4 * u_w}{d_e * u_s}$$

$$\Delta = \text{διαφορά καμπυλότητας [mm}^{-1}\text{]}$$

$$u_w = \text{ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου } \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

$$u_s = \text{ταχύτητα περιστροφής λειαντικού τροχού } \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

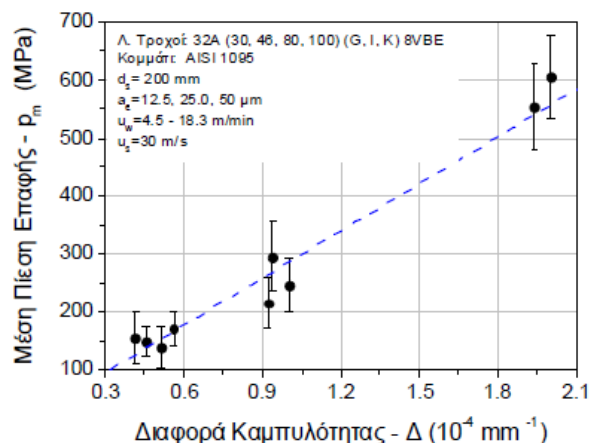
Οι συντελεστές της γραμμικής συσχέτισης δίνονται από μία σειρά πειραμάτων των Kannarap και Malkin (Σαλωνίτης, 2006) και προτείνονται οι τιμές:

$$k_1 = \text{εμπειρική παράμετρος} = 2.58 * 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$$

$$k_2 = \text{εμπειρική παράμετρος} = 35 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Άρα

$$p_m = k_1 * \Delta + k_2$$



Μέση πίεση επαφής συναρτήσει της διαφοράς καμπυλότητας
(Kannarap και Malkin 1972) [Σχήμα 5.5]

Η πραγματική επιφάνεια επαφής λειαντικού τροχού και τεμαχίου εξαρτάται από τον αριθμό των ενεργών κόκκων και την επιφάνεια ολίσθησης του κάθε κόκκου. Η μέση επιφάνεια ολίσθησης ανά κόκκο θεωρείται ίση με την επιφάνεια κύκλου διαμέτρου ίσης με τα δύο τρίτα της μέσης διαμέτρου κόκκου [σχήμα 5.6].

$$A_g = \frac{1}{4} * \pi * l_{wf}^2$$

$$A_g = \text{μέση επιφάνεια ολίσθησης ανά κόκκο [mm}^2\text{]}$$

$$l_{wf} = \frac{2}{3} * d_g = \text{ισοδύναμη διάμετρος της επιφάνειας ολίσθησης [mm]}$$

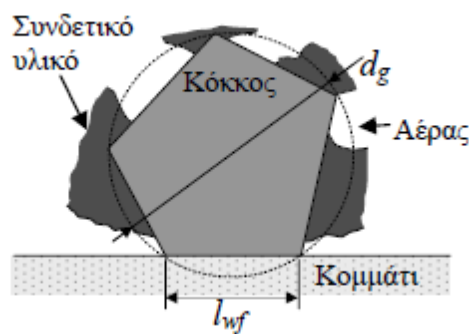
και άρα

$$A_a = n_a * A_g$$

$$A_a = \text{πραγματική επιφάνεια επαφής [mm}^2\text{]}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης λόγω ολίσθησης:

$$F_{t,sl} = \mu * p_m * A_a = \frac{3}{100 * 15.2^2} * \mu * \Phi_\alpha * b * l_{wf}^2 * M^2 * (32 - S) * \sqrt{d_e * a_e} * \left[k_1 * \frac{4 * u_w}{d_e * u_s} + k_2 \right]$$



Αλληλεπίδραση κόκκου λειαντικού τροχού - τεμαχίου
[Σχήμα 5.6]

Δύναμη κοπής

Οι δυνάμεις κοπής μπορούν να προσδιοριστούν από την ειδική ενέργεια κοπής την οποία ορίζουμε ως την ενέργεια που καταναλώνεται για την αφαίρεση μιας μονάδας όγκου υλικού. Η ειδική ενέργεια κοπής είναι το άθροισμα της ενέργειας σχηματισμού των αποβλήτων και της ενέργειας παραμόρφωσης του τεμαχίου δίχως να έχουμε αφαίρεση υλικού. Σε πειράματα ο

Malkin 1989 απέδειξε ότι η ενέργεια κοπής προσεγγίζει ασυμπτωτικά την ενέργεια σχηματισμού των αποβλήτων καθώς ο ρυθμός αφαίρεσης του υλικού αυξάνεται [σχήμα 5.7]. Έχει αποδειχθεί επίσης πειραματικά ότι η ενέργεια σχηματισμού αποβλήτων δεν εξαρτάται από τις παραμέτρους της διεργασίας, την τυποποίηση του λειαντικού τροχού και το υλικό του τεμαχίου. Στη πλειοψηφία των βιβλιογραφικών αναφορών, προτείνεται ειδική ενέργεια κοπής $u_{ch} = 13.8 \text{ [J/mm}^3\text{]}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προτείνεται η σχέση (Malkin 1989)

$$u_c = u_{ch} + u_{pl} = u_{ch} + \frac{28.1}{u_w * a_e}$$

$$u_c = \text{ειδική ενέργεια κοπής} \left[\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$u_{ch} = 13.8 = \text{ειδική ενέργεια σχηματισμού αποβλήτων} \left[\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right]$$

$$u_w * a_e = \text{ρυθμός αποβολής υλικού} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{sec}} \right]$$

Προτείνεται η σχέση που συνδέει την ειδική ενέργεια κοπής με το άθροισμα της εφαπτομενικής δύναμης για το σχηματισμό αποβλήτων και παραμόρφωσης τεμαχίου (Malkin and Joseph 1975):

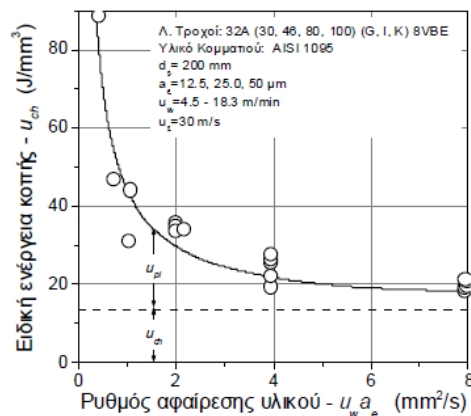
$$u_c = \frac{F_{t,c} * u_s}{b * a_e * u_w} \rightarrow F_{t,c} = u_c * \frac{u_w}{u_s} * b * a_e = \left[u_{ch} + \frac{28.1}{u_w * a_e} \right] * \frac{u_w}{u_s} * b * a_e$$

$$F_{t,c} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης κοπής [N]}$$

$$(F_{t,c} = F_{t,ch} + F_{t,pl})$$

$$F_{t,ch} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης σχηματισμού αποβλήτων [N]}$$

$$F_{t,pl} = \text{εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης πλαστικής παραμόρφωσης [N]}$$

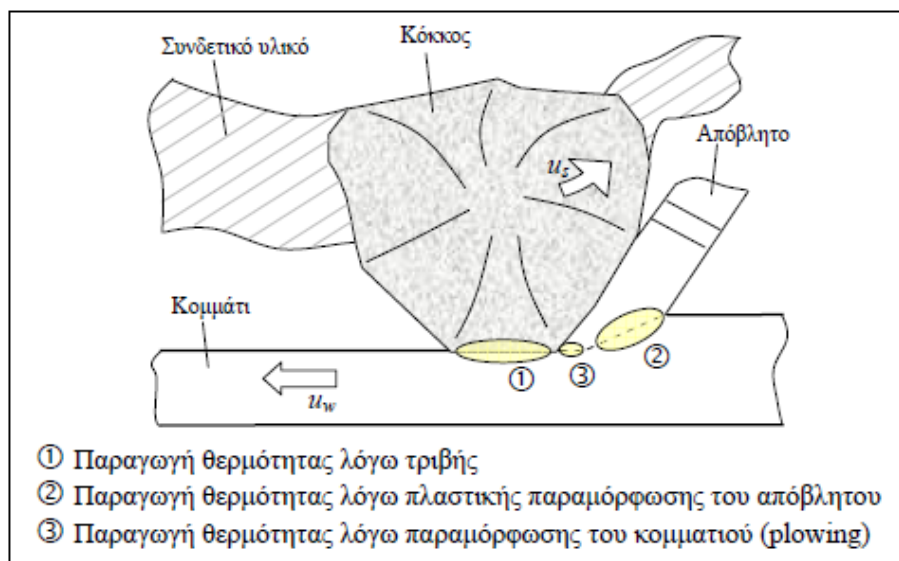


Ειδική ενέργεια κοπής συναρτήσσει του ρυθμού αφαίρεσης υλικού ανά μονάδα πλάτους (Malkin 1989) [Σχήμα 5.7]

Παραγωγή και επιμερισμός θερμότητας

Για τον υπολογισμό της θερμότητας που παράγεται κατά την κατεργασία είναι σκόπιμο να αναλυθούν οι μηχανισμοί που την προκαλούν [σχήμα 5.8]. Η παραγόμενη θερμότητα προέρχεται από:

- Την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ λειαντικών κόκκων και τεμαχίου.
- Τη πλαστική παραμόρφωση στο επίπεδο διάτμησης κατά την διάρκεια απομάκρυνσης του αποβλήτου.
- Τη πλαστική παραμόρφωση του υλικού του τεμαχίου χωρίς όμως να έχουμε αφαίρεση υλικού.



Μηχανισμοί παραγωγής θερμότητας [Σχήμα 5.8]

Με βάση πειραματικά δεδομένα θεωρούμε ότι τα ποσά θερμότητας που παράγονται εξαιτίας πλαστικής παραμόρφωσης στο επίπεδο διάτμησης, αλλά και στο τεμάχιο είναι αμελητέα σε σχέση με τη θερμότητα που προέρχεται από τη τριβή στην διεπαφή κόκκου – τεμαχίου (Lavine 1991, 2000 και Malkin 1989). Έτσι θεωρώντας ως μόνη πηγή θερμότητας την τριβή μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ της κατεργασίας ως:

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

$$P = \text{ισχύς περιστροφής του λειαντικού τροχού [W]}$$

Το θετικό πρόσημο αναφέρεται όταν η περιφερειακή ταχύτητα του τροχού και η ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου είναι ομόρροπες (down grinding), ενώ το αρνητικό πρόσημο στην περίπτωση που είναι αντίρροπες (up grinding). Λόγω μεγάλης διαφοράς μεταξύ των ταχυτήτων, θα μπορούσαμε να απλοποιήσουμε τη σχέση και να δεχτούμε ως ταχύτητα, την περιφερειακή ταχύτητα του λειαντικού τροχού. Η επάρκεια όμως υπολογιστικής ισχύος δεν μας οδηγεί στην ανάγκη για αυτή τη παραδοχή.

Η παραχθείσα θερμότητα της κατεργασίας «μοιράζεται» στον τεμάχιο, το λειαντικό τροχό και τα απόβλητα της κατεργασίας [σχήμα 5.9]. Υπολογίζουμε την παραχθείσα ροή θερμότητας ως το πηλίκο της ισχύος κατεργασίας προς την επιφάνεια της ζώνης λείανσης. Με βάση τα παραπάνω έχουμε:

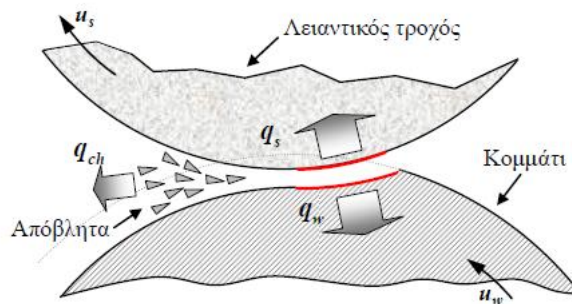
$$q_t = \frac{P}{b * l_c} = q_w + q_s + q_{ch}$$

$$q_t = \text{παραχθείσα ροή θερμότητας} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$$

$$q_w = \text{ροή θερμότητας προς το τεμάχιο} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$$

$$q_s = \text{ροή θερμότητας προς το λειαντικό τροχό} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$$

$$q_{ch} = \text{ροή θερμότητας προς τα απόβλητα} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$$



Ισοζύγιο ενέργειας κατεργασίας με εμφανείς τις ροές θερμότητας προς το τεμάχιο, το λειαντικό τροχό και τα απόβλητα [Σχήμα 5.9]

Η θερμότητα που μεταφέρεται από τα απόβλητα της κατεργασίας εκφράζεται μέσω της ειδικής ενέργειας που κατανέμεται στη ζώνη λείανσης. Η ειδική ενέργεια αποβλήτων υπολογίζεται ως η απαιτούμενη θερμότητα για την αύξηση της θερμοκρασίας, στα απόβλητα, έως το σημείο τήξεως, θερμοκρασία που σύμφωνα με το Malkin (1989) μπορεί εύκολα να φτάσει το απόβλητο. Άρα:

$$e_{ch} = \rho_{w,T=T_{mp}} * C_{w,T=T_{mp}} * (T_{mp} - T_o)$$

$$e_{ch} = \text{ειδική ενέργεια που μεταφέρεται από τα απόβλητα της λείανσης} \left[\frac{J}{mm^3} \right]$$

$$T_{mp} = \text{θερμοκρασία τήξεως τεμαχίου} [^{\circ}C]$$

$$T_o = \text{θερμοκρασία περιβάλλοντος} [^{\circ}C]$$

$$\rho = \text{πυκνότητα τεμαχίου} \left[\frac{kg}{mm^3} \right]$$

$$c = \text{θερμοχωρητικότητα τεμαχίου} \left[\frac{J}{kg * K} \right]$$

Ροή θερμότητας προς το απόβλητο:

$$q_{ch} = e_{ch} * \frac{a_e * u_w}{l_c}$$

Λόγος επιμερισμού θερμότητας αποβλήτου:

$$R_{ch} = \frac{q_{ch}}{q_t}$$

R_{ch} = λόγος επιμερισμού θερμότητας από τα απόβλητα

Στην συγκεκριμένη κατεργασία, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας παράγεται λόγω τριβής κόκκων –τεμαχίου. Επίσης η επιφάνεια επαφής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή σε άλλες κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, και θα χρησιμοποιήσουμε, από τους Rowe et al. (1998), ο λειαντικός τροχός και το τεμάχιο προσεγγίζονται σαν δυο ολισθαίνοντα σώματα το ένα πάνω στο άλλο. Με χρήση του αναλογικού αυτού μοντέλου υπολογίζεται ο επιμερισμός θερμότητας ανάμεσα σε λειαντικό τροχό και τεμάχιο:

$$R_{ws} = \frac{q_w}{q_w + q_s}$$

$$R_{ws} = \left(1 + \frac{\beta_s}{\beta_w} * \sqrt{\frac{u_s}{u_w}} \right)^{-1}$$

R_{ws} = λόγος επιμερισμού θερμότητας ανάμεσα σε τεμάχιο και λειαντικό τροχό

$$\beta_w = \sqrt{k_w * \rho_w * C_w} = \text{μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας τεμαχίου} \left[\frac{J}{m^2 * s * K} \right]$$

$$\beta_s = \sqrt{k_s * \bar{\rho}_s * \bar{C}_s} = \text{μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λειαντικού τροχού} \left[\frac{J}{m^2 * s * K} \right]$$

$$k = \text{θερμική αγωγιμότητα} \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του τροχού, θεωρούμε ότι ο τροχός είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από αέρα και το υλικό των κόκκων του. Οι μέσες τιμές των ιδιοτήτων του μπορούν να υπολογιστούν από τον κανόνα της ανάμειξης, με παράγοντα φ , το επιφανειακό πορώδες:

$$\bar{c}_s = \varphi * i_g + (1 - \varphi) * i_a$$

$$\varphi = \frac{A_a}{l_c * b} = \text{επιφανειακό πορώδες σύνθετου υλικού}$$

Πλέον μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροή θερμότητας προς το τεμάχιο:

$$q_w = R_{ws} * (q_t - q_{ch})$$

Τον λόγο επιμερισμού θερμότητας προς το τεμάχιο:

$$R_w = \frac{q_w}{q_t}$$

Και τέλος τον λόγο επιμερισμού θερμότητας προς το τροχό:

$$R_s = \frac{q_s}{q_t}$$

Αποτελέσματα Αναλυτικών Λύσεων

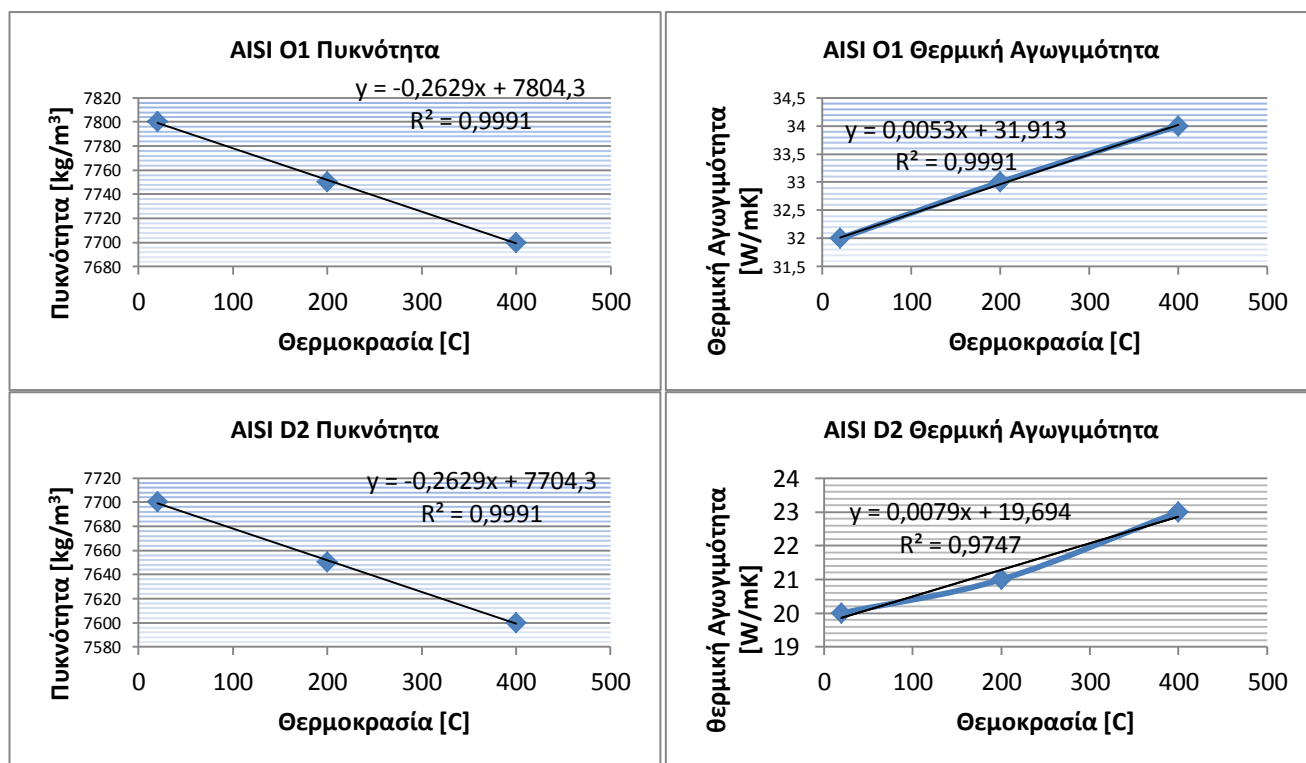
[Ενότητα 6]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασία έγιναν υπολογισμοί – μελέτη της κατεργασίας για τεμάχια δύο διαφορετικών υλικών, AISI O1 και AISI D2, με εννέα διαφορετικούς συνδυασμούς συνθηκών κατεργασίας (τρεις διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης και τρία διαφορετικά βάθη κοπής), για ομόρροπη και αντίρροπη λείανση. Συνολικά υπολογίστηκαν 36 διαφορετικές περιπτώσεις. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών, και θα «σταθούμε» στα σημεία που χρήζουν ανάλυσης και στα συμπεράσματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Αρχικά ως αναφερθούμε στα υλικά των τεμαχίων. Η εταιρεία μας παρείχε κάποια στοιχεία σχετικά με τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητές τους. Στους υπολογισμούς χρειαζόμαστε την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα. Με βάση τα στοιχεία της εταιρείας έγινε προσπάθεια να υπολογιστούν οι ιδιότητες για τις υψηλές θερμοκρασίες της κατεργασίας. Με χρήση Excel δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα ιδιοτήτων – θερμοκρασίας, και στη συνέχεια προσεγγίστηκαν με εξισώσεις 1^{ου} βαθμού. Βλέπουμε από τα διαγράμματα στο σχήμα 6.1, ότι έχουμε ικανοποιητική ακρίβεια ($R^2 > 0.97$), και μπορούμε μέσω των εξισώσεων να υπολογίσουμε τις ιδιότητες των υλικών μας, για τις υψηλές θερμοκρασίες κατεργασίας.

AISI O1			AISI D2		
Θερμοκρασία [°C]	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	Πυκνότητα [kg/m ³]	Θερμοκρασία [°C]	Θερμική Αγωγιμότητα [W/mK]	Πυκνότητα [kg/m ³]
20	32	7800	20	20	7700
200	33	7750	200	21	7650
400	34	7700	400	23	7600

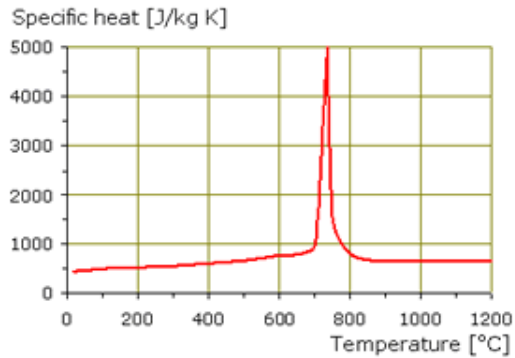
Ιδιότητες υλικών τεμαχίων [Πίνακας 6.1]



Ιδιότητες υλικών AISI D2 και AISI O1 [Σχήμα 6.1]

Έτσι έχουμε κάποιες σχέσεις οι οποίες «διορθώνουν» τις ιδιότητες των υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η θερμοχωρητικότητα και για τα δύο υλικά ορίστηκε $C_p = 650 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 6.2.



Ειδική θερμοχωρητικότητα χάλυβα [Σχήμα 6.2]

(<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/StainlessSteel/thermalProperties.htm>)

Στους υπολογισμούς χρειαζόμαστε επίσης τις θερμικές ιδιότητες του αέρα, και για το alundum για να υπολογιστεί η θερμική συμπεριφορά του λειαντικού τροχού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχουμε :

Υλικό	Θερμοκρασία τήξεως [°C]	Πυκνότητα [kg/mm ³]	Θερμοχωρητικότητα [J/kgK]	Θερμική αγωγιμότητα [W/mmC]
Alundum	1900	0,0000033	900	0,0027
Αέρας	~	3,53*e-10	0,001411	0,00006754

Ιδιότητες αέρα και υλικού λειαντικού τροχού [Πίνακας 6.2]

Τα χαρακτηριστικά του λειαντικού τροχού, όπως έχουν αναφερθεί και στην ενότητα 5, είναι:

- Διάμετρος: $d_s = 300 [mm]$
- Πλάτος: $b = 50 [mm]$
- Μέγεθος κόκκων: $M = 36$
- Σκληρότητα (GRADE): $K \rightarrow$ μέση σκληρότητα \rightarrow για τους υπολογισμούς $n = 11$
- Δομή του λειαντικού τροχου: $8 \rightarrow$ για τους υπολογισμούς $S = 8$

Χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής:

- Ταχύτητα λειαντικού τροχού: $2800 [rpm] = 2800 * \frac{\pi * d_s}{60} \left[\frac{m}{sec} \right] = 2800 * \frac{\pi * 0.3}{60} = 43.98 \left[\frac{m}{sec} \right]$
- Ταχύτητες πρόωσης: $0.195 \left[\frac{m}{sec} \right], 0.2815 \left[\frac{m}{sec} \right], 0.3765 \left[\frac{m}{sec} \right]$

Οι μετατροπές μονάδων και ενδιάμεσοι «συντελεστές – μεγέθη» υπολογίστηκαν για να είναι συμβατοί με τις προαναφερθείσες σχέσεις υπολογισμού.

Τέλος ως συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον ορίστηκε $h = 10 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

Μια πρώτη εκτίμηση της μέγιστης θερμοκρασίας στην επιφάνεια κατεργασίας έχουμε από τη σχέση που προτείνει ο Heinzl (Heinzl, A versatile method to determine thermal limits in grinding, 2014) και αποδίδει μια εκτίμηση μέσω ημιεμπειρικής σχέσης.

$$T_m = \frac{1.13 * q_w * a^{\frac{1}{2}} * a_e^{\frac{1}{4}} * d_s^{\frac{1}{4}}}{k_w * u_w^{\frac{1}{2}}}$$

$$a = \frac{k * \rho}{C_p} \text{ συντελεστής θερμικής διάχυσης } \left[\frac{mm^2}{sec} \right]$$

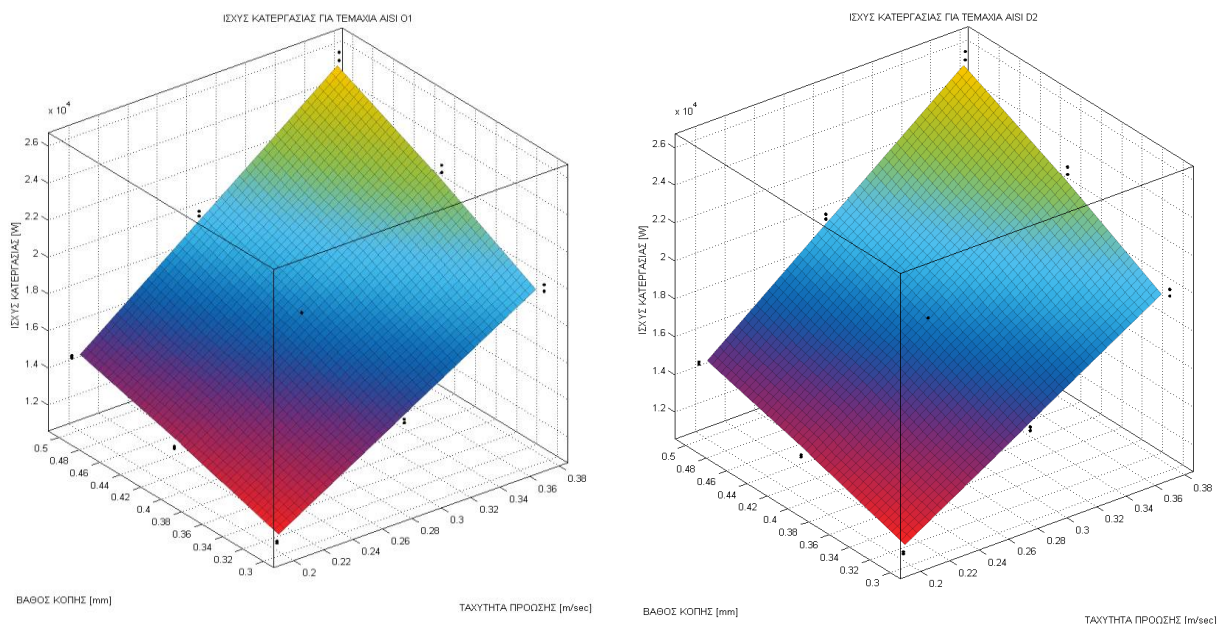
Η σχέση αυτή για «τριγωνική πηγή θερμότητας» διορθώνεται σύμφωνα με τον Malkin (Malkin, Thermal analysis of grinding) σε:

$$T_m = \frac{1.06 * q_w * a^{\frac{1}{2}} * a_e^{\frac{1}{4}} * d_s^{\frac{1}{4}}}{k_w * u_w^{\frac{1}{2}}}$$

Η θερμοκρασία που υπολογίστηκε με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιήθηκε για να οριστούν οι θερμικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών (ως μέσος όρος στην «αναμενόμενη περιοχή» θερμοκρασιών).

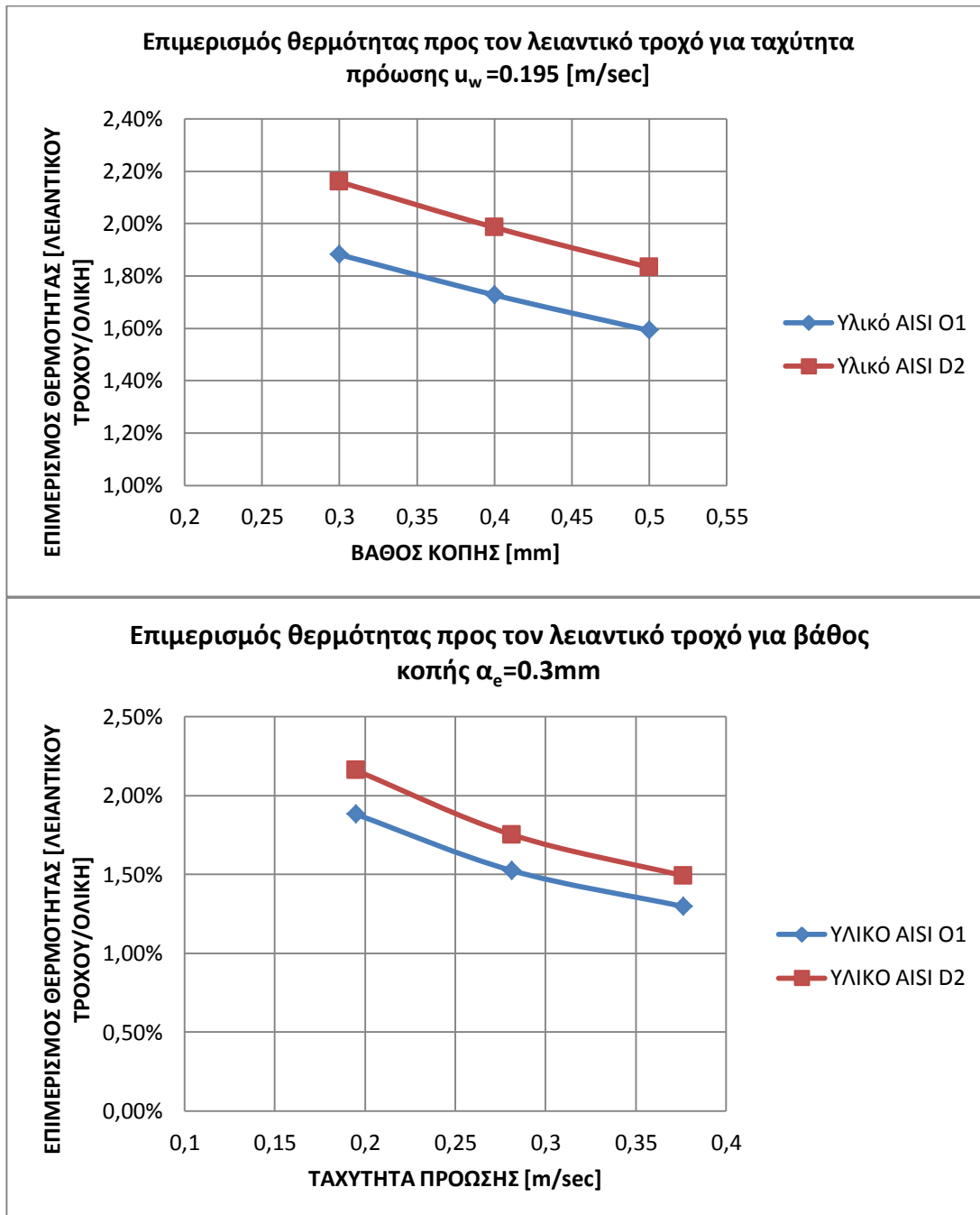
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποια αποτελέσματα των αρχικών υπολογισμών, τα οποία παρουσιάζουν ενδιαφέρον, σχετικά με την κατεργασία και τις παραμέτρους που την επηρεάζουν.

Οι δυνάμεις κοπής, όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνονται με αύξηση του βάθους κοπής και της ταχύτητας πρόωσης του τεμαχίου. Ταυτόχρονη, και ανάλογη, αύξηση έχουμε και στην ισχύ της κατεργασίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3.



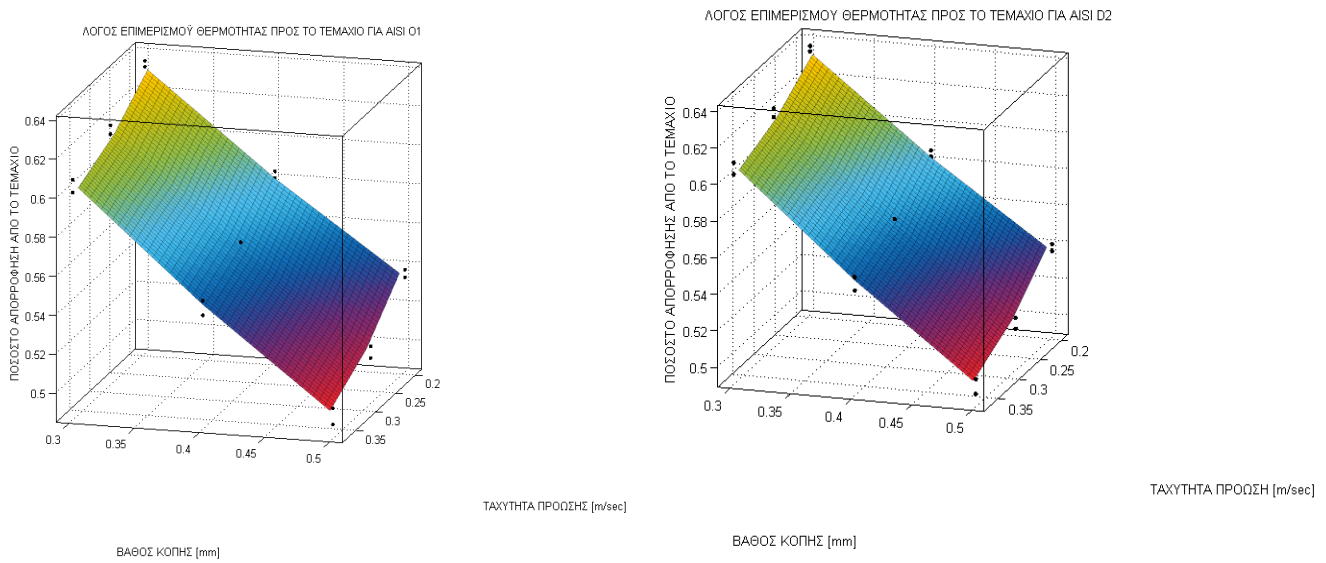
Ισχύς κατεργασίας συναρτήσει των συνθηκών [Σχήμα 6.3]

Ο επιμερισμός θερμότητας ανάμεσα στο τεμάχιο και τα υπόλοιπα μέρη (λειαντικός τροχός και απόβλητα), εξαρτάται και καθορίζεται από τις συνθήκες κοπής και το είδος του λειαντικού τροχού. Όπως αναφέρεται από τον Malkin (Malkin, Thermal analysis of grinding), σε τροχούς υλικού κόκκων Alundum (όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε) το ποσοστό ισχύος που απορροφάται από τον λειαντικό τροχό είναι εξαιρετικά χαμηλό. Επίσης σύμφωνα με τον Σαλωνίτη (Σαλωνίτης, 2006) ο λόγος επιμερισμού θερμότητας προς το λειαντικό τροχό μειώνεται τόσο με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης, όσο και με την αύξηση του βάθους κοπής. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τους υπολογισμούς μας, και αποτυπώνονται στο σχήμα 6.4.



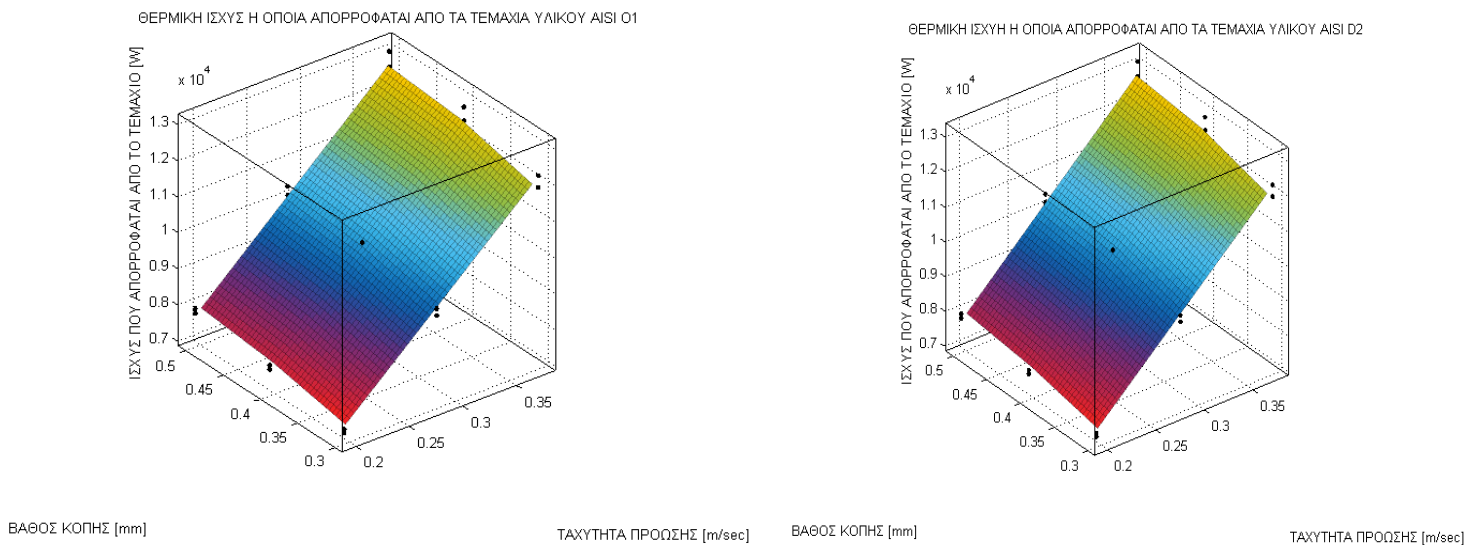
Επιμερισμός θερμότητας προς τον λειαντικό τροχό σε δύο ενδεικτικές περιπτώσεις [Σχήμα 6.4]

Ο λόγος επιμερισμού θερμότητας προς το τεμάχιο, όπως αναφέρει ο Σαλωνίτης στη διατριβή του, είναι της τάξεως του 40% - 60%. Ανάλογα συμπεράσματα προτείνει και ο Malkin (Malkin, Thermal analysis of grinding). Τα αποτελέσματα μας «κινούνται» σε αυτά τα όρια (Σχήμα 6.5). Παρατηρούμε ότι το ποσοστό θερμότητας που απορροφάται από το τεμάχιο μειώνεται με αύξηση του βάθους κοπής και αύξηση της ταχύτητας πρόωσης. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην [ενότητα 4]. Αύξηση ταχύτητας πρόωσης, οδηγεί σε μείωση του χρόνου επαφής, που από μια ταχύτητα και πάνω συνεπάγεται μείωση της θερμότητας που παραλαμβάνει το τεμάχιο. Με αυξημένο βάθος κοπής, αν και παράγεται περισσότερη ενέργεια, και αυξάνεται και το μήκος επαφής l_c , δημιουργούνται και περισσότερα απόβλητα, μέσω των οποίων απομακρύνεται μεγάλο ποσοστό θερμότητας.



Λόγοι επιμερισμού θερμότητας προς τα τεμάχια συναρτήσει συνθηκών κοπής [Σχήμα 6.5]

Τέλος παρουσιάζονται οι θερμικές ροές προς το τεμάχιο συναρτήσει των παραμέτρων κατεργασίας (Σχήμα 6.6).



Απορροφώμενη θερμική ισχύς συναρτήσει των συνθηκών κατεργασίας [Σχήμα 6.6]

Η διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας για μη μόνιμη κατάσταση σε τρεις διαστάσεις με κινούμενο τεμάχιο είναι:

$$k * \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho * c * \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u_w * \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

με $T = T(x, y, z, t)$ (χρονική και χωρική κατανομή θερμοκρασίας)

- Αρχικές συνθήκες: $T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_{\infty} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Οριακές συνθήκες:
 - Εξωτερικά της πηγής

$$-k * \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{z=0, |x| > \frac{l_c}{2}, |y| > \frac{b}{2}} = -h * (T|_{z=0} - T_{\infty})$$

- Εσωτερικά της περιοχής που δρα η πηγή

$$-k * \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{z=0, |x| \leq \frac{l_c}{2}, |y| \leq \frac{b}{2}} = \dot{q}(x') - h * (T|_{z=0} - T_{\infty})$$

Ορίζουμε – υπολογίζουμε:

$$\dot{q}(x') = \dot{q}_o * \left(1 + \frac{2}{l_c} * x' \right) = \frac{Q_o}{l_c * b} * \left(1 + \frac{2}{l_c} * x' \right) \rightarrow \dot{q}_o = \frac{Q_o}{l_c * b} = \frac{P * R_w}{l_c * b}$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, βασιζόμενη στις εργασίες των DesRuisseaux και Zerkle, χρησιμοποιεί αδιάστατες μεταβλητές:

$$\begin{aligned} X &= \frac{u_w * x}{2 * a}, Y = \frac{u_w * y}{2 * a}, Z = \frac{u_w * z}{2 * a} \\ L &= \frac{u_w * l_c}{4 * a}, B = \frac{u_w * b}{4 * a} \\ H &= \frac{2 * \alpha * h}{k * u_w} \\ \tau &= \frac{u_w * \sqrt{t - t'}}{2 * \sqrt{a}} \end{aligned}$$

Και η αναλυτική λύση που προτείνεται είναι:

$$\begin{aligned} T(X, Y, Z, T) &= \frac{2 * \alpha * \dot{q}_o}{\sqrt{\pi} * k * u_w} \int_0^{\frac{u_w * \sqrt{t}}{2 * \sqrt{a}}} \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{Y + B}{2 * \tau} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{Y - B}{2 * \tau} \right) \right] e^{-\frac{Z^2}{4 * \tau^2}} \\ &* \left\{ \left(1 + \frac{X + 2 * \tau^2}{L} \right) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{X + L}{2 * \tau} + \tau \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{X - L}{2 * \tau} + \tau \right) \right] + \frac{2 * \tau}{L * \sqrt{\pi}} \left[e^{-\left(\frac{X + L}{2 * \tau} + \tau \right)^2} - e^{-\left(\frac{X - L}{2 * \tau} + \tau \right)^2} \right] \right\} d\tau \\ &- \frac{2 * \alpha * \dot{q}_o}{k * u_w} H \int_0^{\frac{u_w * \sqrt{t}}{2 * \sqrt{a}}} \frac{\tau}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{Y + B}{2 * \tau} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{Y - B}{2 * \tau} \right) \right] e^{H * Z + H^2 * \tau^2} \\ &* \left\{ \left(1 + \frac{X + 2 * \tau^2}{L} \right) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{X + L}{2 * \tau} + \tau \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{X - L}{2 * \tau} + \tau \right) \right] + \frac{2 * \tau}{L * \sqrt{\pi}} \left[e^{-\left(\frac{X + L}{2 * \tau} + \tau \right)^2} - e^{-\left(\frac{X - L}{2 * \tau} + \tau \right)^2} \right] \right\} \\ &* \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2 * \tau} + H * \tau \right) d\tau \end{aligned}$$

Επιλύοντας, και με χρήση μεθόδου Gauss – Kronrod ^[1] για υπολογισμό των ολοκληρωμάτων, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται συναρτήσεις των συνθηκών κοπής, το μήκος επαφής, η ισχύς της κατεργασίας, η θερμική ροή προς το τεμάχιο και η μέγιστη προβλεπόμενη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του τεμαχίου.

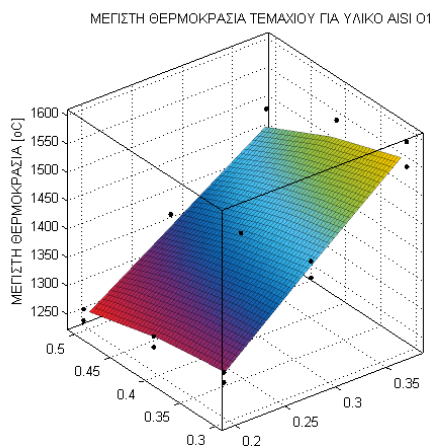
ΥΛΙΚΟ	#	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	l _c [mm]	P [W]	q _w [W/mm ²]	R _w	Μέγιστη Θερμοκρασία ημιεμπειρικής σχέσης [°C]	Μέγιστη Θερμοκρασία αναλυτικής λύσης [°C]	Διαφορά	
AISI 01	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	1	0,3	0,195	9,49	11400	76,30	63%	1305	1310	0,36%
		2	0,3	0,2815	9,49	15544	101,28	62%	1442	1447	0,36%
		3	0,3	0,3765	9,49	20114	128,93	61%	1587	1593	0,36%
		4	0,4	0,195	10,95	13165	70,06	58%	1288	1292	0,36%
		5	0,4	0,2815	10,95	17951	92,23	56%	1411	1416	0,36%
		6	0,4	0,3765	10,95	23229	116,79	55%	1545	1550	0,36%
		7	0,5	0,195	12,25	14721	64,56	54%	1255	1259	0,36%
		8	0,5	0,2815	12,25	20072	84,26	51%	1363	1368	0,36%
		9	0,5	0,3765	12,25	25973	106,09	50%	1484	1489	0,36%
	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	10	0,3	0,195	9,49	11300	75,26	63%	1287	1292	0,37%
		11	0,3	0,2815	9,49	15347	99,24	61%	1412	1418	0,37%
		12	0,3	0,3765	9,49	19773	125,39	60%	1543	1549	0,37%
		13	0,4	0,195	10,95	13049	69,02	58%	1268	1273	0,37%
		14	0,4	0,2815	10,95	17723	90,19	56%	1379	1385	0,37%
		15	0,4	0,3765	10,95	22834	113,25	54%	1498	1503	0,37%
		16	0,5	0,195	12,25	14591	63,52	53%	1234	1239	0,37%
		17	0,5	0,2815	12,25	19817	82,21	51%	1330	1334	0,37%
		18	0,5	0,3765	12,25	25532	102,54	49%	1434	1439	0,37%
AISI D2	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	19	0,3	0,195	9,49	11400	76,43	64%	1498	1503	0,36%
		20	0,3	0,2815	9,49	15544	101,59	62%	1657	1663	0,36%
		21	0,3	0,3765	9,49	20114	129,43	61%	1825	1832	0,36%
		22	0,4	0,195	10,95	13165	70,29	58%	1480	1485	0,36%
		23	0,4	0,2815	10,95	17951	92,68	57%	1624	1630	0,36%
		24	0,4	0,3765	10,95	23229	117,46	55%	1780	1786	0,36%
		25	0,5	0,195	12,25	14721	64,88	54%	1444	1450	0,36%
		26	0,5	0,2815	12,25	20072	84,82	52%	1572	1577	0,36%
		27	0,5	0,3765	12,25	25973	106,91	50%	1713	1719	0,36%
	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	28	0,3	0,195	9,49	11300	75,41	63%	1478	1483	0,36%
		29	0,3	0,2815	9,49	15347	99,57	62%	1624	1630	0,36%
		30	0,3	0,3765	9,49	19773	125,92	60%	1776	1782	0,36%
		31	0,4	0,195	10,95	13049	69,27	58%	1458	1464	0,36%
		32	0,4	0,2815	10,95	17723	90,65	56%	1589	1594	0,36%
		33	0,4	0,3765	10,95	22834	113,94	55%	1727	1733	0,36%
		34	0,5	0,195	12,25	14591	63,85	54%	1422	1427	0,36%
		35	0,5	0,2815	12,25	19817	82,79	51%	1534	1540	0,36%
		36	0,5	0,3765	12,25	25532	103,40	50%	1657	1663	0,36%

[Πίνακας 6.3]

Από την επίλυση τόσο της αναλυτικής λύσης, όσο και της σχέσης που προτείνει ο Malkin παρατηρούμε τα εξής:

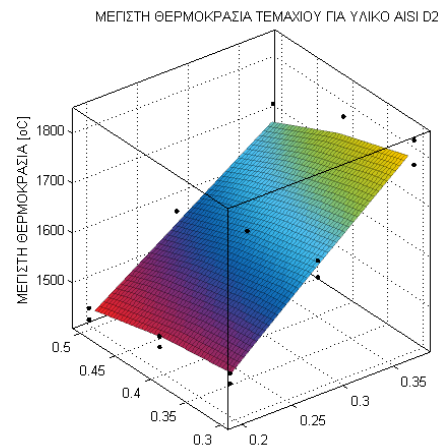
- Οι μέγιστες θερμοκρασίες που υπολογίζονται είναι «πρακτικά ίσες» με απόκλιση της τάξης του 0.36% - 0.37%.
- Όπως είναι αναμενόμενο και απόλυτα λογικό, μεγαλύτερη θερμική ισχύς οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, με αυτές να εξαρτώνται τόσο από το βάθος κοπής όσο και από την ταχύτητα πρόωσης.
- Η διαφοροποίηση ανάμεσα σε ομόρροπη και αντίρροπη λείανση αναφορικά με την μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο τεμάχιο, κυμαίνεται από 1% - 3%. Λόγω της μικρής διαφοράς, στη βιβλιογραφία (Σαλωνίτης, 2006) συχνά δεν γίνεται διαχωρισμός – αναφορά στο αν εξετάζουμε ομόρροπη η αντίρροπη λείανση, με τα αποτελέσματα της σκλήρυνσης μέσω λείανσης να μην εξαρτώνται από αυτή τη παράμετρο.
- Στα τεμάχια από υλικό AISI D2 παρατηρούμε αυξημένες θερμοκρασίες σε σχέση με τα αντίστοιχα (ίδιες συνθήκες κατεργασίας) υλικού AISI O1. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των υλικών. Στο υλικό AISI O1 (με βάση τα στοιχεία της εταιρίας αλλά και τη βιβλιογραφία) ο συντελεστής έχει τιμή $k = 32 \left[\frac{W}{mk} \right]$ για θερμοκρασία 20°C και αυξάνεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η αντίστοιχη τιμή για το υλικό AISI D2 είναι $k = 20 \left[\frac{W}{mk} \right]$. Η κατά 33% χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα «δυσκολεύει» την μετάδοση της θερμότητας στο τεμάχιο, αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.8) παρουσιάζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες σε μορφή διαγράμματος συναρτήσεως των συνθηκών λείανσης.



ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ [mm]

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ [m/sec]

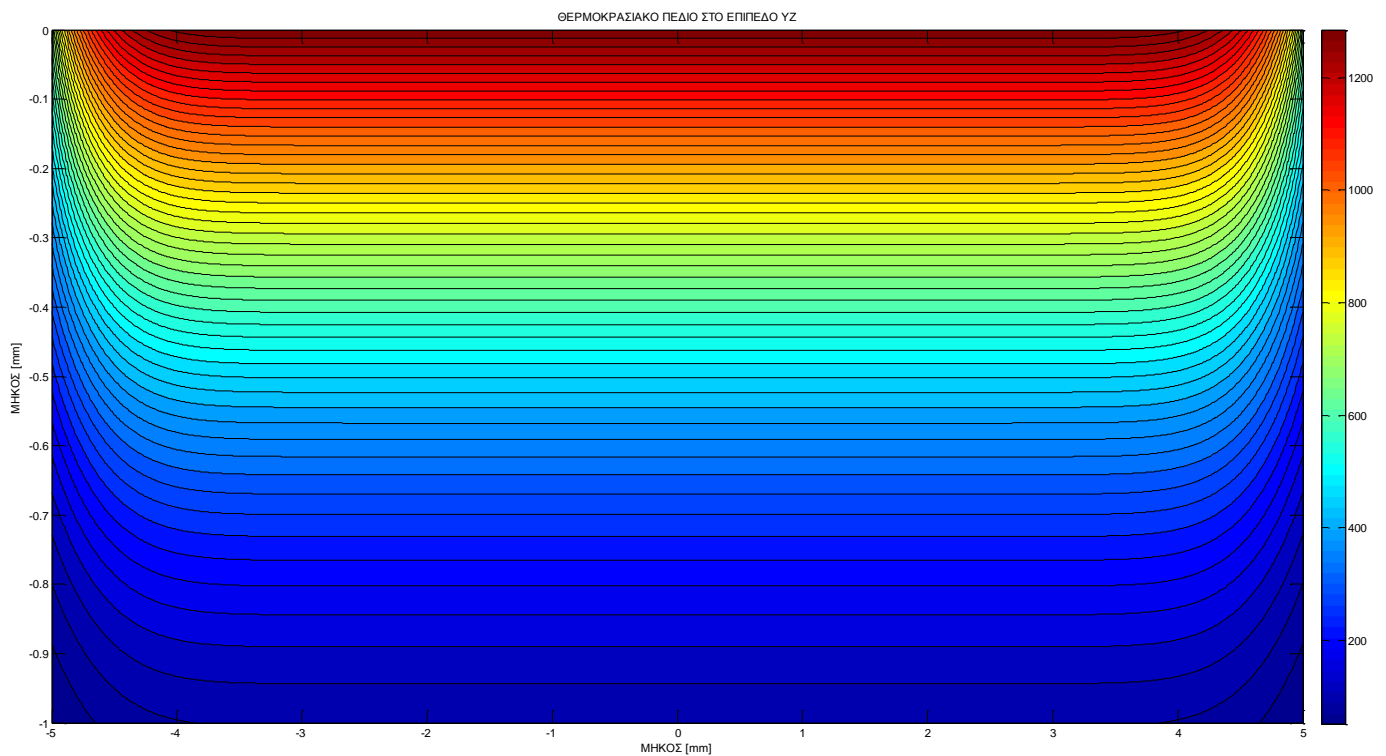
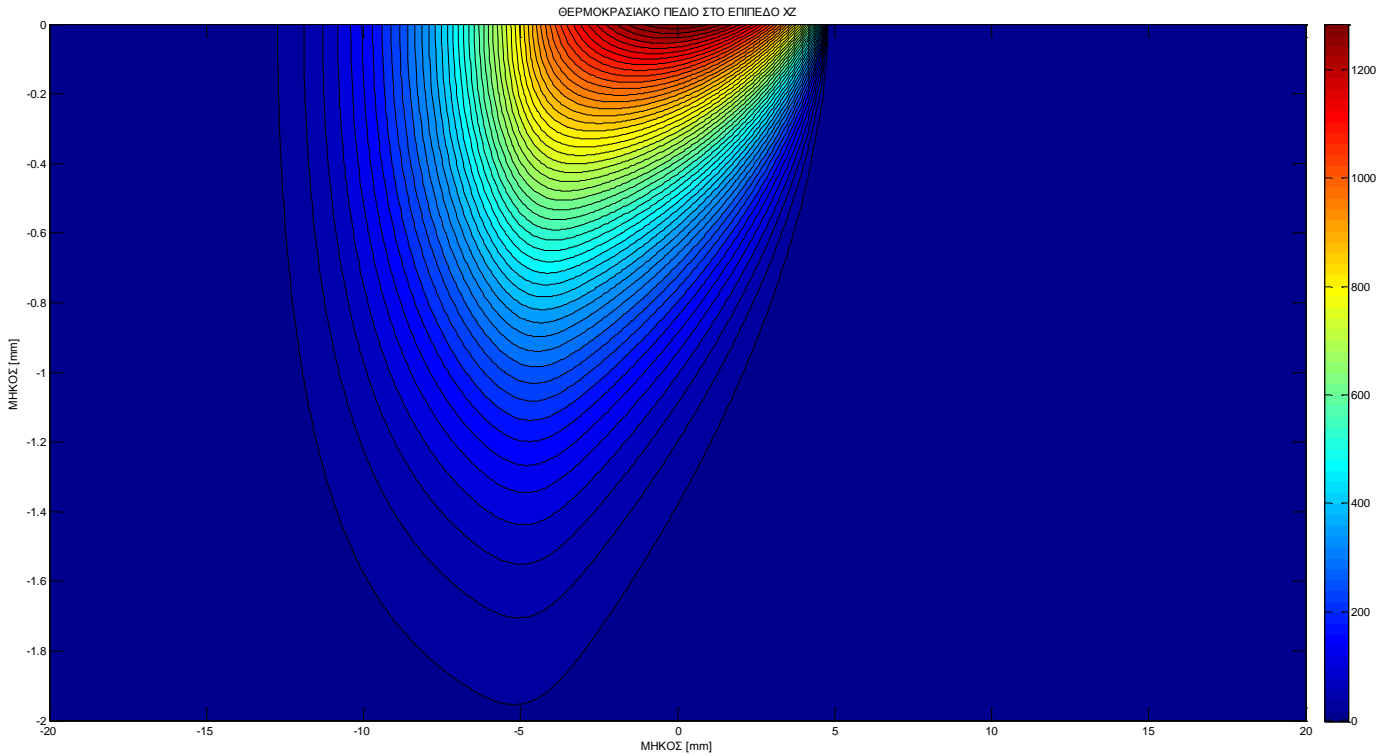


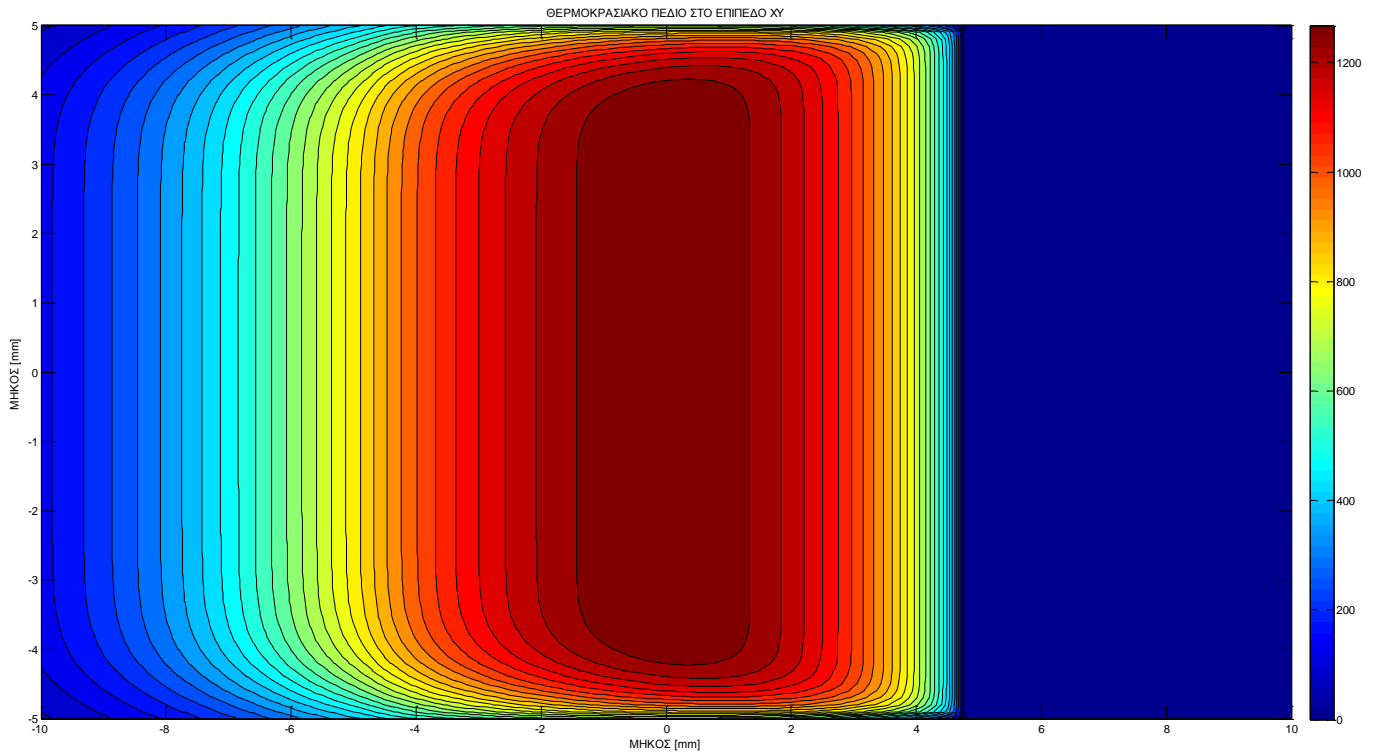
ΒΑΘΟΣ ΚΟΠΗΣ [mm]

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ [m/sec]

Μέγιστες θερμοκρασίες τεμαχίων συναρτήσεως των παραμέτρων κατεργασίας (ταχύτητα πρόωσης και βάθος κοπής) [Σχήμα 6.8]

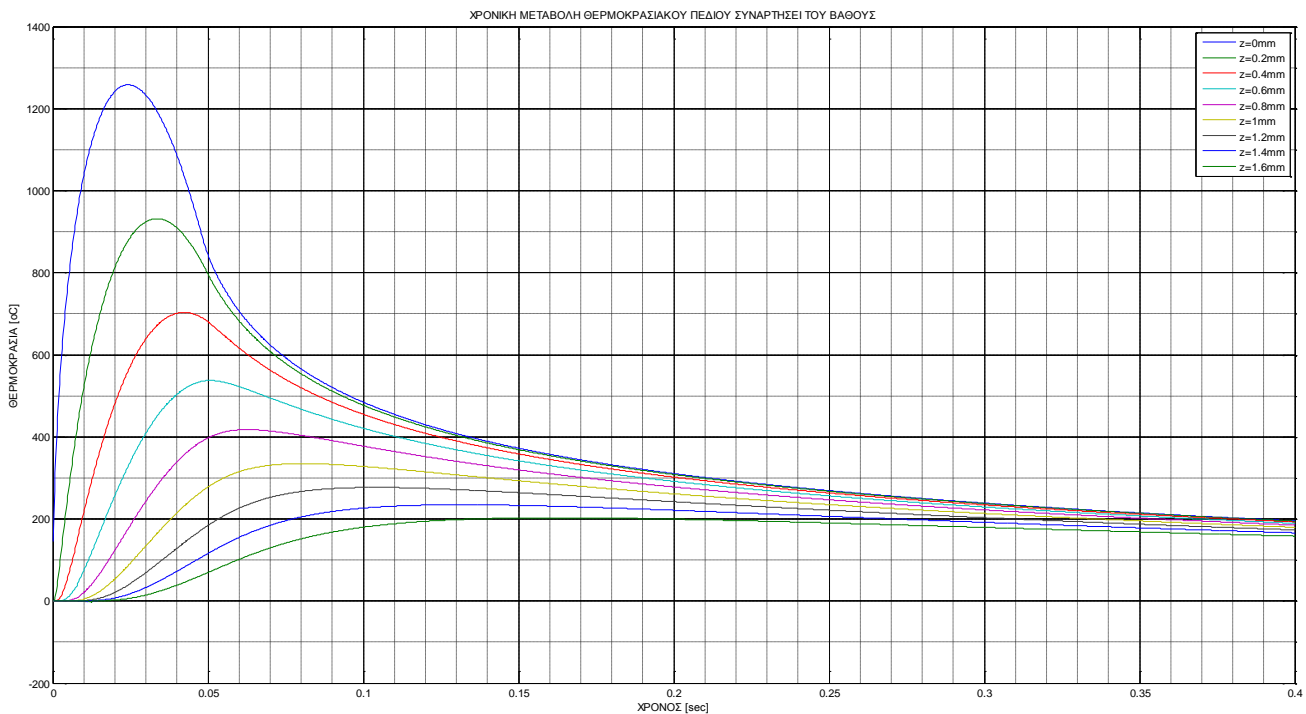
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τη θερμοκρασιακή κατανομή ανά επίπεδο στο τεμάχιο (x,z) , με βάση την επίλυση των αναλυτικών σχέσεων. Ως χρονικό βήμα χρησιμοποιήθηκε το πηλίκο του μήκους επαφής προς την ταχύτητα πρόωσης $(t = \frac{l_c}{u_w} [sec])$. Τα θερμοκρασιακά προφίλ που προκύπτουν είναι αναμενόμενα και ποιοτικά δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας, γι αυτό θα παραθέσουμε μόνο ένα, για συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας $u_w = 0.195 [m/sec]$, $a_e = 0.3 [mm]$.





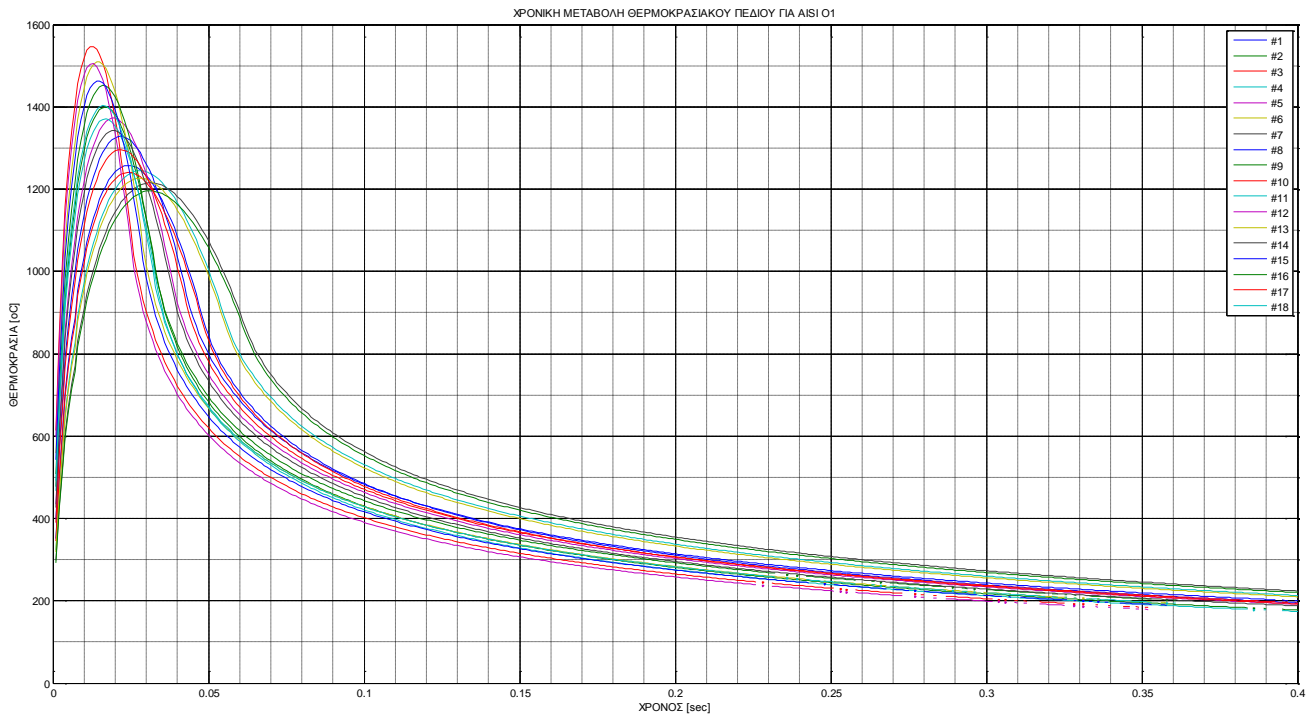
Θερμοκρασιακό πεδίο στο τεμάχιο σε τομές στα επίπεδα xy , yz , xz [Σχήμα 6.9]

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.10) παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας για βάθη από 0 – 1.6 mm. Η μορφή των «καμπυλών θέρμανσης – ψύξης» παρουσιάζουν απόλυτη συμφωνία και ομοιότητα με αυτές της βιβλιογραφίας.

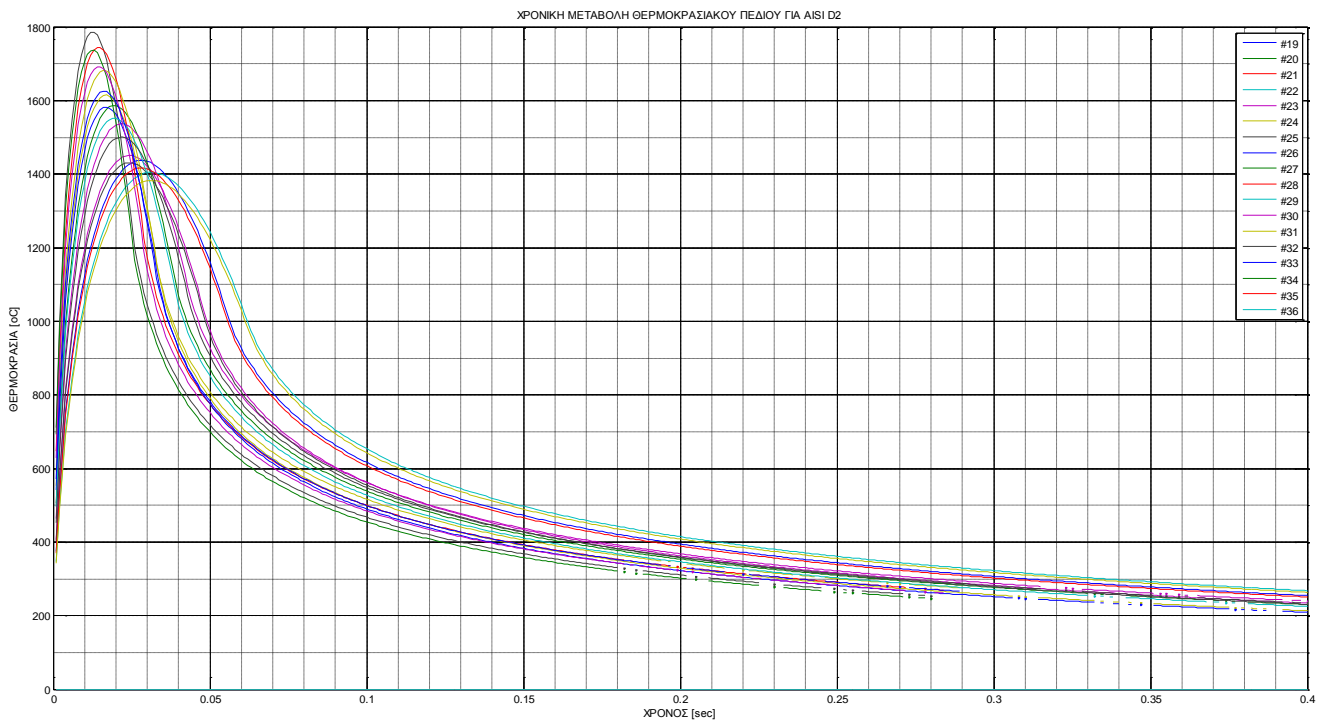


Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια του τεμαχίου [Σχήμα 6.10]

Στα διαγράμματα 6.11 και 6.12 που ακολουθούν παρουσιάζεται ο χρόνος απόψυξης για το σύνολο των 36 διαφορετικών συνθηκών κατεργασίας και απεικονίζει τόσο τη χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας όσο και τη μέγιστη θερμοκρασία.



Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας σε τεμάχια AISI 01 για όλες τις συνθήκες κατεργασίας [Σχήμα 6.11]



Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας σε τεμάχια AISI 01 για όλες τις συνθήκες κατεργασίας [Σχήμα 6.12]

^[1] Ο αλγόριθμος Gauss – Kronrod αποτελεί αριθμητική μέθοδο υπολογισμού ολοκληρωμάτων. Η επίλυση έγινε σε περιβάλλον MATLAB, με ιδιαίτερη προσοχή στην διαχείριση των χωρικών και χρονικών μεταβλητών. Η επιλογή του «βήματος» υπολογισμού για τις μεταβλητές μας έγινε με γνώμονα την ορθολογική και ρεαλιστική διαχείριση της υπολογιστικής ισχύος, την ακρίβεια, αλλά και την αποφυγή πιθανών σφαλμάτων λόγω αριθμητικής και όχι αναλυτικής επίλυσης. Τα δεδομένα μας (συνθήκες κατεργασίας, θερμικές ροές, θερμο φυσικές ιδιότητες υλικού τεμαχίων), εισάγονται υπό την μορφή πινάκων, ώστε να γίνεται ευκολότερη και αυτοματοποιημένη κατά το δυνατόν διαχείρισή τους. Εν συνεχεία γίνεται η επίλυση και έτσι μπορούμε να έχουμε τη θερμοκρασία του τεμαχίου σε κάθε σημείο και για κάθε χρονική στιγμή $T(x,y,z,t)$. Φυσικά μπορούμε να αποθηκεύσουμε τις τιμές αυτές σε μητρώα όμως αυτό θα είχε μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ. Για ευκολότερη και πρακτικότερη διαχείριση των δεδομένων γίνεται επιλεκτική και σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις επίλυση και αποθήκευση των δεδομένων. Για παράδειγμα θέλοντας να υπολογίσουμε το θερμοκρασιακό προφίλ σε τομή xz επιπέδου, με δεδομένη την αξονοσυμμετρική γεωμετρία, διατηρούμε σταθερή την τιμή του άξονα y, εξοικονομώντας έτσι υπολογιστικό χρόνο. Συνολικά «γράφτηκαν» αρκετά υποπρογράμματα τα οποία με πυρήνα τον χωρικό και χρονικό υπολογισμό της θερμοκρασίας, υπολογίζουν και παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στα οποία εστιάζουμε κάθε φορά.

Υπολογισμοί Με Πεπερασμένα Στοιχεία [ANSYS]

[Ενότητα 7]

Στην ενότητα αυτή θα προσεγγίσουμε την κατεργασία με χρήση λογισμικού περασμένων στοιχείων. Αρχικά θα πρέπει να «μοντελοποιήσουμε» το σύστημα κατά τρόπο που να «πλησιάζει» τις πραγματικές συνθήκες.

Η **πηγή θερμότητας**, όπως και στην αναλυτική λύση, θεωρείται ότι έχει τριγωνική χωρική κατανομή, και ταχύτητα ίση με την ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου (u_w). Λόγω αδυναμίας του υπολογιστικού πακέτου να διαχειριστεί πηγές με ταχύτητα, θα προσομοιάσουμε με «έμμεσο» τρόπο την κινούμενη πηγή. Δημιουργούμε κόμβους – στοιχειώδεις επιφάνειες στις οποίες αντιστοιχούμε πηγές αντίστοιχες της αρχικής, οι οποίες όμως μεταβάλλονται χρονικά. Έτσι γνωρίζοντας την απόσταση δύο διαδοχικών κόμβων, την ταχύτητα πρόωσης και το μήκος επαφής της κατεργασίας, μπορούμε να ορίσουμε πότε θα «ενεργοποιείται» η πηγή, για πόσο χρονικό διάστημα, και με ποιο χρονικά μεταβλητό προφίλ.

ΠΡΟΤΥΠΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΗΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ισχύουν για το σύστημά μας:

- Μήκος επαφής: l_{c1} [m]
- Ροή θερμότητας: q_w $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
- Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου: u_w $\left[\frac{m}{sec}\right]$
- Θέση κόμβου i : x_i [m]
- Απόσταση κόμβου i με $(i + 1)$: $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ [m]

Προκύπτουν

- Χρονικό σημείο ενεργοποίησης της θερμικής πηγής του κόμβου:

$$t_i = \frac{x_i}{u_w} [sec] \quad \text{ή}$$

$$t_{i+1} = t_i + \frac{\Delta x}{u_w} [sec]$$

- Χρονικό διάστημα επίδρασης κάθε πηγής (είναι σταθερό και εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους κατεργασίας:

$$t_{active} = \frac{l_{c1}}{u_w} [sec]$$

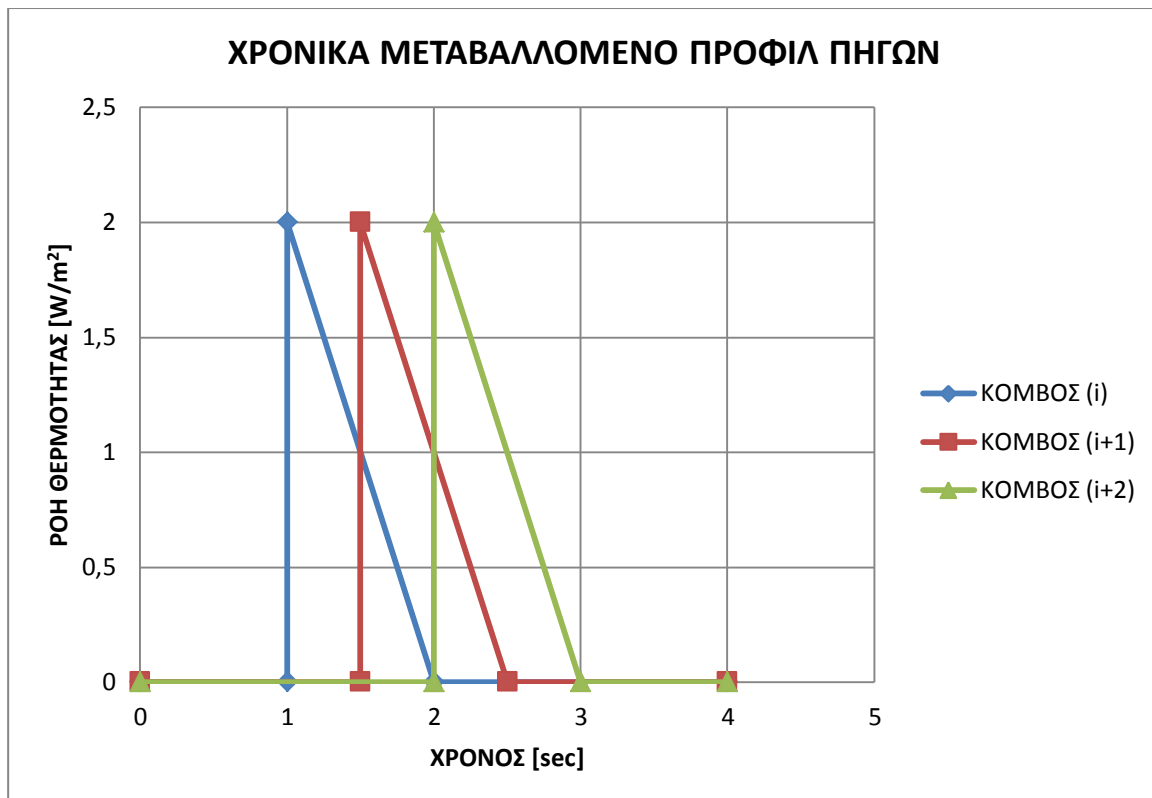
- Χρονικό προφίλ πηγής:

$$q_{wi}(t) = \begin{cases} t < t_i \rightarrow q_{wi}(t) = 0 \left[\frac{W}{m^2}\right] \\ t_i < t < t_i + t_{active} \rightarrow q_{wi}(t) = 2 * q_w - \frac{2 * q_w}{t_{active}} * (t - t_i) \left[\frac{W}{m^2}\right] \\ t > t_i + t_{active} \rightarrow q_{wi}(t) = 0 \left[\frac{W}{m^2}\right] \end{cases}$$

Έστω ότι έχει υπολογιστεί με την προαναφερθείσα μεθοδολογία:

- $q_w = 1 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
- $t_{i=1} = 1 [sec]$
- $t_{active} = 1 [sec]$
- $\frac{\Delta x}{u_w} = 0.5 [sec]$

Το προφίλ των πηγών μας για τρεις διαδοχικούς κόμβους (i,i+1,i+2) θα είναι:



Χρονικά μεταβαλλόμενο προφίλ πηγών [Σχήμα 7.1]

Οι θερμικές ιδιότητες των τεμαχίων εισήχθησαν στο υπολογιστικό πακέτο υπό μορφή εξισώσεων εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία (όπως παρουσιάστηκε στην [Ενότητα 6]).

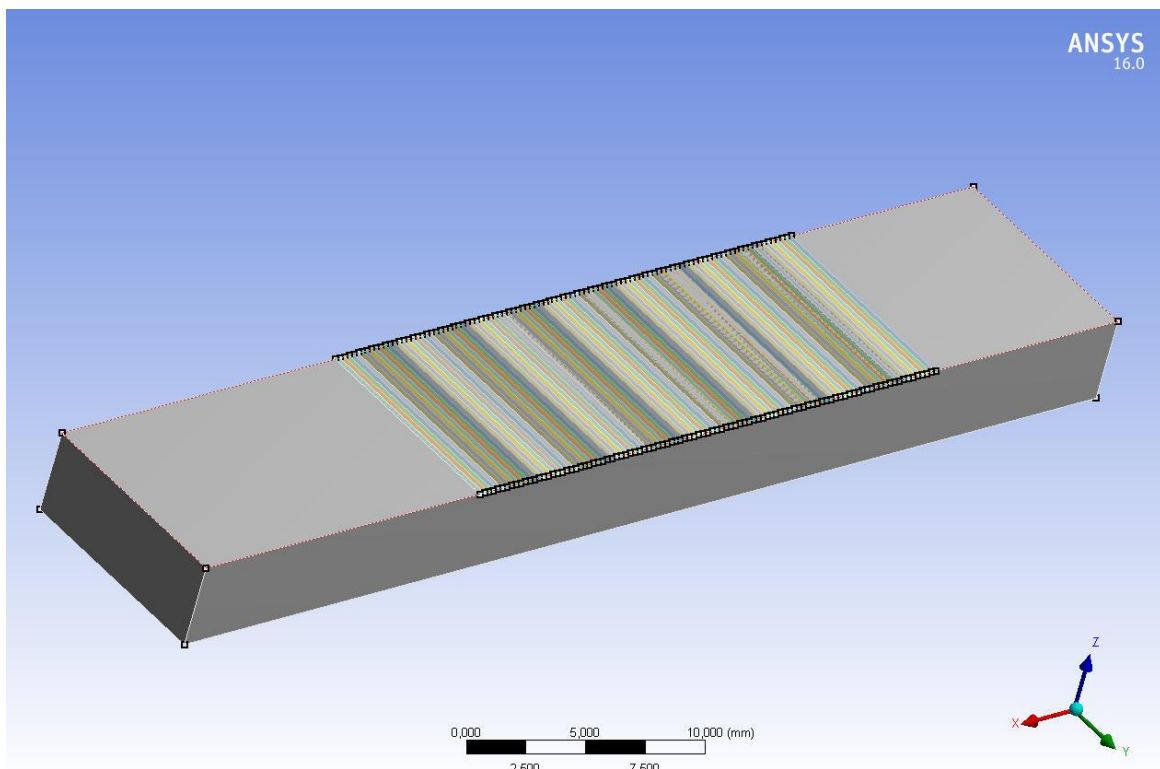
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	AISI O1	AISI D2
$C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Τιμές από [Σχήμα 6.1]	Τιμές από [Σχήμα 6.1]
Θερμική Αγωγιμότητα $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	$0.0053 * T + 31.913$	$0,0079 * T + 19.694$
Πυκνότητα $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$-0.2629 * T + 7804.3$	$-0.2629 * T + 7704.3$

Ιδιότητες υλικών [Πίνακας 7.1]

ANSYS

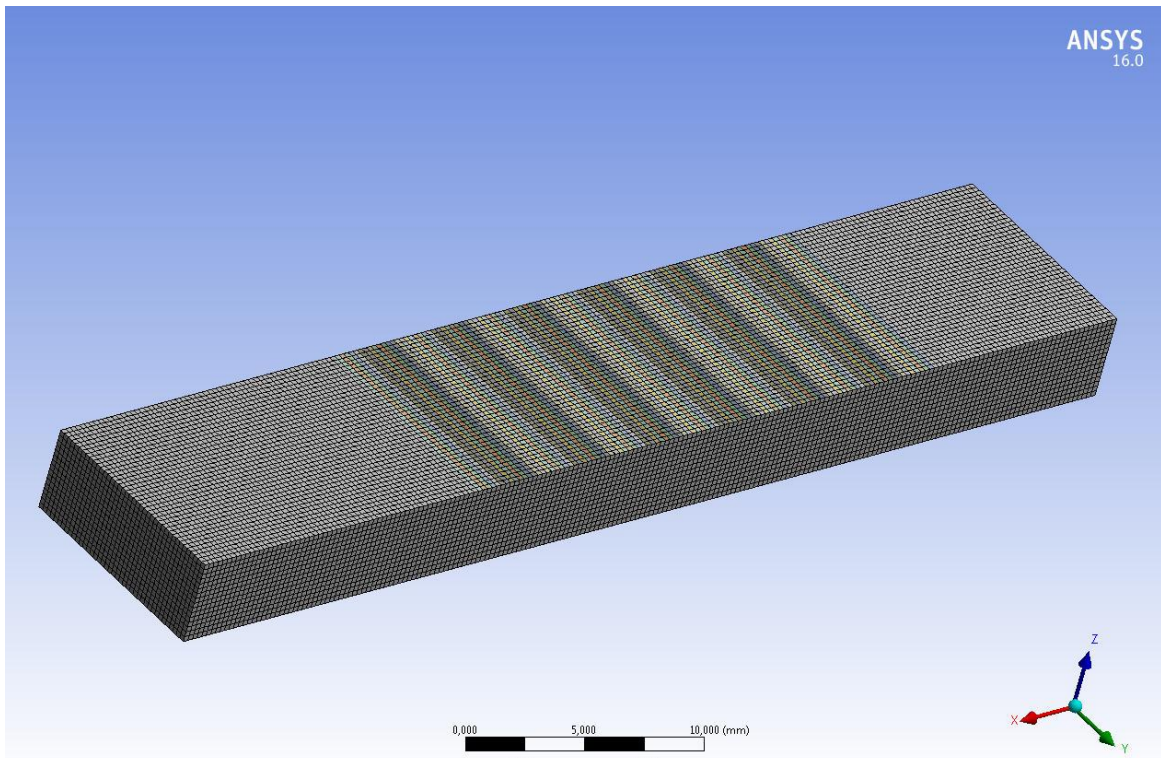
Τα βήματα που ακολουθήσαμε για το προσδιορισμό της θερμοκρασιακής κατανομής στα τεμάχια ήταν:

- **Αρχικά ορίστηκαν οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών.** Τα στοιχεία για τα υλικά AISI O1 και AISI D2, έχουν δοθεί από την εταιρεία που μας τα προμήθευσε [πίνακας 7.1], και στο λογισμικό εισήχθησαν υπό την μορφή πινάκων. Για ιδιότητες οι οποίες δεν αναφέρονταν αναλυτικά στα στοιχεία της εταιρείας, αναζητήθηκαν κατάλληλοι πίνακες στην βιβλιογραφία. Στο ANSYS μας δίνεται η δυνατότητα τις ιδιότητες των υλικών να τις εισάγουμε συναρτήσει της θερμοκρασίας ($C_p(T)$, $\rho(T)$, $k(T)$), γεγονός που μας επιτρέπει να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα.
- **Ορισμός γεωμετρίας τεμαχίου.** Ορίσαμε τη γεωμετρία του προς μελέτη τεμαχίου. Σε αντιστοιχία με τα πειράματα που διεξήχθησαν, ορίσαμε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 50X10X4 mm. Το μήκος 50 mm κρίθηκε επαρκές καθώς η διαδικασία της λείανσης διακρίνεται σε 2 μεταβατικές φάσεις (αρχή και τέλος της κατεργασίας), και μια μόνιμη [σχήμα 7.4]. Με το να αυξάναμε περαιτέρω το μήκος του τεμαχίου θα είχαμε απλά επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα για τη μόνιμη κατάσταση της κατεργασίας, εις βάρος του υπολογιστικού χρόνου. Το ύψος του τεμαχίου ορίστηκε 4mm έπειτα από αρχικές δοκιμές οι οποίες έδειξαν ότι θερμοκρασιακά το τεμάχιο δεν επηρεάζεται σε βάθη μεγαλύτερα των 2mm. Στην επιφάνεια λείανσης ορίσαμε «στοιχειώδεις επιφάνειες» μήκους 0.25mm έκαστη, στις οποίες θα εφαρμόσουμε τις θερμικές ροές (όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο). Ορίστηκαν 100 «στοιχειώδεις επιφάνειες», με συνολικό μήκος υπερδιπλάσιο του μήκους επαφής της κατεργασίας.

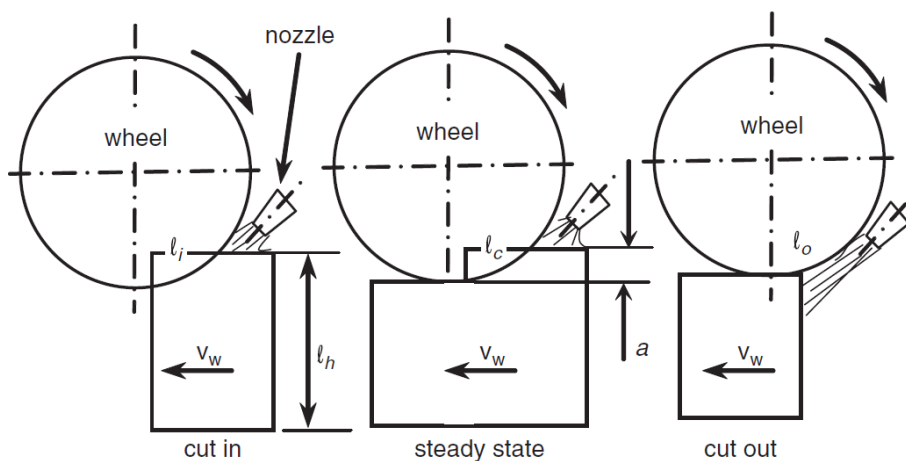


Τεμάχιο [Σχήμα 7.2]

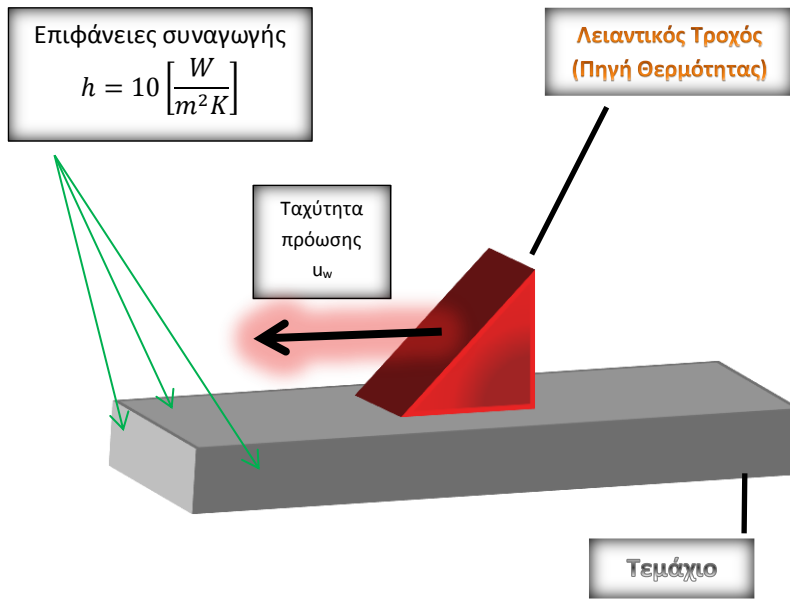
- Ορισμός του πλέγματος.** Χρησιμοποιήσαμε τρισδιάστατο κυβικό πλέγμα με ακμή 0.25mm. Η συγκεκριμένη διακριτοποίηση επιλέχθηκε έπειτα από δοκιμές προκειμένου να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια, σε συνδυασμό πάντα με το κόστος σε υπολογιστικό χρόνο και τις δυνατότητες υπολογιστικής ισχύος, ενώ είναι σύμφωνη και με τη διατριβή του Σαλωνίτη ο οποίος χρησιμοποιεί πλέγμα ελάχιστου μήκους 0.25mm. Ένα σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι η προσοχή ώστε το πλέγμα να είναι κοινό – ενιαίο στο σύνολο του τεμαχίου και των «στοιχειωδών επιφανειών».



Διακριτοποίηση τεμαχίου [Σχήμα 7.3]



Οι τρεις φάσεις της κατεργασίας (αρχή της λείανσης, μόνιμη κατάσταση, πέρασ κατεργασίας). Η προσοχή μας εστιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία στη μόνιμη κατάσταση κατεργασίας (steady state όπως φαίνεται και στο σχήμα [Σχήμα 7.4]



Γραφική παρουσίαση του μοντέλου που «εισάγαμε» στο ANSYS με τις οριακές συνθήκες συναγωγής προς το περιβάλλον για τις «ελεύθερες» επιφάνειες του τεμαχίου
[Σχήμα 7.5]

- Ορισμός των θερμικών ροών.** Όπως προαναφέρθηκε σε κάθε «στοιχειώδη επιφάνεια» αντιστοιχίστηκε μια θερμική ροή η οποία ενεργοποιείται σε δεδομένη χρονική στιγμή, με συγκεκριμένο προφίλ (τριγωνικό) και διάρκεια. Για τις συνθήκες κατεργασίας προκύπτουν εννέα διαφορετικά χρονικά προφίλ τα οποία, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, υπολογίστηκαν για να εισαχθούν υπό μορφή πίνακα στο ANSYS. Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα δεδομένα μας.

# προσομοίωσης	ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΙΑΔΟΧΙΚΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ (t_{step}) [sec]	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΗΓΗΣ [sec]	Q_{max} [$\frac{W}{mm^2}$]	Q'_{max} [$\frac{W}{mm^2}$]
1/19	0,00128	0,0487	153	151,0
2/20	0,00089	0,0337	203	200,3
3/21	0,00066	0,0252	258	254,6
4/22	0,00128	0,0562	140	138,4
5/23	0,00089	0,0389	184	181,9
6/24	0,00066	0,0291	234	231,3
7/25	0,00128	0,0628	129	127,7
8/26	0,00089	0,0435	169	167,3
9/27	0,00066	0,0325	212	209,8

Δεδομένα με βάση τα οποία ορίστηκαν οι θερμικές ροές
[Πίνακας 7.2]

Η τιμή Q'_{max} αποτελεί «διόρθωση» της τιμής Q_{max} η οποία (όπως παραπάνω αναφέραμε) ισούται με $Q_{max} = 2 * q_w$. Στη διόρθωση αυτή, λαμβάνουμε υπ' όψιν ότι το υπολογιστικό πακέτο «θεωρεί» μια τιμή θερμικής ροής σε κάθε χρονικό βήμα. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού βήματος, σε αντίθεση με την «ιδανική μοντελοποίηση» όπου δεδομένου του τριγωνικού χρονικού προφίλ της ροής, αυτή μειώνεται γραμμικά συναρτήσει του χρόνου. Προκειμένου τελικά στο τεμάχιο να προσδώσουμε την υπολογισμένη από τις αναλυτικές σχέσεις θερμότητα, και όχι επαυξημένη με το «σφάλμα» της μίας τιμής ανά χρονικό βήμα, μειώνουμε την Q_{max} κατάλληλα, ανάλογα με το μήκος επαφής και τη διακριτοποίηση που έχουμε κάνει.

Άρα:

$$Q'_{max} = Q_{max} - \frac{1}{2} * \frac{Q_{max}}{\frac{l_c}{0.25}} = 2 * q_w - \frac{1}{2} * \frac{2 * q_w}{\frac{l_c}{0.25}} \left[\frac{W}{mm^2} \right]$$

Τέλος ορίσαμε συναγωγή με το εξωτερικό περιβάλλον των ελεύθερων επιφανειών του τεμαχίου. Ως *heat transfer coefficient* προς το περιβάλλον ορίστηκε $h = 10 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, όμοια με το αναλυτικό μοντέλο.

Αρχική θερμοκρασία τεμαχίου και θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίσαμε 22 °C.

- **Ορισμός χρονικού βήματος.** Ορίσαμε χρονικά βήματα υπολογισμού των θερμοκρασιών, το χρονικό διάστημα που χρειάζεται σημείο της πηγής για να «διανύσει» μια «στοιχειώδη επιφάνεια».

$$t_{step} = \frac{0.25}{u_w} [sec]$$

Στον πίνακα 7.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ANSYS.

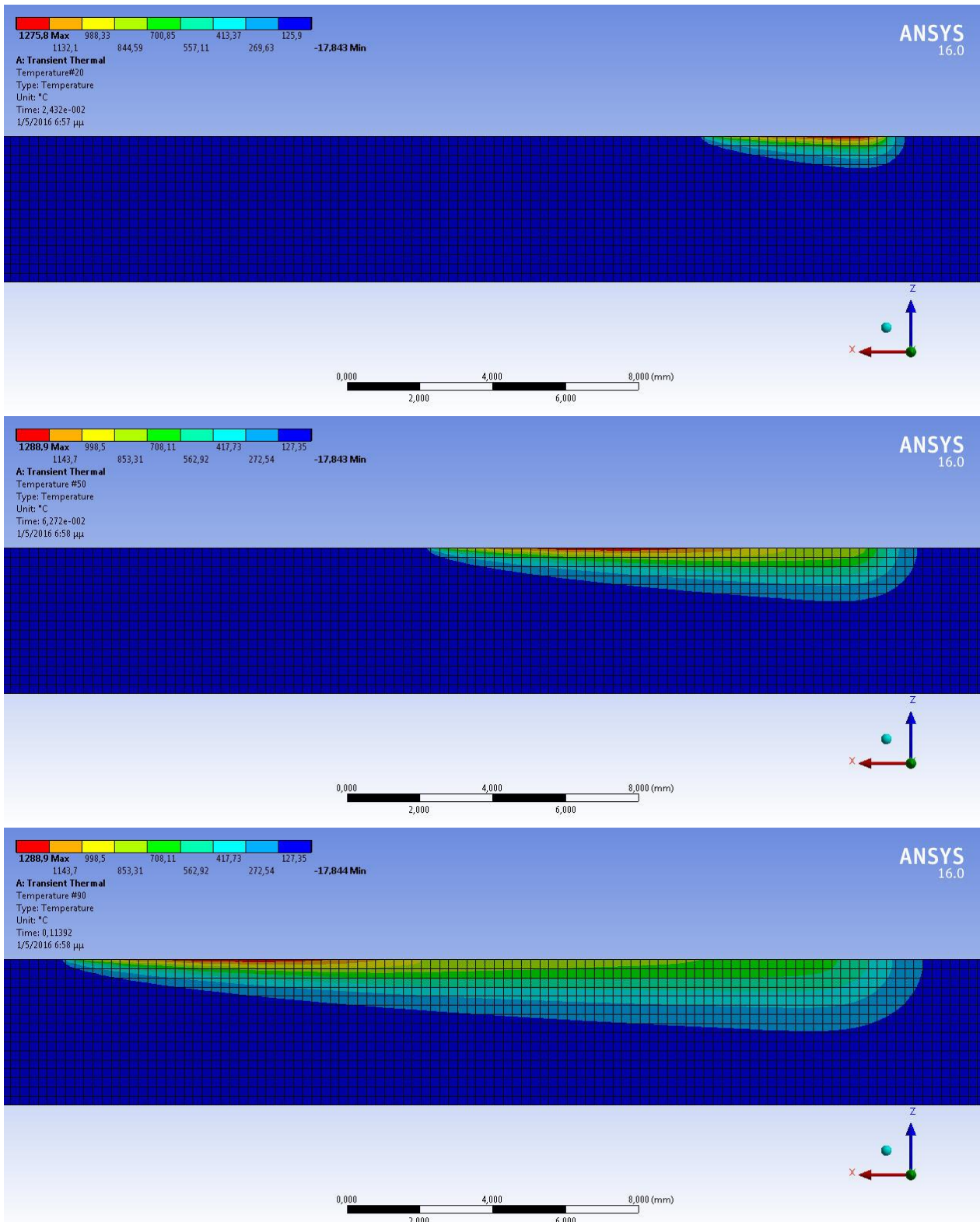
ΥΛΙΚΟ	#	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	l_c [mm]	$\frac{q_w}{w}$ [$\frac{mm}{mm^2}$]	Μέγιστη Θερμοκρασία ημιεμπειρικής σχέσης [°C]	Μέγιστη Θερμοκρασία αναλυτικής λύσης [°C]	Μέγιστη Θερμοκρασία ANSYS [°C]	Διαφορά Αναλυτικής λύσης - ANSYS [%]	
AISI O1	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	1	0,3	0,195	9,49	76,30	1305	1310	1289	1,6%
		2	0,3	0,2815	9,49	101,28	1442	1447	1422	1,8%
		3	0,3	0,3765	9,49	128,93	1587	1593	1599	0,4%
		4	0,4	0,195	10,95	70,06	1288	1292	1254	3,0%
		5	0,4	0,2815	10,95	92,23	1411	1416	1389	1,9%
		6	0,4	0,3765	10,95	116,79	1545	1550	1525	1,7%
		7	0,5	0,195	12,25	64,56	1255	1259	1223	3,0%
		8	0,5	0,2815	12,25	84,26	1363	1368	1335	2,5%
		9	0,5	0,3765	12,25	106,09	1484	1489	1462	1,8%
AISI D2	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	19	0,3	0,195	9,49	76,43	1498	1503	1479	1,6%
		20	0,3	0,2815	9,49	101,59	1657	1663	1630	2,0%
		21	0,3	0,3765	9,49	129,43	1825	1832	1820	0,6%
		22	0,4	0,195	10,95	70,29	1480	1485	1464	1,5%
		23	0,4	0,2815	10,95	92,68	1624	1630	1605	1,6%
		24	0,4	0,3765	10,95	117,46	1780	1786	1755	1,8%
		25	0,5	0,195	12,25	64,88	1444	1450	1416	2,4%
		26	0,5	0,2815	12,25	84,82	1572	1577	1536	2,7%
		27	0,5	0,3765	12,25	106,91	1713	1719	1700	1,1%

Αποτελέσματα από προσομοίωση σε ANSYS [Πίνακας 7.3]

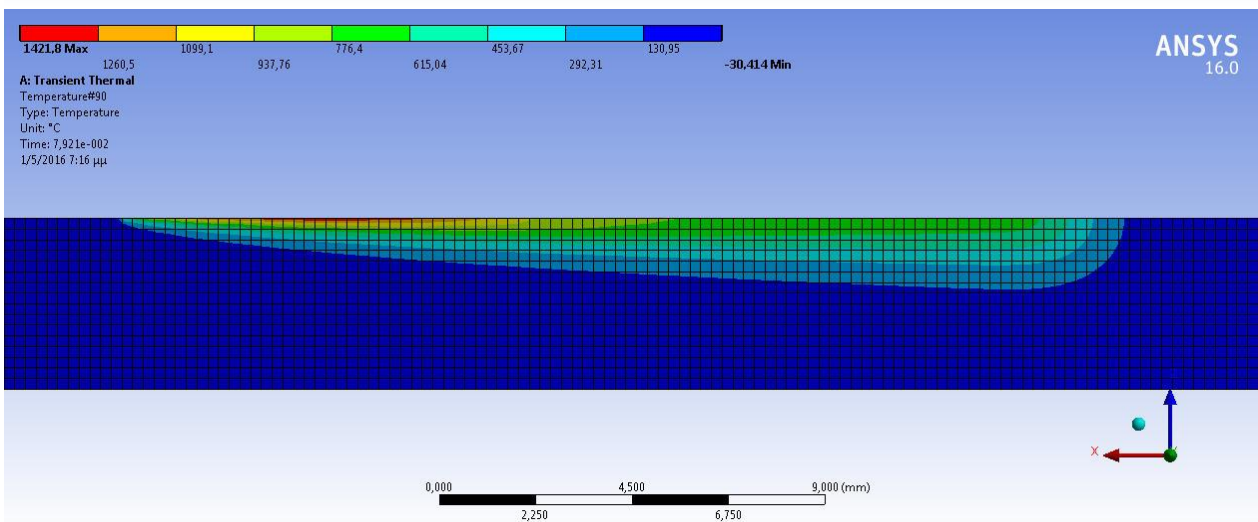
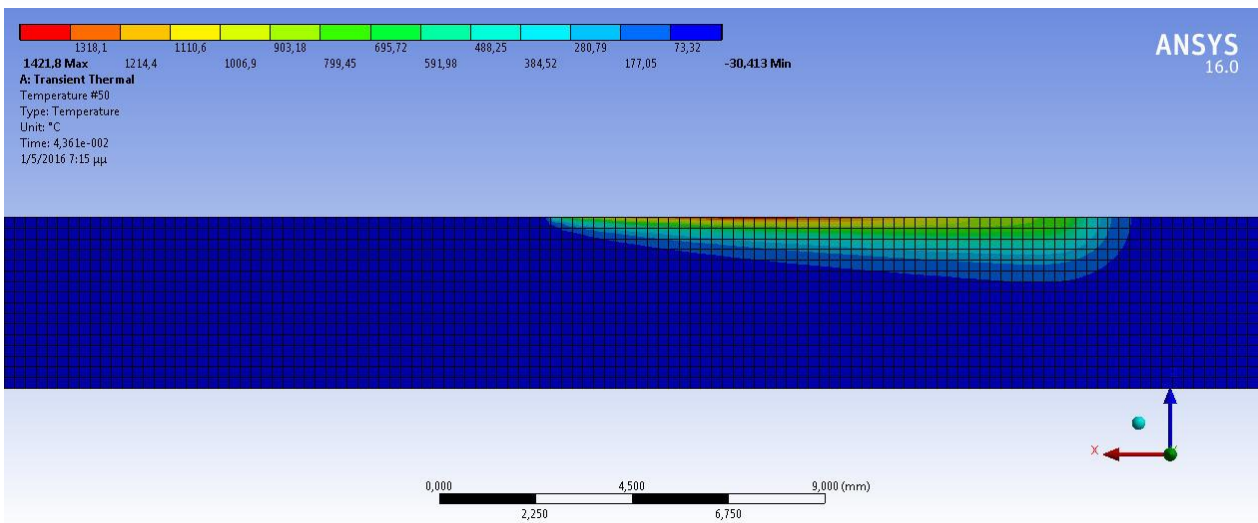
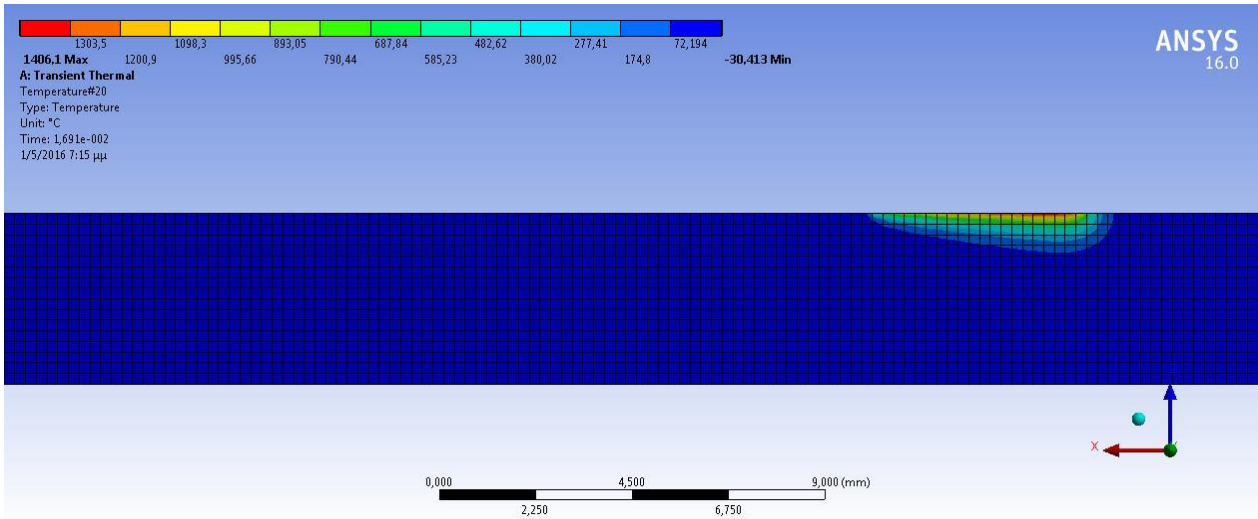
Παρατηρήσεις:

- Τα αποτελέσματα των διαφορετικών μεθόδων επίλυσης είναι εξαιρετικά συναφή, έχοντας μέγιστη απόκλιση 3%. Το γεγονός αυτό κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικό, και ενισχύει την θέση μας σχετικά με την ορθή μοντελοποίηση της κατεργασίας, και εν συνεχεία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που την διέπουν .
- Σε πλήρη αντιστοιχία με το αναλυτικό μοντέλο, στο υλικό AISI D2 παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το υλικό AISI O1, για τους λόγους που έχουν αναλυθεί στην Ενότητα 6.
- Στο ANSYS προσομοιώσαμε αποκλειστικά τις κατεργασίες αντίρροπης λείανσης. Όπως έχει προαναφερθεί (ενότητα 6), ο διαχωρισμός ανάμεσα σε ομόρροπη και αντίρροπη λείανση δεν παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον σε σχέση με την κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης, και προς ορθολογική οικονομία υπολογιστικού χρόνου επιλέχθηκε να μελετηθεί η αντίρροπη μόνο λείανση.

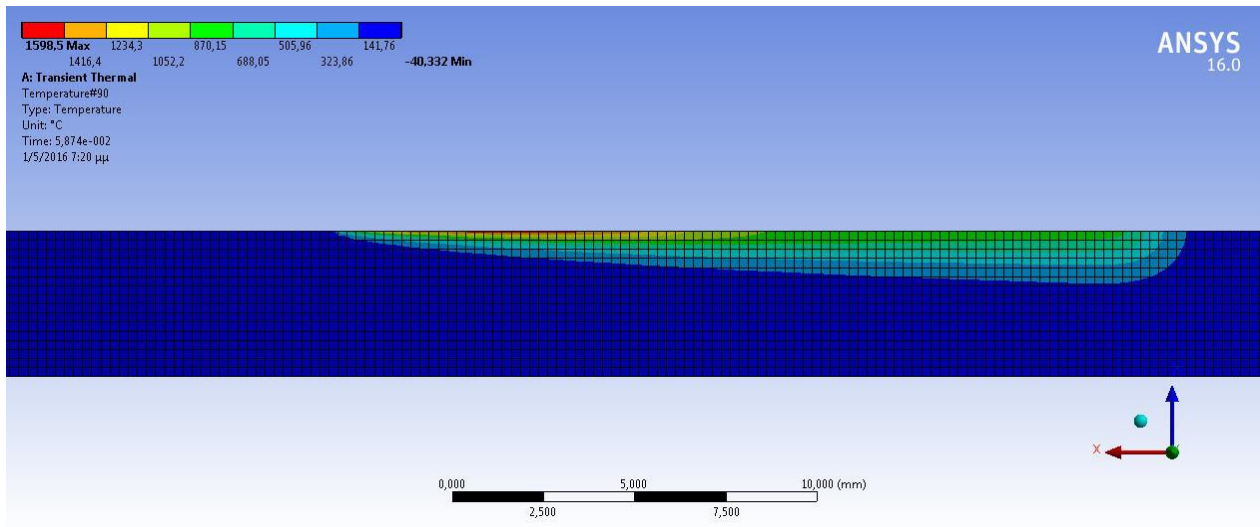
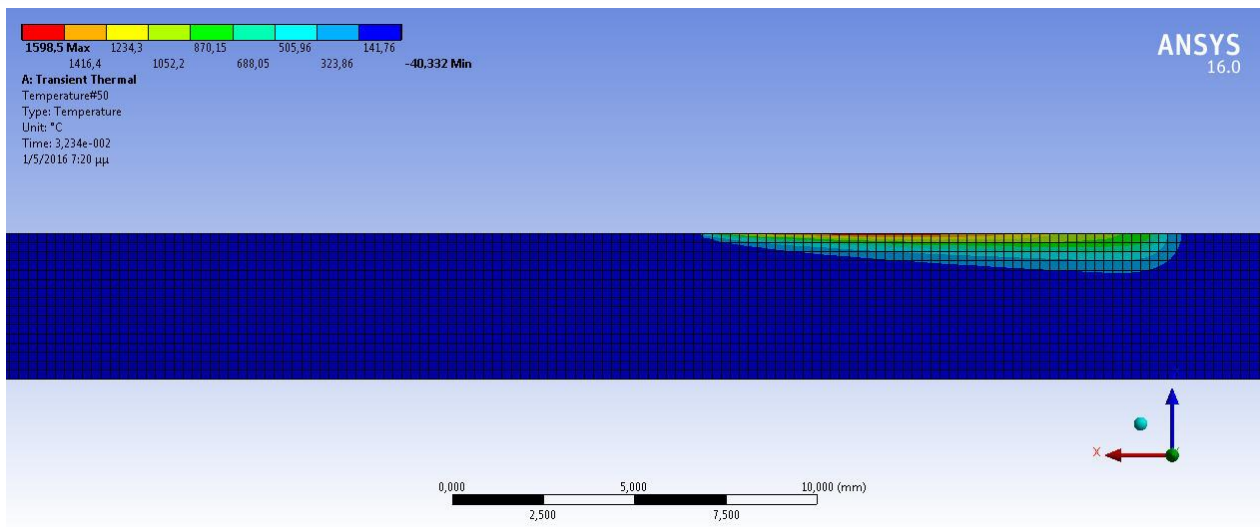
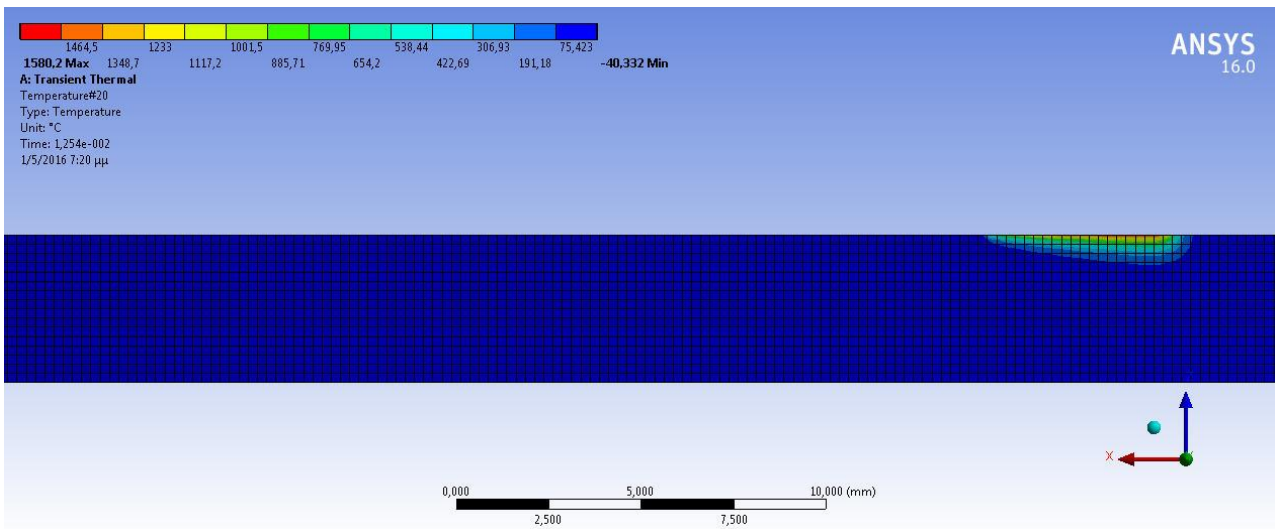
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ορισμένα χαρακτηριστικά «frames» από την προσομοίωση στο ANSYS.



Θερμικό προφίλ τεμαχίου υλικού AISI 01 όταν ενεργοποιείται ο 20^{ος}, 50^{ος}, 90^{ος} κόμβος αντίστοιχα. Παράμετροι κατεργασίας $u_e = 0.195 \left[\frac{m}{sec} \right]$, $a_e = 0.3 [mm]$
[Σχήμα 7.6]



Θερμικό προφίλ τεμαχίου υλικού AISI O1 όταν ενεργοποιείται ο 20^{ος}, 50^{ος}, 90^{ος} κόμβος αντίστοιχα. Παράμετροι κατεργασίας $u_e = 0.2815 \left[\frac{m}{sec} \right]$, $a_e = 0.3 [mm]$
[Σχήμα 7.7]

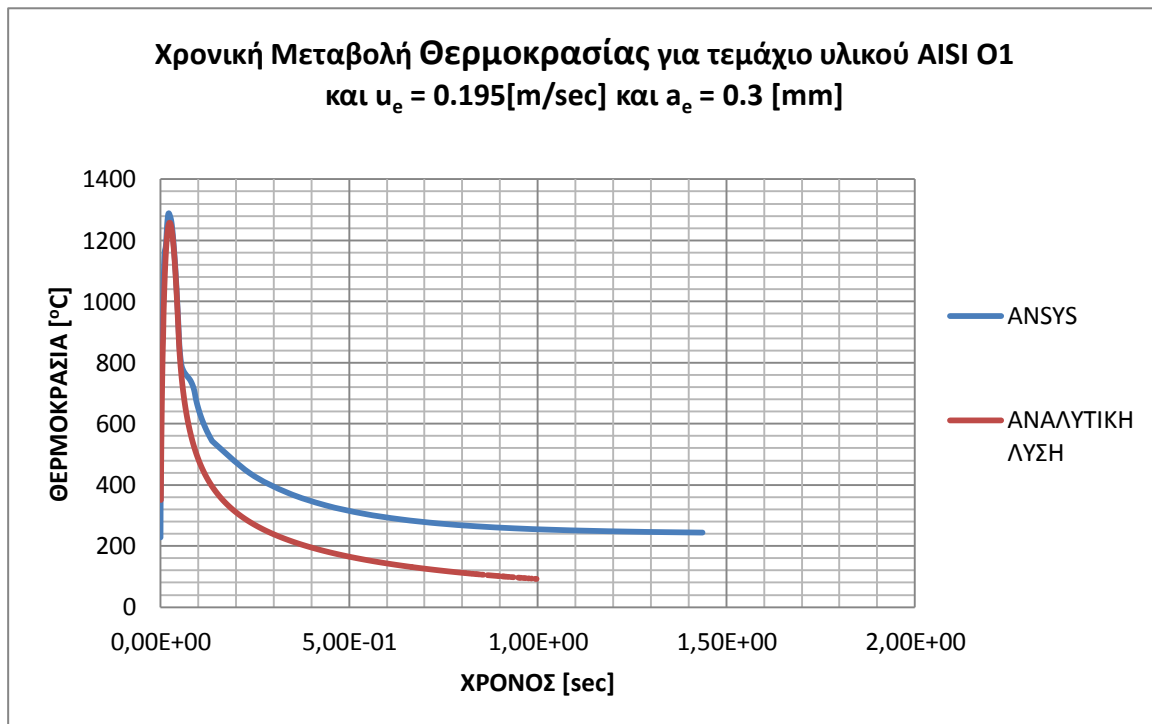


Θερμικό προφίλ τεμαχίου υλικού AISI 01 όταν ενεργοποιείται ο 20^{ος}, 50^{ος}, 90^{ος} κόμβος αντίστοιχα. Παράμετροι κατεργασίας $u_e = 0.3765 \left[\frac{m}{sec} \right]$, $a_e = 0.3 [mm]$
[Σχήμα 7.8]

Παρατηρώντας τις προηγούμενες εικόνες μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τη λογική υπόθεση ότι αυξάνοντας την ταχύτητα πρόωσης του τεμαχίου, το θερμοκρασιακό προφίλ γίνεται αναλογικά πιο «μακρόστενο» λόγω μείωσης του χρόνου επενέργειας της θερμικής πηγής. Το γεγονός αυτό επηρεάζει το βάθος σκλήρυνσης (θα αναφερθούμε σε επόμενη ενότητα), σε άμεση όμως αλληλεπίδραση με την θερμική ροή προς το τεμάχιο, η οποία αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης.

Στο παρακάτω διάγραμμα [Σχήμα 7.9] παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή μεταβολή σε ένα σημείο τεμαχίου, όπως υπολογίζεται από το αναλυτικό μοντέλο και από το ANSYS για τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας ($u_e = 0.195$ [m/sec] και $a_e = 0.3$ [mm]).

Παρατηρούμε μια διαφοροποίηση από ένα χρονικό σημείο και έπειτα λόγω του ότι το αναλυτικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπ όψιν την λανθάνουσα θερμότητα (έχει προαναφερθεί στις παραδοχές του αναλυτικού μοντέλου). Πρακτικά έχουμε μια πιο αργή ψύξη του τεμαχίου, η οποία όμως δεν επηρεάζει ποιοτικά τα αποτελέσματά μας και την αξιοπιστία των συμπερασμάτων, καθώς οι κρίσιμες τιμές ψύξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις συγκεκριμένες (θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα [Ενότητα 9]).



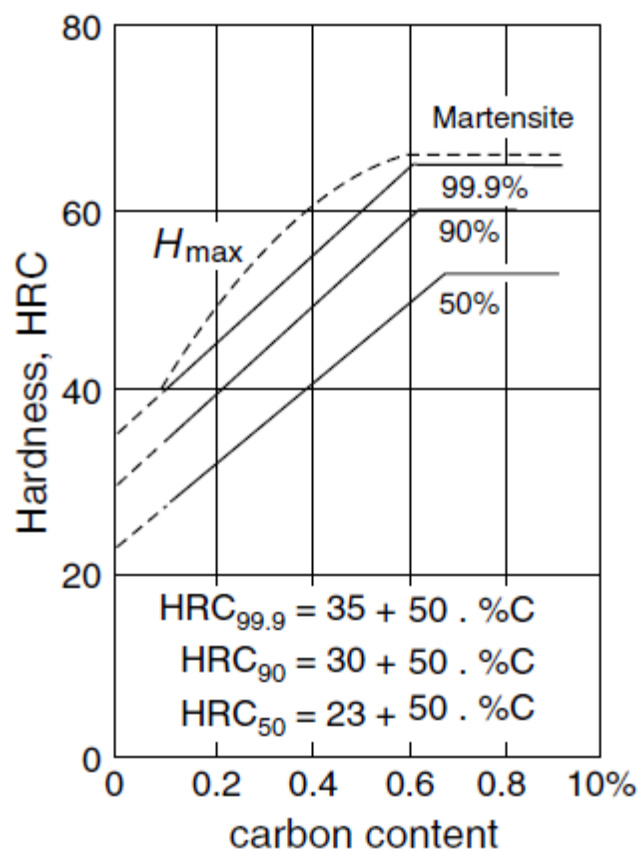
Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας [Σχήμα 7.9]

Υπολογισμός Σκληρότητας και Βάθους Σκλήρυνσης [Ενότητα 8]

Ικανότητα Σκλήρυνσης (Hardenability)

Με τον όρο «ικανότητα σκλήρυνσης» (hardenability) ορίζουμε την ικανότητα – δυνατότητα ενός σιδηρούχου υλικού να αποκτήσει σκληρότητα, έπειτα από την ωστενιτοποίηση και τη βαφή του. Ο παραπάνω ορισμός εμπεριέχει δυο παραμέτρους, την ικανότητα του υλικού να επιτύχει ένα συγκεκριμένο επίπεδο σκληρότητας, και την κατανομή που αυτή έχει στην εκάστοτε διατομή του τεμαχίου.

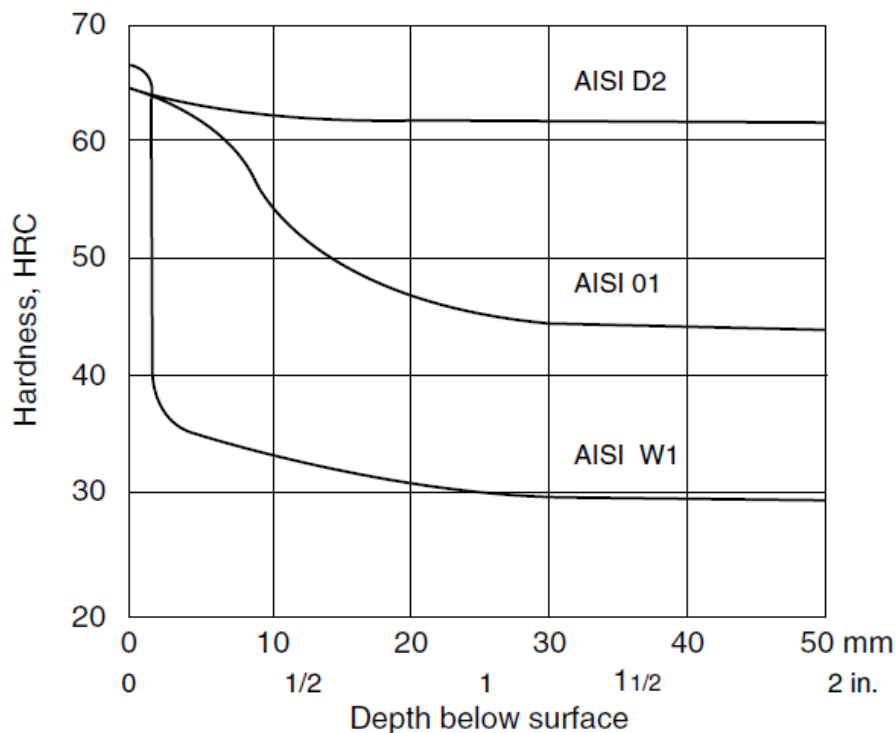
Το επίπεδο σκληρότητας που μπορούμε να επιτύχουμε συνδέεται άμεσα με τη μέγιστη σκληρότητα που μπορεί να αποκτήσει το υλικό αυτό. Η μέγιστη αυτή σκληρότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα του υλικού σε άνθρακα, και πιο συγκεκριμένα μάλιστα από την ποσότητα άνθρακα που βρίσκεται «διαλυμένος» στον ωστενίτη, αφού έχουμε περάσει τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, καθώς μόνο αυτό το ποσοστό συμμετέχει και επηρεάζει το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό [Σχήμα 8.1].



Διάγραμμα προσεγγιστικής συσχέτισης του ποσοστού άνθρακα με τη σκληρότητα (HRC) για διαφορετικά ποσοστά μαρτενσίτη (G. Spur (Ed.), Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/2, Wärmebehandeln, Carl Hanser, Munich, 1987, p. 1012.) [Σχήμα 8.1]

Η κατανομή της σκληρότητας στην διατομή ενός τεμαχίου ορίζεται ως η διαφοροποίηση της σκληρότητας από την επιφάνεια προς τον «πυρήνα», μετά τη βαφή του και υπό ορισμένες συνθήκες. Εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα και τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία που βρίσκονται διαλυμένα στον ωστενίτη κατά τη ωστενιτοποίηση. Επίσης επηρεάζεται από το μέγεθος των κόκκων ωστενίτη (austenite grain size) [Σχήμα 8.2].

Ένα υλικό με «υψηλή δυνατότητα σκλήρυνσης» μπορεί να αποκτήσει υψηλή σκληρότητα, σε μεγάλο μέρος της διατομής του τεμαχίου, ακόμα και αν το υλικό βάφεται σε ηπιότερο μέσο (λάδι). Σε αντίθετη περίπτωση η σκληρότητα μειώνεται «απότομα» κάτω από την επιφάνεια, ακόμα και αν έχει γίνει βαφή του τεμαχίου σε νερό. Έτσι τα υλικά διαχωρίζονται σε αυτά που μπορούν να αποκτήσουν υψηλό βαθμό σκληρότητας για μικρότερα βάθη σκλήρυνσης (shallow hardening high carbon steels), και σε αυτά με χαμηλότερο βαθμό μέγιστης σκληρότητας αλλά ομοιόμορφα κατανεμημένο στη διατομή τους. Βέβαια αν και η μέγιστη σκληρότητα εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό, η κατανομή της στο τεμάχιο επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων.



Κατανομή σκληρότητας σε τρία διαφορετικά υλικά κυλινδρικής γεωμετρίας (D=100mm), με τον υλικό AISI W1 να έχει βαφεί σε νερό και τα AISI O1 και AISI D2 σε λάδι. [Σχήμα 8.2]

Βάθος σκλήρυνσης

Με τον όρο «βάθος σκλήρυνσης» ορίζουμε την απόσταση από την επιφάνεια στην οποία το υλικό μας έχει αποκτήσει μια συγκεκριμένη σκληρότητα μετά τη βαφή του (π.χ. 50HRC). Σε ορισμένες περιπτώσεις το όριο τίθεται και ως ποσοστό της επιφανειακής σκληρότητας. Ως αποτέλεσμα του ωστενιτικού – μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, το βάθος σκλήρυνσης εξαρτάται από:

- Το σχήμα και το μέγεθος της εγκάρσιας διατομής του τεμαχίου
- Την «ικανότητα σκλήρυνσης» του υλικού
- Τις συνθήκες βαφής του τεμαχίου (θερμοκρασία λουτρού, ύπαρξη ή μη ανάδευσης)

Το σχήμα της εγκάρσιας διατομής έχει αξιοσημείωτη επιρροή στην μετάδοση – αποβολή θερμότητας κατά τη διάρκεια της βαφής και επηρεάζει άμεσα το βάθος σκλήρυνσης. Σε ορθογωνικές γεωμετρίες έχουμε πάντα μικρότερα βάθη σκλήρυνσης συγκριτικά με τις κυλινδρικές. Επίσης το μέγεθος της διατομής επηρεάζει τη κατανομή σκληρότητας, με τις γεωμετρίες μεγάλου εμβαδού να επιτυγχάνουν χαμηλότερες τιμές σκληρότητας στο κέντρο τους.

Ικανότητα Σκλήρυνσης Επιφανειακών Στρωμάτων με Κατεργασίες Μικρής Διάρκειας

Όταν χρησιμοποιούμε κατεργασίες μικρής διάρκειας (short time / zero time) για επιφανειακή σκλήρυνση (με φλόγιστρα, με επαγωγή, με laser...), εξελίσσονται οι ίδιοι μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί με αυτούς των συμβατικών μεθόδων, με τη διαφορά ότι ο κύκλος θέρμανσης λαμβάνει χώρα σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος θέρμανσης είναι από μία έως τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερος και κυμαίνεται ποιοτικά από 100sec για κατεργασία με φλόγιστρο, 10sec για κατεργασία με επαγωγή και λιγότερο από 1sec για σκλήρυνση επιφανείας με χρήση laser. Ως αποτέλεσμα του περιορισμένου χρόνου είναι οι υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης (high heating rates). Τα προβλήματα που ανακύπτουν είναι:

- Ο μετασχηματισμός από το πλέγμα bcc της «α φάσης» σε fcc της «γ φάσης» δεν εξελίσσεται πλέον ανάμεσα στις θερμοκρασίες $A_{c_{1s}}$ και $A_{c_{1f}}$ όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια των συμβατικών κατεργασιών, λόγω του ότι οι υψηλοί ρυθμοί θέρμανσης δημιουργούν συστήματα εκτός ισορροπίας (non equilibrium systems). Οι θερμοκρασίες $A_{c_{1s}}$ και $A_{c_{1f}}$ «μετατοπίζονται» υψηλότερα. Ένα θερμοκρασιακό όριο μπορεί να είναι επαρκές για ωστενιτικό μετασχηματισμό με «αργές συνθήκες θέρμανσης» συμβατικής κατεργασίας, ενώ το ίδιο όριο να μην επαρκεί ούτε καν για την έναρξη ωστενιτοποίησης με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης. Ως αποτέλεσμα σε κατεργασίες με χρήση φλόγιστρου, επαγωγής ή laser χρησιμοποιούνται υψηλότερες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης για τα ίδια υλικά, σε σχέση με αυτές των συμβατικών μεθόδων.
- Στην σκλήρυνση με θερμική κατεργασία, ο ωστενίτης πρέπει να «διαλυθεί» στο υλικό και να κατανεμηθεί ομοιόμορφα ο άνθρακας που υπάρχει στα καρβίδια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ομογενοποίηση και είναι χρονικά εξαρτώμενη, ακόμα και για υψηλές θερμοκρασίες, όπως αυτές των μη συμβατικών μεθόδων. Σε υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης, ο χρόνος δεν επαρκεί για την διάχυση του άνθρακα, από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης (κοντά στα καρβίδια), προς αυτές με χαμηλή συγκέντρωση (περιοχές που έχουν σχηματιστεί από φερρίτη με απουσία άνθρακα). Η

διάχυση εξαρτάται από το «μήκος» της διαδρομής των ατόμων άνθρακα και άρα από την αρχική δομή του υλικού μας. Υλικά με μεγάλους κόκκους περλίτη, σφαιρικές δομές και κυρίως «κονδυλώδης χυτοσίδηρος» (nodular cast) με μεγάλη συγκέντρωση σε φερρίτη απουσία άνθρακα, αποτελούν μη προτεινόμενα υλικά για κατεργασίες με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης. Αντίθετα χάλυβες που έχουν υποστεί επαναφορά (tempered martensite) με ομοιόμορφη κατανομή των καρβιδίων, ενδείκνυνται για τέτοιου είδους κατεργασίες (Steel Heat Treatment Handbook, 2006).

Στον πίνακα που ακολουθεί [Σχήμα 8.3] παρουσιάζονται ενδεικτικά βάθη σκλήρυνσης, σκληρότητα και θερμοκρασίες, ανάλογα με την κατεργασία.

Process	Nature of case	Process temperature		Typical case depth	Case hardness, HRC	Typical base metals	Process characteristics
		°C	°F				
Carburizing							
Pack	Diffused carbon	815–1090	1500–2000	125 µm–1.5 mm (5–60 mils)	50–63(a)	Low-carbon steels, low-carbon alloy steel	Low equipment costs; difficult to control case depth accurately
Gas	Diffused carbon	815–980	1500–1800	75 µm–1.5 mm (3–60 mils)	50–63(a)	Low-carbon steels, low-carbon alloy steels	Good control of case depth; suitable for continuous operation; good gas controls required; can be dangerous
Liquid	Diffused carbon and possibly nitrogen	815–980	1500–1800	50 µm–1.5 mm (2–60 mils)	50–65(a)	Low-carbon steels, low-carbon alloy steels	Faster than pack and gas processes; can pose salt disposal problem; salt baths require frequent maintenance
Vacuum/LPC	Diffused carbon	815–1090	1500–2000	75 µm–1.5 mm (3–60 mils)	50–63(a)	Low-carbon steels, low-carbon alloy steels	Excellent process control; bright parts; faster than gas carburizing; high equipment costs
Nitriding							
Gas/LPN	Diffused nitrogen, nitrogen compounds	480–590	900–1100	125 µm–0.75 mm (5–30 mils)	50–70	Alloy steels, nitriding steels, stainless steels	Hardest cases from nitriding steels; quenching not required; low distortion; process is slow; is usually a batch process
Salt	Diffused nitrogen, nitrogen compounds	510–565	950–1050	2.5 µm–0.75 mm (0.1–30 mils)	50–70	Most ferrous metals including cast irons	Usually used for thin hard cases < 25 µm (1 mil); no continuous white layer; most are proprietary processes
Ion	Diffused nitrogen, nitrogen compounds	340–565	650–1050	75 µm–0.75 mm (3–30 mils)	50–70	Alloy steels, nitriding steels, stainless steels	Faster than gas nitriding; no white layer; high equipment costs; close case control
Carbonitriding							
Gas	Diffused carbon and nitrogen	760–870	1400–1600	75 µm–0.75 mm (3–30 mils)	50–65(a)	Low-carbon steels, low-carbon alloy steels, stainless steels	Lower temperature than carburizing (less distortion); slightly harder case than carburizing; gas control critical
Liquid (cyaniding)	Diffused carbon and nitrogen	760–870	1400–1600	2.5–125 µm (0.1–5 mils)	50–65(a)	Low-carbon steels	Good for thin cases on noncritical parts; batch process; salt disposal problems
Ferritic nitrocarburizing	Diffused carbon and nitrogen	565–675	1050–1250	2.5–25 µm (0.1–1 mil)	40–60(a)	Low-carbon steels	Low-distortion process for thin case on low-carbon steel; most processes are proprietary
Other							
Aluminizing (pack)	Diffused aluminum	870–980	1600–1800	25 µm–1 mm (1–40 mils)	< 20	Low-carbon steels	Diffused coating used for oxidation resistance at elevated temperatures
Siliconizing by chemical vapor deposition	Diffused silicon	925–1040	1700–1900	25 µm–1 mm (1–40 mils)	30–50	Low-carbon steels	For corrosion and wear resistance, atmosphere control is critical
Chromizing by chemical vapor deposition	Diffused chromium	980–1090	1800–2000	25–50 µm (1–2 mils)	Low-carbon steel, < 30; high-carbon steel, 50–60 > 70(a)	High- and low-carbon steels	Chromized low-carbon steels yield a low-cost stainless steel; high-carbon steels develop a hard corrosion-resistant case
Titanium carbide	Diffused carbon and titanium, TiC compound	900–1010	1650–1850	2.5–12.5 µm (0.1–0.5 mil)		Alloy steels, tool steels	Produces a thin carbide (TiC) case for resistance to wear; high temperature may cause distortion
Boriding	Diffused boron, boron compound	400–1150	750–2100	12.5–50 µm (0.5–2 mils)	40–> 70	Alloy steels, tool steels, cobalt and nickel alloys	Produces a hard compound layer; mostly applied over hardened tool steels; high process temperature can cause distortion

Τυπικές τιμές και χαρακτηριστικά θερμικών κατεργασιών
[Σχήμα 8.3]

Έλεγχος Μοντελοποίησης

Προκειμένου να επαληθεύσουμε την «ορθότητα» της μοντελοποίησης και επίλυσης της κατεργασίας, και κατ' επέκταση την δυνατότητα σωστής πρόβλεψης των αποτελεσμάτων της, επιλέξαμε από τη βιβλιογραφία μια πειραματική μελέτη, στα αποτελέσματα της οποίας πρέπει να καταλήξουμε με τη χρήση της μεθοδολογίας μας.

Η επιλεγθείσα δημοσίευση είναι η: “Experimental Study on Grinding Hardening of 1060 Steel” των ερευνητών: Liu Judong, Yuan Wei, Huang Songwei, Xu Zhilong. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διότι χρησιμοποιούνται δοκίμια ορθογωνικής γεωμετρίας, ανάλογα με αυτά που έχουν μελετηθεί, ενώ ταυτόχρονα μας παρέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες – συνθήκες κατεργασίας που απαιτούνται για την μοντελοποίηση.

Συνθήκες κατεργασίας:

Λειαντικός τροχός	WA46L8V P350X40X127
Ταχύτητα λειαντικού τροχού [m/sec]	26.3
Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίων [m/sec]	0.008
Βάθη κοπής [mm]	0.2 / 0.3 / 0.4 / 0.5
Μέθοδος λείανσης	Up Grinding
Χρήση υγρού κοπής	--
Υλικό τεμαχίου	1060 Steel

Συνθήκες κατεργασίας [Πίνακας 8.1]

Ιδιότητες Υλικού 1060 Steel:

Θερμοκρασία τήξεως [C]	Πυκνότητα [kg/mm ³]	Θερμοχωρητικότητα [J/kg*K]	Θερμική αγωγιμότητα [W/mm*C]
1510	0.00000785	650	0.0498

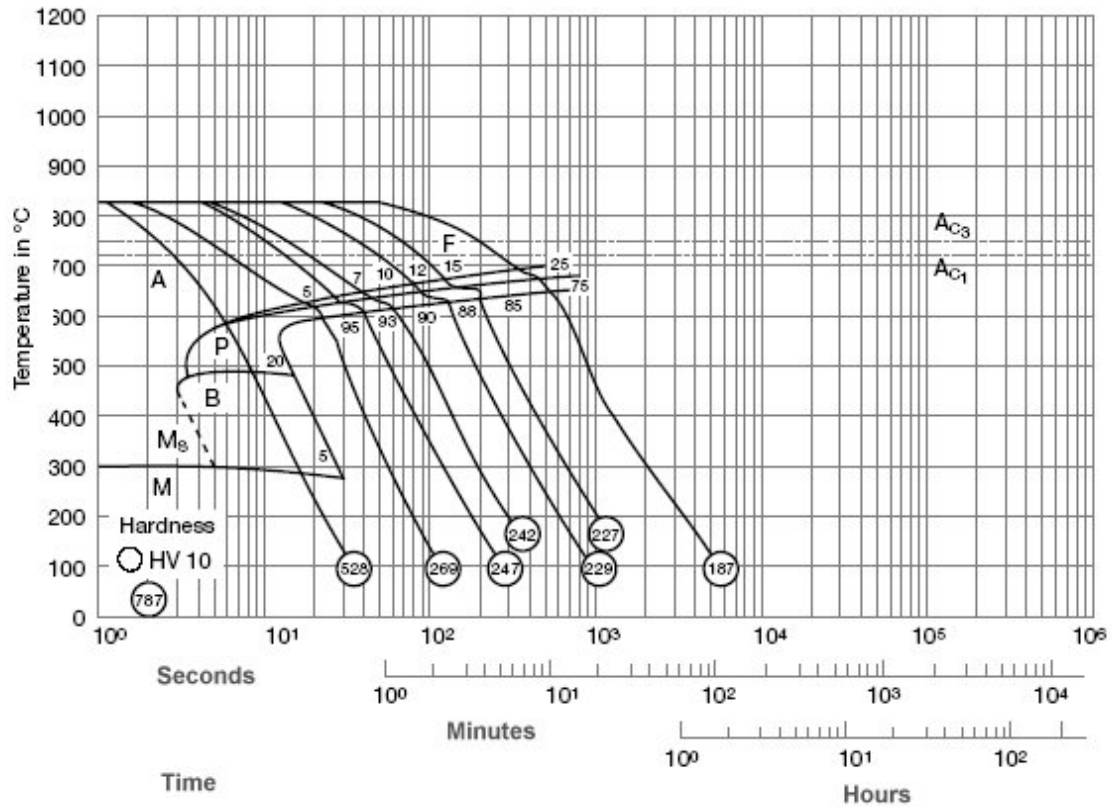
Ιδιότητες υλικού 1060 Steel [Πίνακας 8.2]

Την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης την οποία χρησιμοποιήσαμε ως «όριο» για τον υπολογισμό του βάθους σκλήρυνσης, μετά τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού προφίλ στα τεμάχια, την βρίσκουμε από το διάγραμμα CTT του υλικού 1060 Steel [Σχήμα 8.4]. Όπως αναφέρεται και στη δημοσίευση από τους ερευνητές, στο τεμάχιο παρατηρείται μια «περιοχή» πλήρους μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, ενώ ακολουθεί μια «μεταβατική ζώνη» όπου έχουμε μερικό μαρτενσιτικό μετασχηματισμό [Σχήμα 8.5b]. Οι υπολογισμοί μας εστιάζονται στον υπολογισμό του πάχους της «ζώνης» πλήρους μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η θερμοκρασία που χρησιμοποιούμε είναι η θερμοκρασία A_{c3} .

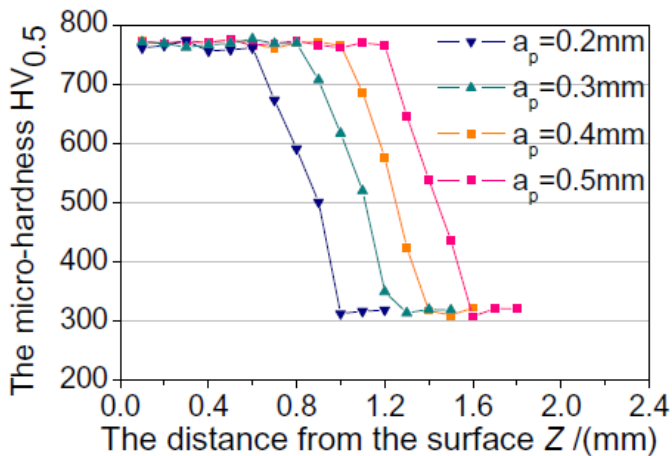
Η θερμοκρασία που θέσαμε ως όριο είναι η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης : $T_{lim}=750\text{ }^{\circ}\text{C}$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται από τους ερευνητές υπό μορφή διαγραμμάτων [Σχήμα 8.5], και χρησιμοποιήθηκε Plot Digitizer προκειμένου να έχουμε κατά το δυνατόν πιο ακριβή προς σύγκριση δεδομένα.

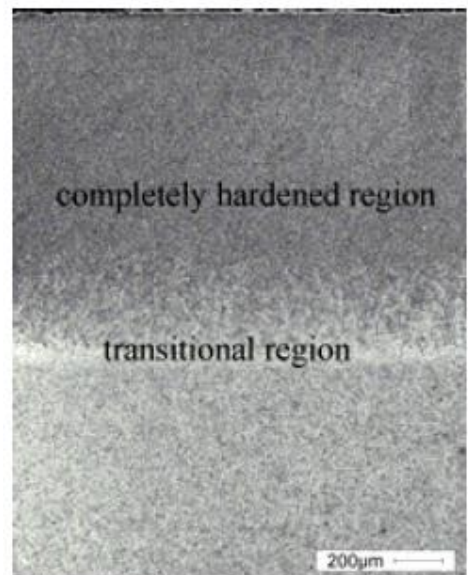
Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram



Διάγραμμα CCT για 1060 Steel [Σχήμα 8.4]



Αποτελέσματα πειραμάτων όπως παρουσιάζονται στη δημοσιευμένη εργασία [Σχήμα 8.5a]



Διαφορετικές «ζώνες σκληρότητας» στο τεμάχιο, όπως παρατηρούνται στο μικροσκόπιο [Σχήμα 8.5b]

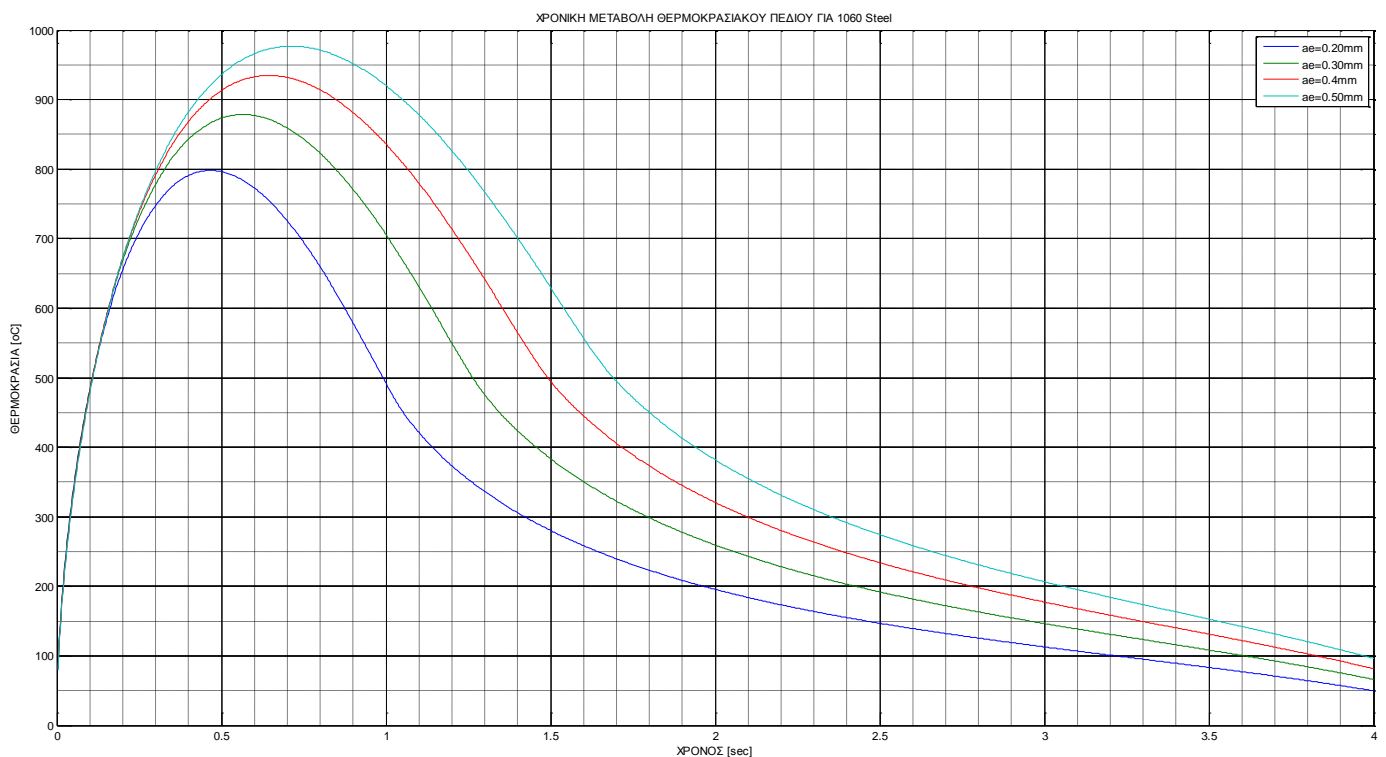
Τα αποτελέσματα είναι:

Βάθος Κοπής [mm]	Βάθος Σκλήρυνσης Πειραμάτων (Liu et al.) [mm]	Βάθος Σκλήρυνσης που Υπολογίστηκε με τη Μεθοδολογία μας [mm]	Απόκλιση [%]
0.2	0.60	0.570	5.53%
0.3	0.81	0.860	6.60%
0.4	1.01	1.070	5.92%
0.5	1.21	1.240	2.18%

Αποτελέσματα υπολογισμών για συνθήκες όμοιες με το πείραμα του Liu και σύγκριση αποτελεσμάτων μας με αυτά του ερευνητή [Πίνακας 8.3]

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι άκρως ικανοποιητικά, δεδομένου και των ιδιομορφιών – ιδιαιτεροτήτων τις οποίες δεν μπορούσαμε να γνωρίζουμε και άρα να συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς μας. Έχουμε ίδια τάξη μεγέθους (από 0.6mm έως περίπου 1.3mm), και διαφοροποιούμαστε σε εκατοστά του χιλιοστού με μέγιστη απόκλιση μικρότερη από 60 μm.

Η μέγιστη σκληρότητα τεμαχίου υπολογίζεται από τη σκληρότητα του μαρτενσίτη που σχηματίζεται. Οι καμπύλες ψύξης των τεμαχίων [Σχήμα 8.6], μας δείχνουν ότι η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τη θερμοκρασία ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_f σε λιγότερο από 4sec. Ανατρέχοντας στο διάγραμμα CCT του υλικού μας [Σχήμα 8.4] βλέπουμε ότι σχηματίζεται μαρτενσίτης σκληρότητας 780 HV. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται απόλυτα από τα πειραματικά δεδομένα [Σχήμα 8.5a].



Χρονική μεταβολή μέγιστης θερμοκρασίας τεμαχίων. [Σχήμα 8.6]

Υπολογισμός Βάθους Σκλήρυνσης για τα υλικά AISI O1 & AISI D2 (HPD)

Ακολουθώντας την ίδια μέθοδο υπολογισμού του βάθους σκλήρυνσης (HPD), αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε την οριακή θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, η οποία και θα αποτελέσει το όριο για τον καθορισμό του «πάχους» υλικού που έχει υποστεί μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (και άρα έχει μεταβληθεί η σκληρότητά του).

Στις περιπτώσεις που μελετάμε υπάρχει μια ιδιομορφία στον καθορισμό της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης A_{c3} . Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι υπάρχει διαφοροποίηση της θερμοκρασίας A_{c3} ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης του υλικού. Οι καμπύλες CHT (Continuous Heating Transformation) παρουσιάζουν την μεταβολή της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης συναρτήσει του ρυθμού θέρμανσης. Οι καμπύλες αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης, οι οποίοι μπορούν να φτάσουν 10000 [$^{\circ}\text{C}/\text{sec}$] (ή και ακόμα υψηλότερα). Βλέπουμε (σύμφωνα με τα διαγράμματα CHT) ότι η θερμοκρασία A_{c3} σε κατεργασίες με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης, αυξάνει σημαντικά (έως και 120 $^{\circ}\text{C}$ σε ορισμένες περιπτώσεις) σε σχέση με τη θερμοκρασία A_{c3} που βρίσκουμε από τα διαγράμματα CCT. Τα διαγράμματα CHT δυστυχώς είναι εξαιρετικά περιορισμένα και για λίγα μόνο υλικά (κυρίως αυτά που χρησιμοποιούνται σε κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης με zero time κατεργασίες). Για τα υλικά που μελετάμε AISI O1 και AISI D2 δεν βρήκαμε στην βιβλιογραφία αντίστοιχα διαγράμματα. Προκειμένου να υπολογίσουμε όμως κατά το δυνατόν με ακρίβεια την θερμοκρασία A_{c3} , ακολουθήσαμε μια έμμεση μέθοδο – συλλογισμό.

Από βιβλιογραφικές αναφορές (Σχήμα 8.7, Σχήμα 8.8, Σχήμα 8.9, Σχήμα 8.10) βρήκαμε για χάλυβες διαφορετικής περιεκτικότητας άνθρακα τη μεταβολή της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης. Η διαφορά θερμοκρασίας για τους ρυθμούς θέρμανσης της κατεργασίας που μελετάμε κυμαίνεται από 50 – 120 $^{\circ}\text{C}$ ανάλογα με το ποσοστό άνθρακα. Με βάση τα δεδομένα της βιβλιογραφίας (και με χρήση plot digitizer για μεγαλύτερη ακρίβεια) καταλήξαμε στην υπόθεση ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης «κινούνται» (ποιοτικά τουλάχιστον) όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 8.11 (κόκκινη γραμμή). Αρχικά βρήκαμε τα διαγράμματα CHT για χάλυβες διαφορετικής περιεκτικότητας σε C, και με την υπόθεση ότι τα σημεία E' και G' (όπως φαίνεται στο [Σχήμα 8.11]) παραμένουν σταθερά, καταλήξαμε σε μία «λογική – αναμενόμενη» μορφή καμπύλης (κόκκινη γραμμή [Σχήμα 8.11]), και άρα στα υλικά μας η αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης είναι:

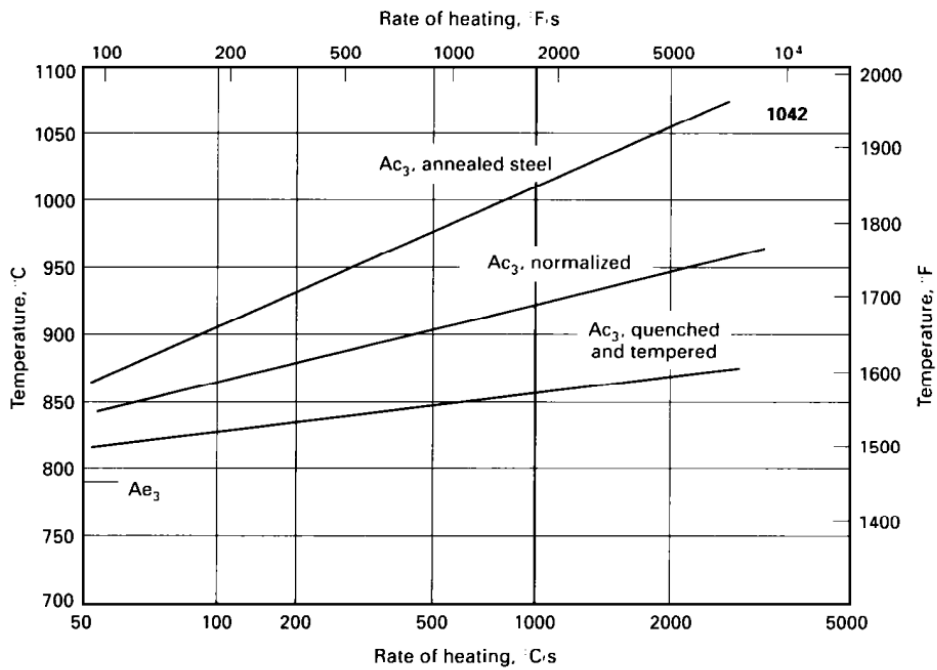
- AISI O1 (0.95% C)

$$A_{c3} \text{ από διάγραμμα CCT} = 790^{\circ}\text{C} \left. \vphantom{A_{c3}} \right\} A_{c3}^{\delta 1} = 890^{\circ}\text{C} \\ \Delta T = 100^{\circ}\text{C}$$

- AISI D2 (1.55% C)

$$A_{c3} \text{ από διάγραμμα CCT} = 880\% \left. \vphantom{A_{c3}} \right\} A_{c3}^{\delta 2} = 930^{\circ}\text{C} \\ \Delta T = 50^{\circ}\text{C}$$

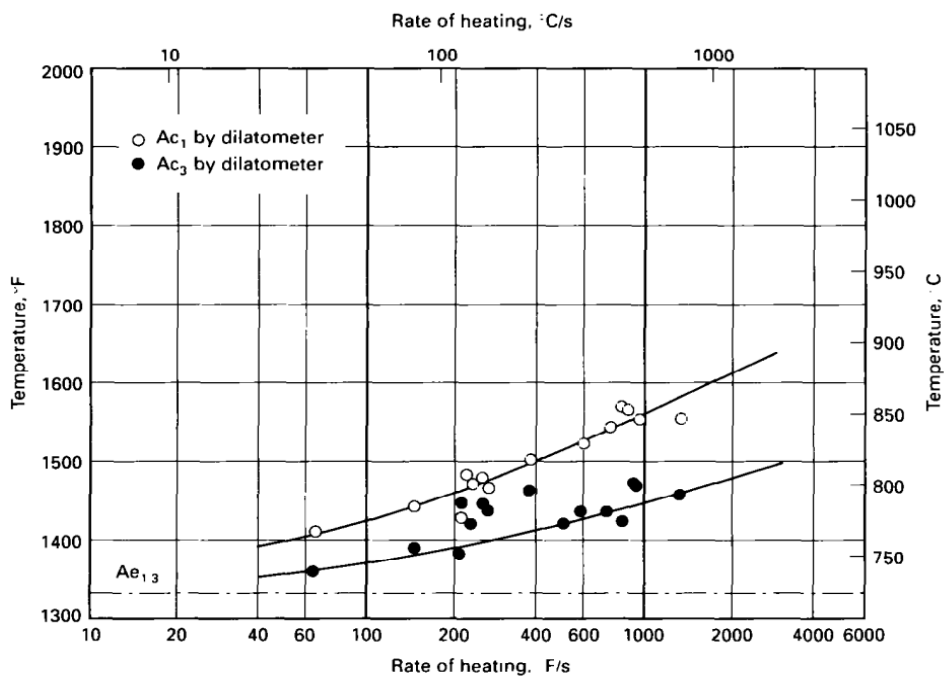
1042: Induction Process. Effect of prior structure and rate of heating on A_{c3} transformation temperature of 1042 steel



Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας A_{c3} συναρτήσεως του ρυθμού θέρμανσης για 1042 Steel
(Heat treater's guide: Practices and procedures for iron and steel (1995))

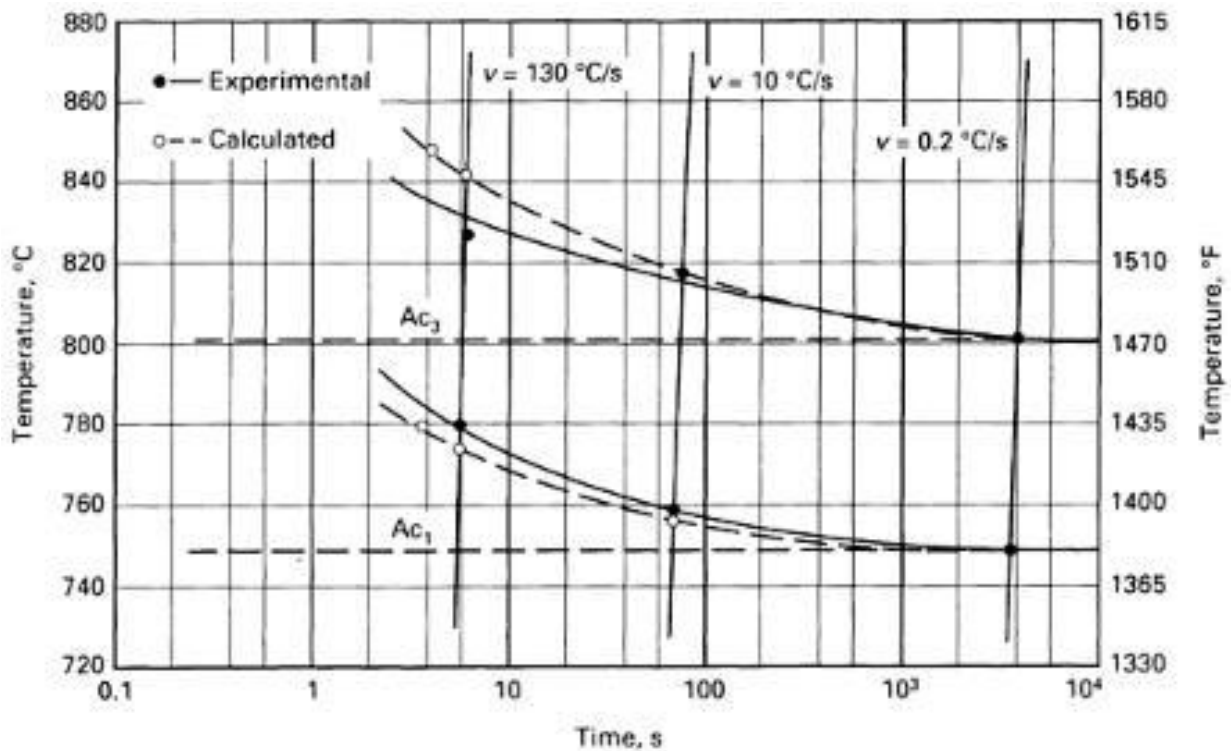
[Σχήμα 8.7]

1080: Induction Heating. Effect of heating rate on A_{c1} and A_{c3} temperatures for annealed 1080 steel

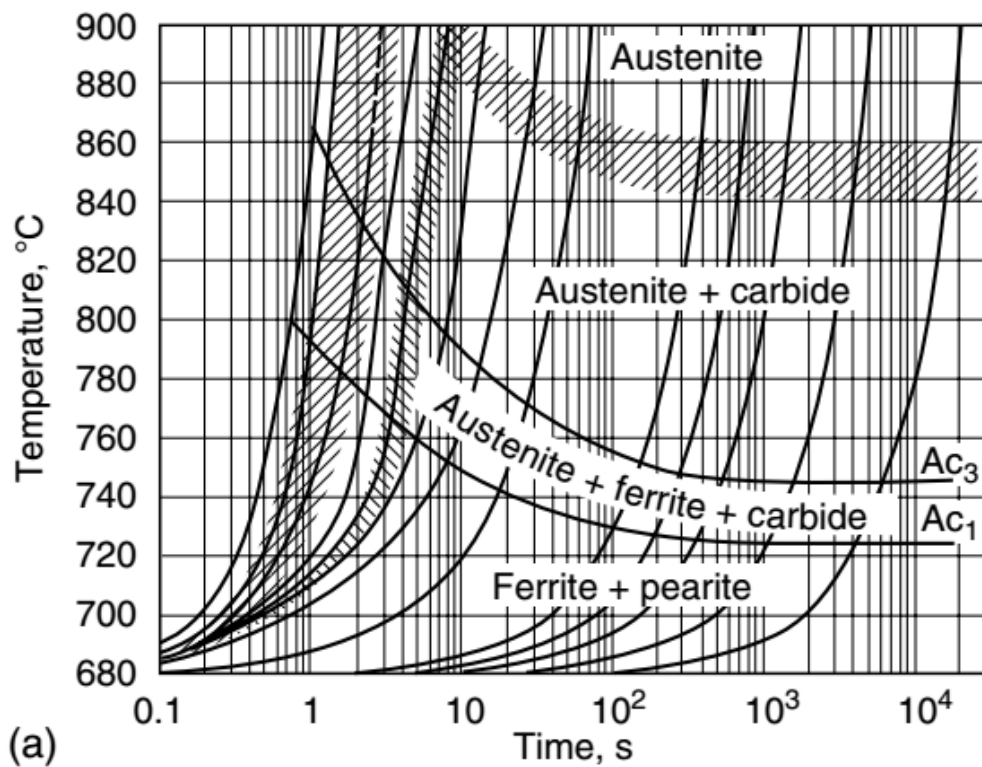


Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας A_{c1} , A_{c3} συναρτήσεως του ρυθμού θέρμανσης για 1080 Steel
(Heat treater's guide: Practices and procedures for iron and steel (1995))

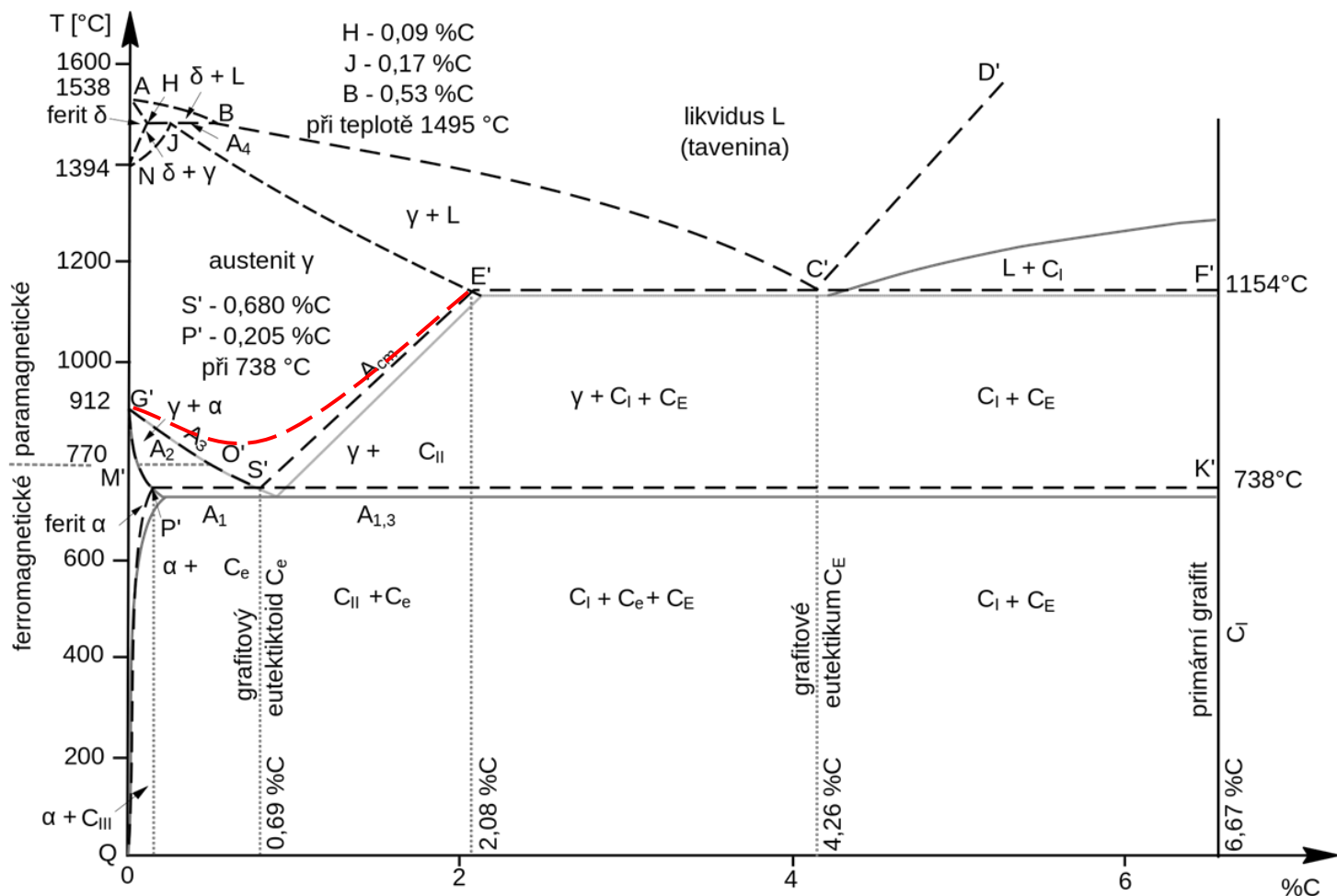
[Σχήμα 8.8]



Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας A_{c1} , A_{c3} συναρτήσει του ρυθμού θέρμανσης για AISI 4140
 (ASM Metal's Handbook Vol. 4 Heat Treating (1991))
 [Σχήμα 8.9]



Διάγραμμα CHT για διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης για χάλυβα περιεκτικότητας 0,7% C
 (Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies (2006))
 [Σχήμα 8.10]



Ποιοτική απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας A_{c3} σε διάγραμμα Fe - C [Σχήμα 8.11]

Με βάση αυτή τη μεθοδολογία, υπολογίστηκε το βάθος σκλήρυνσης στα υλικά AISI O1 και AISI D2 για όλες τις συνθήκες κατεργασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 8.4.

AISI O1						AISI D2					
ΑΝΤΙΡΟΠΗ			ΟΜΟΡΡΟΠΗ			ΑΝΤΙΡΟΠΗ			ΟΜΟΡΡΟΠΗ		
Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	HPD [mm]	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	HPD [mm]	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	HPD [mm]	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	HPD [mm]
0,3	0,195	0,23	0,3	0,195	0,22	0,3	0,195	0,24	0,3	0,195	0,23
0,3	0,2815	0,23	0,3	0,2815	0,22	0,3	0,2815	0,24	0,3	0,2815	0,23
0,3	0,3765	0,23	0,3	0,3765	0,22	0,3	0,3765	0,23	0,3	0,3765	0,22
0,4	0,195	0,24	0,4	0,195	0,23	0,4	0,195	0,25	0,4	0,195	0,25
0,4	0,2815	0,24	0,4	0,2815	0,23	0,4	0,2815	0,25	0,4	0,2815	0,24
0,4	0,3765	0,24	0,4	0,3765	0,23	0,4	0,3765	0,24	0,4	0,3765	0,23
0,5	0,195	0,23	0,5	0,195	0,22	0,5	0,195	0,26	0,5	0,195	0,25
0,5	0,2815	0,23	0,5	0,2815	0,22	0,5	0,2815	0,25	0,5	0,2815	0,24
0,5	0,3765	0,24	0,5	0,3765	0,22	0,5	0,3765	0,24	0,5	0,3765	0,23

Αποτελέσματα υπολογισμών για τα υλικά μας AISI O1 και AISI D2 [Πίνακας 8.4]

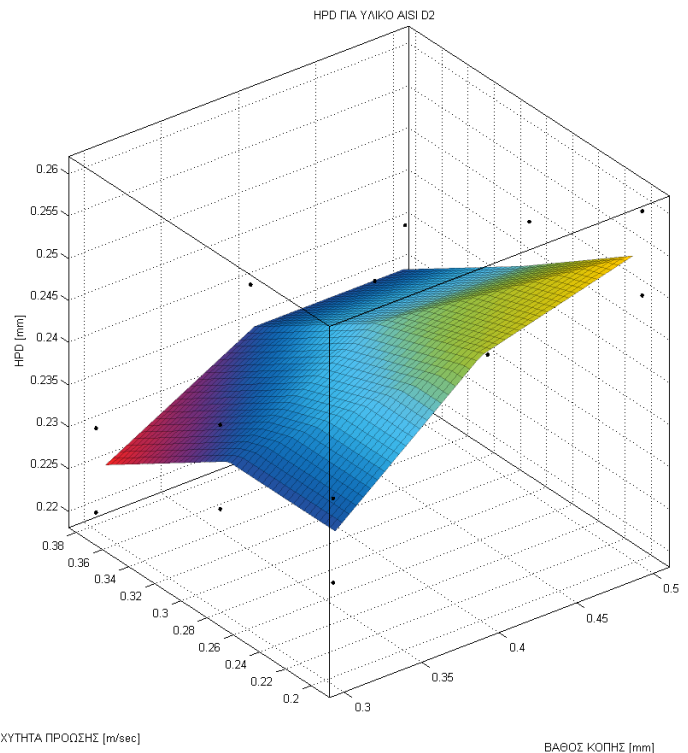
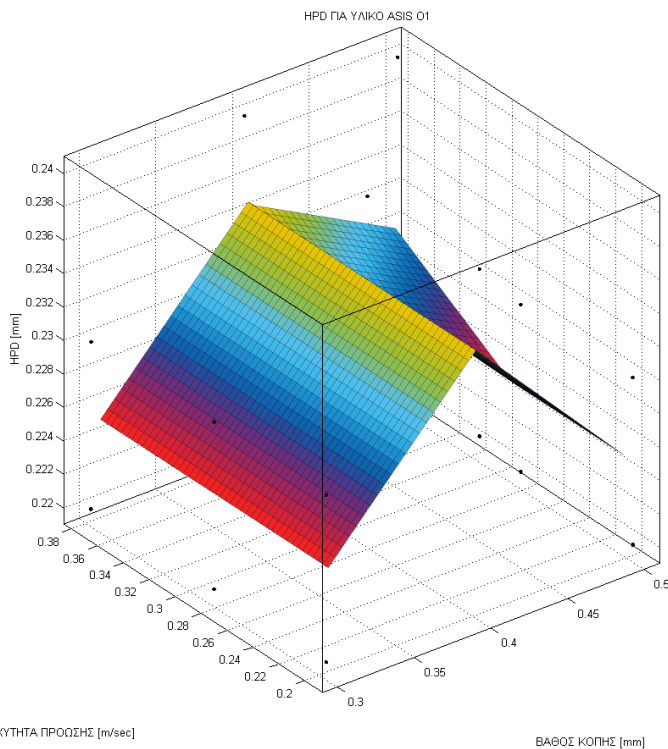
Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Ανατρέχοντας σε πειραματικά δεδομένα από το εργαστήριο κατεργασιών (εκπόνηση μεταπτυχιακής διατριβής) προκύπτουν:

Υλικό	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	HPD πειραματικό [μm]	HPD [μm]	Απόκλιση [μm]	Απόκλιση [%]
AISI O1	0,3	0,2815	200	230	30	15
AISI O1	0,3	0,3765	220	240	20	9
AISI O1	0,4	0,195	245	230	15	6
AISI D2	0,4	0,2815	230	240	10	4
AISI D2	0,4	0,3765	240	250	10	4
AISI D2	0,5	0,195	265	260	5	2

Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμών, με τα πειραματικά δεδομένα εργαστηρίου [Πίνακας 8.5]

Παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 8.5 επιβεβαιώνουν τους υπολογισμούς μας με χρήση αναλυτικών σχέσεων, έχοντας απόκλιση μικρότερη από 30 μm. Πρέπει να αναφέρουμε ότι η αύξηση του ποσοστού απόκλισης (όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα), αποδίδεται πιθανότατα σε τεχνικές δυσκολίες σχετικές με τη διεξαγωγή της κατεργασίας (φθορά λειαντικού τροχού, εναπομείναν υγρό κοπής στο τεμάχιο) . Η μεγάλη φθορά του λειαντικού τροχού κατά την «εξέλιξη» των πειραμάτων, και η αδυναμία αναγέννησής του, οδηγούν σε συνθήκες κατεργασίας και αποτελέσματα τα οποία δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν από τη μεθοδολογία που ακολουθήσαμε.



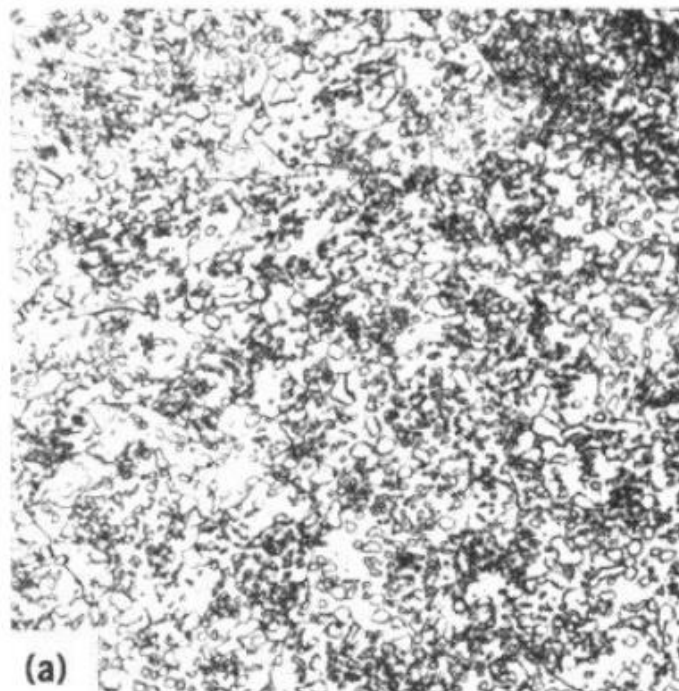
Διάγραμμα HPD συναρτήσει βάθους κοπής και ταχύτητας πρόωσης για υλικό AISI O1 [Σχήμα 8.13^α]

Διάγραμμα HPD συναρτήσει βάθους κοπής και ταχύτητας πρόωσης για υλικό AISI D2 [Σχήμα 8.13^β]

Ο υπολογισμός της μέγιστης επιφανειακής σκληρότητας αποτελεί το τελευταίο «βήμα» της διαδικασίας. Για τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε οι υπολογισμοί – εκτίμηση είναι «δύσκολη» καθώς αφενός το ένα υλικό (AISI O1) δεν ενδείκνυται για το συγκεκριμένο είδος κατεργασίας, αφετέρου οι συνθήκες κατεργασίας οδηγούν σε ρυθμούς θέρμανσης οι οποίες είναι «εκτός» των βιβλιογραφικών αναφορών.

Αρχικά το υλικό AISI O1 όπως βλέπουμε από τη κρυσταλλογραφία, έχει μικροδομή σφαιρικών καρβιδίων (Σχήμα 9.13). Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας υλικά με σφαιρικές δομές στη μικροδομή τους δεν ενδείκνυται για κατεργασίες short – zero time. Ο χρόνος είναι ελλιπής και δεν επιτρέπει την «επαρκή» διάχυση του άνθρακα, με την αναμενόμενη αύξηση σκληρότητας να είναι μικρή, ή ακόμα και ανεπαίσθητη για ορισμένες περιπτώσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την δυσκολία κατεργασίας του συγκεκριμένου υλικού (πολύ μικρή ή ακόμα και μηδενική αύξηση σκληρότητας), δυσκολία η οποία «ενισχύεται» από τις υψηλές ταχύτητες πρόωσης.

Για το υλικό AISI D2 βρίσκουμε στη βιβλιογραφία ότι η αναμενόμενη σκληρότητα μπορεί να φτάσει σε τιμές έως και 62 HRC. Οι μελέτες όμως που έχουν δημοσιευτεί δεν μπορούν να μας προσφέρουν ικανοποιητική ασφάλεια πρόβλεψης με δεδομένα καθολικής ισχύος. Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα υψηλών τιμών σκληρότητας, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν και αξιοσημείωτο «εύρος τιμών». Πρέπει στο σημείο αυτό να τονίσουμε (για ακόμα μια φορά), ότι τεχνικές δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν πιθανώς επηρέασαν αρνητικά τα αποτελέσματα της κατεργασίας. Έτσι ενώ υπολογιστικά μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση μέγιστης σκληρότητας, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για ασφαλέστερα συμπεράσματα.





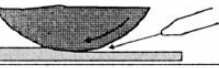
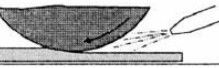



*Μικροδομή υλικού AISI O1 “as received” με χαρακτηριστικές σφαιρικές δομές καρβιδίων
(Heat treater’s guide: Practices and procedures for iron and steel (1995))
[Σχήμα 8.13]*

Ευρύτερη διερεύνηση [Ενότητα 9]

Χρήση Υγρού Κοπής

Η παροχή και η χρήση υγρού κοπής στην κατεργασία της λείανσης αποτελεί βασική παράμετρο της κατεργασίας. Το είδος – σύσταση του υγρού κοπής, η παροχή του, η θέση και η μέθοδος ψεκασμού, η πίεση είναι μερικές μόνο από τις παραμέτρους που σε κατεργασία λείανσης με χρήση υγρού κοπής πρέπει να ληφθούν υπ όψιν και να μελετηθούν [Σχήμα 9.1]. Βασικός στόχος της χρήσης υγρών κοπής είναι η μείωση της τριβής, των καταπονήσεων και των θερμοκρασιών κατεργασίας. Σημαντικές ποσότητες θερμότητας απομακρύνονται μέσω του υγρού κοπής, μειώνοντας αισθητά τη θερμοκρασία στο τεμάχιο. Το ποσοστό θερμότητας που απομακρύνεται μέσω του υγρού κοπής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με πειράματα να έχουν δείξει ότι μπορεί να φτάσει σε ποσοστό έως και 80 – 90 % (A study of the convection heat transfer coefficient of grinding fluids, T. Jin, D.J. Stephenson).

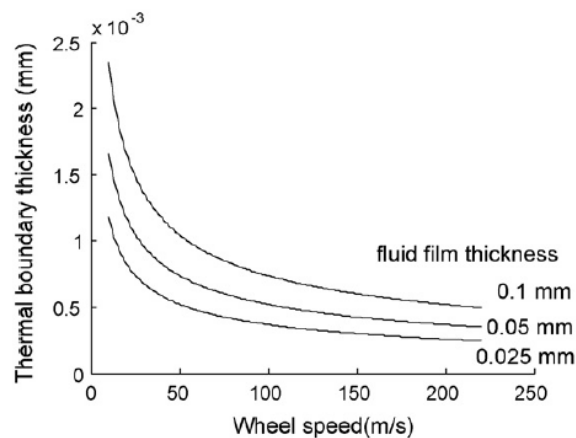
flooding nozzles		a	conventional flooding nozzles	$Q_{cl} \uparrow\uparrow$
		b	a: flexible segmented hose	
		c	b: tube	
			shoe nozzle	$Q_{cl} \uparrow$
			spot jet nozzle	$Q_{cl} \uparrow$ or $Q_{cl} \downarrow$
			spray nozzle	$Q_{cl} \downarrow\downarrow$
			internal supply	$Q_{cl} \uparrow$ or $Q_{cl} \downarrow$
$\uparrow\uparrow$ very high, \uparrow high, \downarrow low, $\downarrow\downarrow$ very low				

Διαφορετικές μέθοδοι παροχής υγρού κοπής [Σχήμα 9.1]

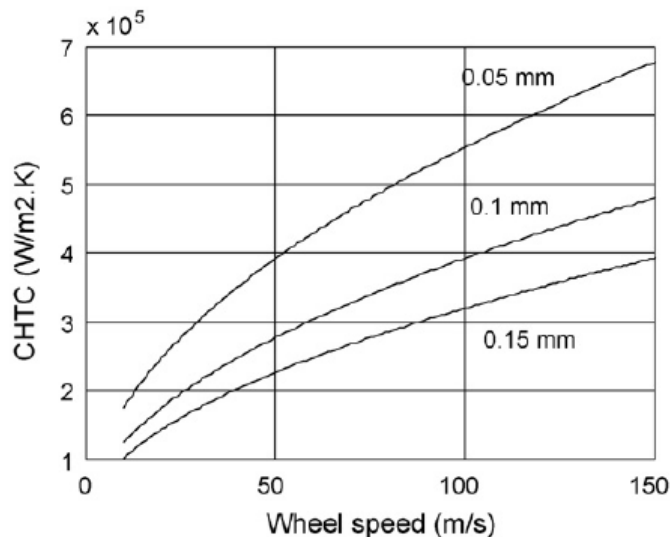
Μπορούμε εύκολα να υποθέσουμε ότι στην κατεργασία που μελετάμε, η απομάκρυνση τόσο μεγάλου ποσοστού θερμότητας, με την παράλληλη μείωση της θερμοκρασίας, αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για τη χρήση υγρών κοπής. Στη βιβλιογραφία είναι σπάνια η χρήση υγρού κοπής σε κατεργασία grinding hardening. Ο Σαλωνίτης στην διατριβή του αναφέρει ότι υπάρχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις στις οποίες ενδείκνυται ή ακόμα είναι και απαραίτητη η χρήση υγρού κοπής. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι ενώ σε τεμάχια - δοκίμια με (σχετικά) μεγάλο όγκο η μετάδοση θερμότητας προς το εσωτερικό των τεμαχίων παρείχε τους απαιτούμενους ρυθμούς ψύξης για να έχουμε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, σε τεμάχια λεπτά ο ρυθμός ψύξης ήταν ιδιαίτερα «αργός» με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται σκλήρυνση. Παρόμοια φαινόμενα έχουμε και σε κυλινδρικές γεωμετρίες μικρής ακτίνας. Στις περιπτώσεις αυτές η χρήση υγρού κοπής επιταχύνει την ψύξη του τεμαχίου και δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

Παρότι οι περιπτώσεις που μελετήσαμε δεν ανήκουν στις προαναφερθείσες, ώστε να απαιτούν τη χρήση υγρού κοπής, στα πλαίσια μια ολοκληρωμένης παρουσίασης έγινε μια κατά το δυνατόν σύντομη μελέτη της πιθανότητας χρήσης υγρού κοπής.

Η δυσκολία στον υπολογισμό της θερμότητας που απομακρύνεται μέσω του υγρού κοπής εστιάζεται στον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h_f . Όπως παρουσιάζεται και στη δημοσίευση «A study of the convection heat transfer coefficient of grinding fluids» των T.Jin και D.J. Stephenson, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από τις συνθήκες κατεργασίας. Τοπικά φαινόμενα» που λαμβάνουν χώρα, όπως πάχος του σχηματιζόμενου φιλμ, πάχος θερμικού οριακού στρώματος επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή [Σχήμα 9.2, Σχήμα 9.3]. Η δυσκολία αυτή μας οδηγεί στον πειραματικό ή ημι εμπειρικό υπολογισμό του



Μεταβολή πάχους οριακού θερμικού στρώματος [Σχήμα 9.2]



Μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας συναρτήσει του πάχους σχηματιζόμενου «υγρού φιλμ» και της ταχύτητας του τροχού. [Σχήμα 9.3]

Οι Rogers και Mayhew (Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer, Rogers G.F.C, Mayhew Y.R, 1967) προτείνουν τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας χρησιμοποιώντας το «μοντέλο» της στρωτής ροής σε πλάκα (laminar flow model). Ο Lyn το 2009 προτείνει μια απλουστευμένη εκδοχή, με τη παραδοχή ότι η ταχύτητα του ρευστού ισούται με την ταχύτητα του λειαντικού τροχού. Η σχέση που προτείνει είναι:

$$h_f = \frac{4}{9} * k_f^{\frac{2}{3}} * \rho_f^{\frac{1}{2}} * C_f^{\frac{1}{3}} * \eta_f^{-\frac{1}{6}} * \sqrt{\frac{u_s}{l_c}}$$

$$h_f = \text{συντελεστής μετάδοσης θερμότητας} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$k_f = \text{θερμική αγωγιμότητα υγρού κοπής} \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

$$\rho_f = \text{πυκνότητα υγρού κοπής} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$C_f = \text{θερμοχωρητικότητα υγρού κοπής} \left[\frac{J}{kg * K} \right]$$

$$\eta_f = \text{δυναμική συνεκτικότητα υγρού κοπής} \left[\frac{kg}{m * sec} \right]$$

$$u_s = \text{ταχύτητα λειαντικού τροχού} \left[\frac{m}{sec} \right]$$

$$l_c = \text{μήκος επαφής} [mm]$$

Έχοντας υπολογίσει το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας η θερμική ροή προς το υγρό κοπής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_f = h_f * \Delta T_{max}$$

$$q_f = \text{θερμική ροή προς το υγρό κοπής} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$\Delta T_{max} = \text{μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά τεμαχίου και υγρού κοπής} [K]$$

Η διαδικασία υπολογισμού της θερμικής ροής προς το υγρό κοπής είναι **επαναληπτική** καθώς για κάθε νέα θερμική ροή (απώλεια θερμότητας από το τεμάχιο), πρέπει να υπολογιστεί μια νέα μέγιστη θερμοκρασία και άρα νέο ΔT_{max} . Στους υπολογισμούς θεωρήσαμε ότι η θερμότητα που μεταφέρεται από τα απόβλητα και τον τροχό παραμένει σταθερή, και ουσιαστικά η θερμότητα του τεμαχίου «μοιράζεται» ανάμεσα στο τεμάχιο και το υγρό κοπής. Ως υγρό κοπής θεωρήσαμε νερό στους 50 °C.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΕΡΟΥ 50 [°C]			
Thermal Conductivity	Density	Specific Heat Capacity	Dynamic Viscosity
$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	$\left[\frac{kg}{m \cdot sec}\right]$
0,644	988	4182	0,000532

Ιδιότητες νερού [Πίνακας 9.1]

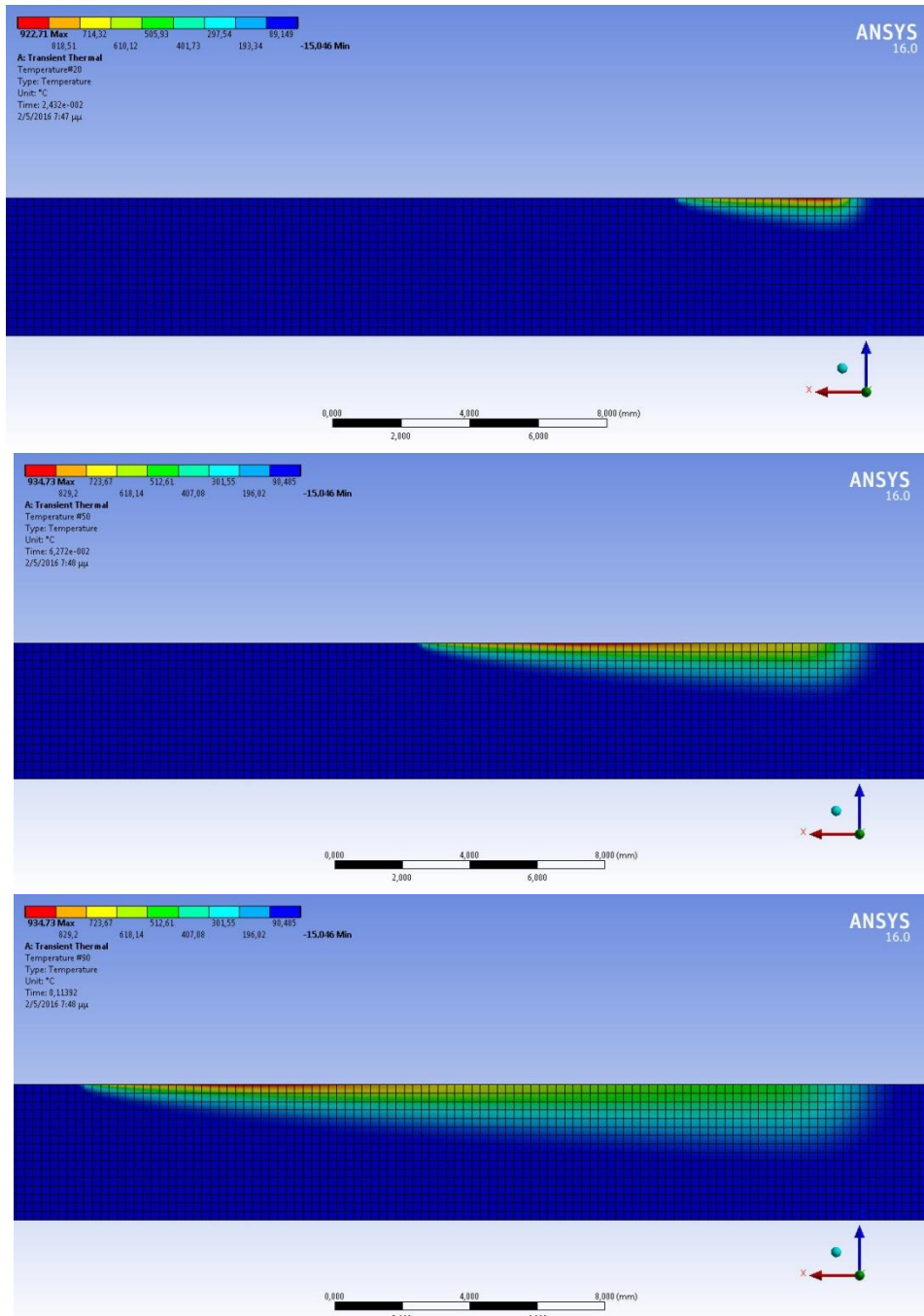
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα [Πίνακας 9.2]:

ΥΛΙΚΟ	#	Βάθος Κοπής [mm]	Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίου [m/sec]	l_c [mm]	h_f $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	q_f $\left[\frac{W}{mm^2}\right]$	R_f	T_{max} με χρήση υγρού κοπής [°C]	T_{max} Χωρίς χρήση υγρού κοπής [°C]	Μεταβ.	HPD [mm]	
AISI 01	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	1	0,3	0,195	9,49	40149	29,1	24%	840	1310	35,8%	0
		2	0,3	0,2815	9,49	40149	34,4	21%	990	1447	31,5%	0,06
		3	0,3	0,3765	9,49	40149	39,8	19%	1141	1593	28,4%	0,11
		4	0,4	0,195	10,95	37363	27,1	23%	822	1292	36,4%	0
		5	0,4	0,2815	10,95	37363	31,8	19%	961	1416	32,1%	0,05
		6	0,4	0,3765	10,95	37363	36,6	17%	1103	1550	28,9%	0,1
		7	0,5	0,195	12,25	35336	25,2	21%	797	1259	36,7%	0
		8	0,5	0,2815	12,25	35336	29,3	18%	925	1368	32,4%	0,03
		9	0,5	0,3765	12,25	35336	33,6	16%	1055	1489	29,1%	0,09
	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	10	0,3	0,195	9,49	40149	28,7	24%	829	1292	35,8%	0
		11	0,3	0,2815	9,49	40149	33,7	21%	971	1418	31,5%	0,05
		12	0,3	0,3765	9,49	40149	38,7	19%	1110	1549	28,3%	0,1
		13	0,4	0,195	10,95	37363	26,7	22%	810	1273	36,4%	0
		14	0,4	0,2815	10,95	37363	31,1	19%	940	1385	32,1%	0,04
		15	0,4	0,3765	10,95	37363	35,5	17%	1070	1503	28,8%	0,09
		16	0,5	0,195	12,25	35336	24,8	21%	784	1239	36,7%	0
		17	0,5	0,2815	12,25	35336	28,6	18%	902	1334	32,4%	0,01
		18	0,5	0,3765	12,25	35336	32,4	16%	1020	1439	29,1%	0,07
AISI D2	ΑΝΤΙΡΡΟΠΗ	19	0,3	0,195	9,49	40149	31,7	26%	944	1503	37,2%	0,01
		20	0,3	0,2815	9,49	40149	37,7	23%	1121	1663	32,6%	0,08
		21	0,3	0,3765	9,49	40149	43,9	21%	1298	1832	29,1%	0,12
		22	0,4	0,195	10,95	37363	29,5	25%	924	1485	37,8%	0
		23	0,4	0,2815	10,95	37363	34,9	21%	1090	1630	33,1%	0,08
		24	0,4	0,3765	10,95	37363	40,4	19%	1256	1786	29,7%	0,12
		25	0,5	0,195	12,25	35336	27,5	23%	897	1450	38,1%	0
		26	0,5	0,2815	12,25	35336	32,2	20%	1049	1577	33,5%	0,06
		27	0,5	0,3765	12,25	35336	37,1	17%	1204	1719	29,9%	0,11
	ΟΜΟΡΡΟΠΗ	28	0,3	0,195	9,49	40149	31,2	26%	932	1483	37,2%	0,01
		29	0,3	0,2815	9,49	40149	37,0	23%	1099	1630	32,6%	0,08
		30	0,3	0,3765	9,49	40149	42,7	20%	1263	1782	29,1%	0,11
		31	0,4	0,195	10,95	37363	29,1	24%	911	1464	37,8%	0
		32	0,4	0,2815	10,95	37363	34,1	21%	1066	1594	33,1%	0,07
		33	0,4	0,3765	10,95	37363	39,2	19%	1219	1733	29,7%	0,11
		34	0,5	0,195	12,25	35336	27,0	23%	884	1427	38,1%	0
		35	0,5	0,2815	12,25	35336	31,4	19%	1025	1540	33,4%	0,05
		36	0,5	0,3765	12,25	35336	35,9	17%	1165	1663	30,0%	0,1

Πίνακας αποτελεσμάτων για κατεργασία με χρήση υγρού κοπής, και υπολογισμός HPD. [Πίνακας 9.2]

Παρατηρούμε αισθητά χαμηλότερες θερμοκρασίες οι οποίες είτε δεν ξεπερνούν, είτε ξεπερνούν οριακά την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Είναι λογικό ότι δεν θα είχαμε αποτέλεσμα σκλήρυνσης εάν επιλέγαμε να κάνουμε χρήση υγρού κοπής.

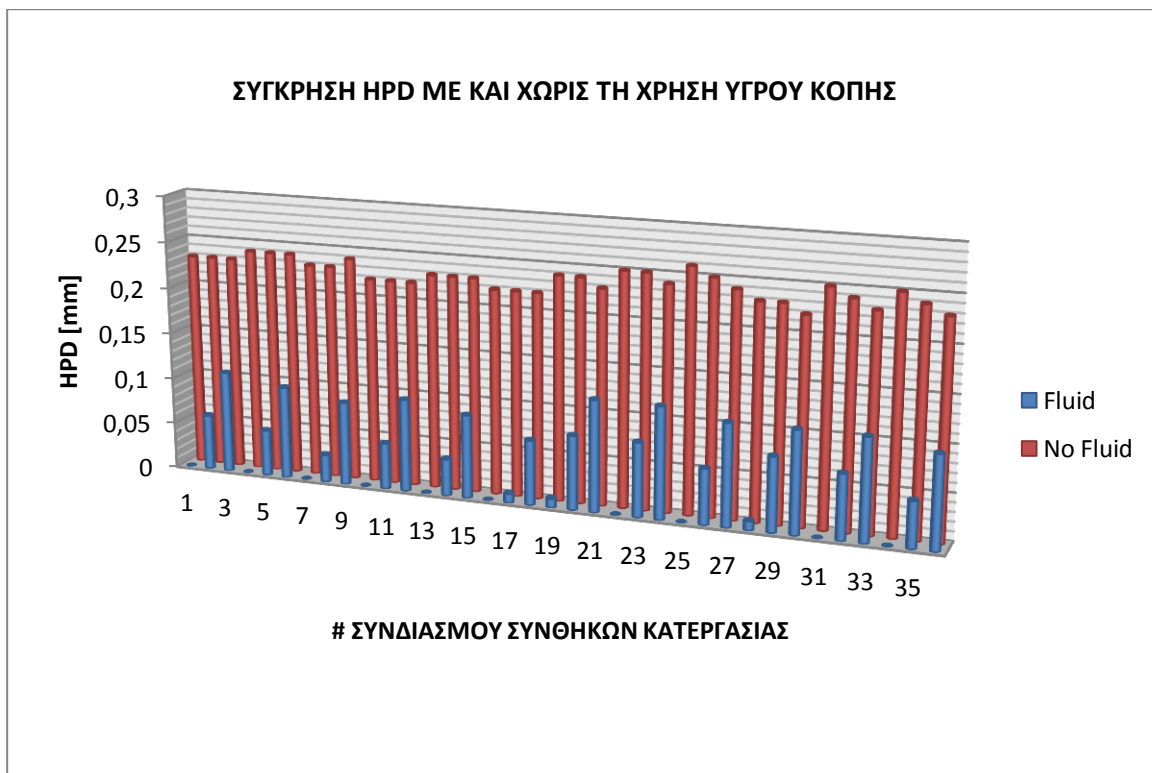
Ανάλογα αποτελέσματα είχαμε και σε προσομοίωση με ANSYS όπου παρατηρήσαμε χαμηλές θερμοκρασίες και αδυναμία για ύπαρξη βάθους σκλήρυνσης λόγω των θερμοκρασιακών προφίλ που αναπτύσσονται.



Θερμικό προφίλ τεμαχίου υλικού AISI O1 όταν ενεργοποιείται ο 20^{ος}, 50^{ος}, 90^{ος} κόμβος αντίστοιχα. Παράμετροι κατεργασίας $u_w = 0.195 \left[\frac{m}{sec} \right]$, $a_e = 0.30 [mm]$
[Σχήμα 9.4]



Διάγραμμα σύγκρισης μέγιστων θερμοκρασιών κατεργασίας, με και χωρίς τη χρήση υγρού κοπής [Σχήμα 9.5]



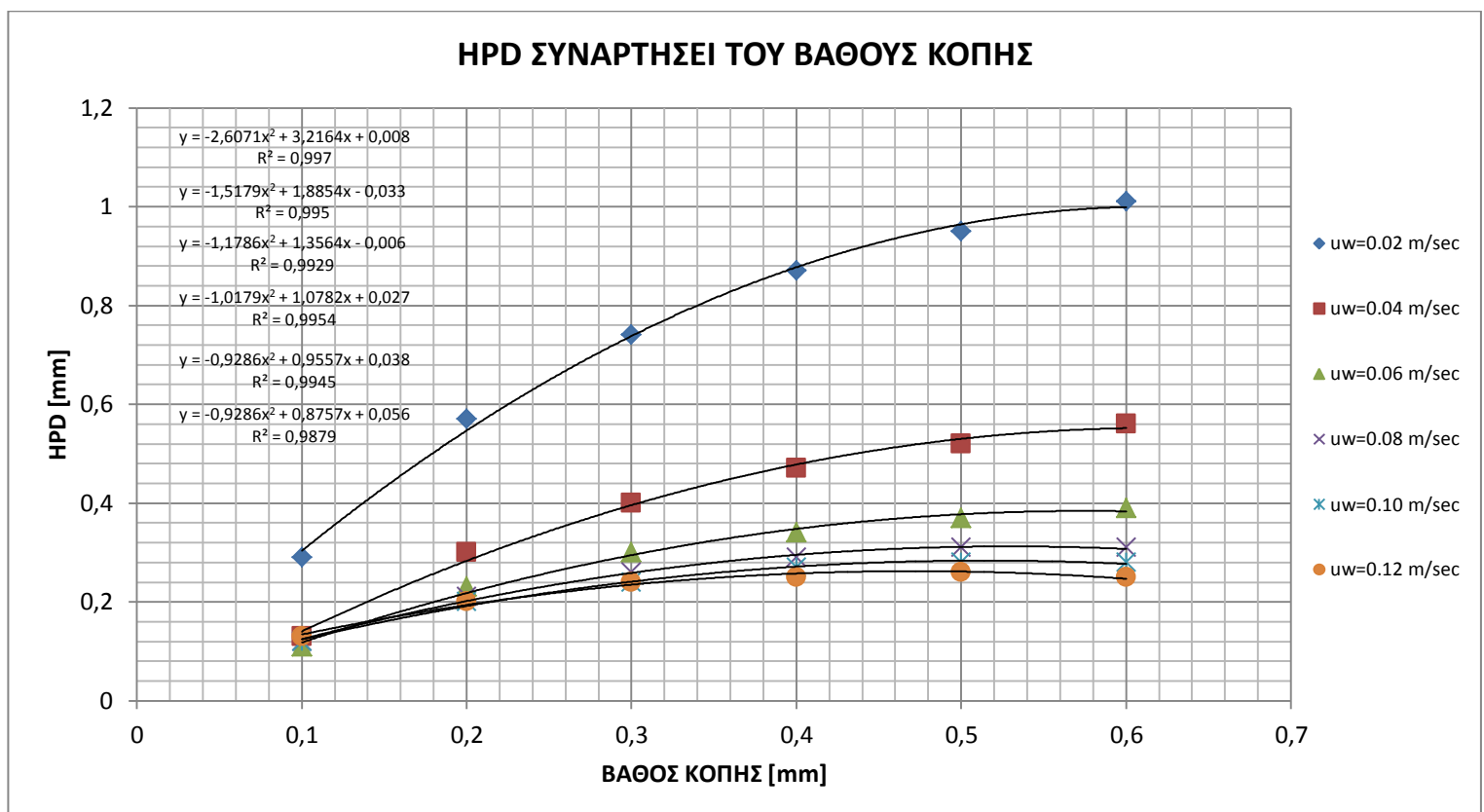
Διάγραμμα σύγκρισης ΗΡD, με και χωρίς τη χρήση υγρού κοπής [Σχήμα 9.6]

Επέκταση Υπολογισμών

Στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης διερεύνησης της επίδρασης των συνθηκών κατεργασίας (βάθος κοπής και ταχύτητα πρόωσης) στο τελικό αποτέλεσμα, και κυρίως στο βάθος σκλήρυνσης, έγιναν θεωρητικοί υπολογισμοί για ένα σύνολο διαφορετικών συνδυασμών συνθηκών κατεργασίας. Με κριτήριο τη βιβλιογραφία, επιλέχθηκε να μελετηθούν βάθη κοπής από 0,1 – 0,6 mm, και ταχύτητες πρόωσης από 0,02 – 0,18 m/sec. Ως υλικά τεμαχίων θεωρήσαμε AISI O1 και AISI D2 (όπως και παραπάνω), ενώ ακολουθήσαμε την προαναφερθείσα μεθοδολογία. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν τα διαγράμματα [Σχήμα 9.7 – Σχήμα 9.8].

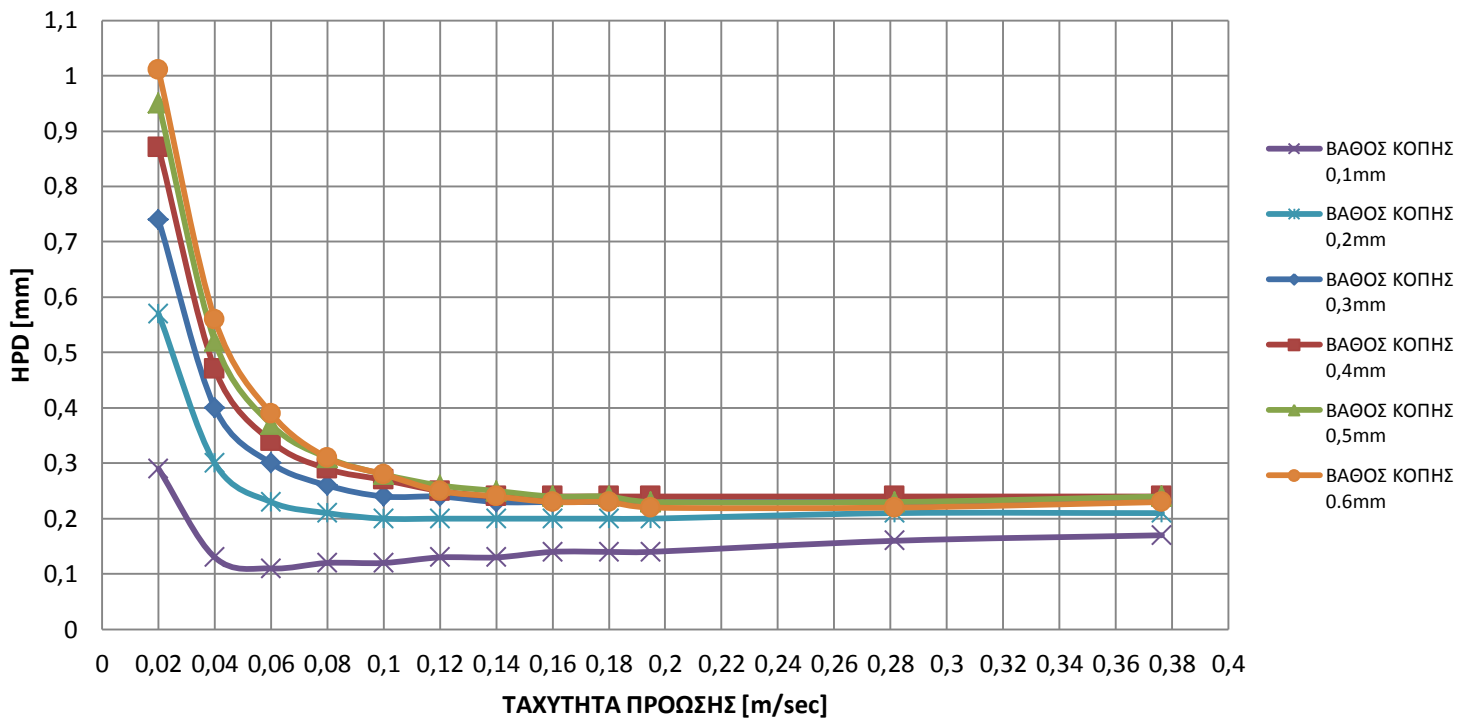
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	
Λειαντικός τροχός	38A36-K8VG 300X50X76
Ταχύτητα λειαντικού τροχού [m/sec]	43.98
Ταχύτητα πρόωσης τεμαχίων [m/sec]	0.02 – 0.3765
Βάθη κοπής [mm]	0.1 – 0.6
Μέθοδος λείανσης	Up /Down Grinding
Χρήση υγρού κοπής	--
Υλικό τεμαχίου	AISI O1 / AISI D2

Συνθήκες κατεργασίας για τους «ευρύτερους» υπολογισμούς
[Πίνακας 9.3]



Διάγραμμα HPD συναρτήσεϊ του βάθους κοπής
[Σχήμα 9.7]

HPD ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΩΩΣΗΣ



Διάγραμμα HPD συναρτήσεως της ταχύτητας πρόωσης
[Σχήμα 9.8]

Τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξαγάγουμε είναι:

- Παρατηρώντας το διάγραμμα [Σχήμα 9.8] βλέπουμε ότι από ένα όριο ταχύτητας και έπειτα δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο προβλεπόμενο βάθος σκλήρυνσης. Είναι λογικό καθώς η οποιαδήποτε αύξηση της ισχύος λόγω αύξησης της ταχύτητας, αντισταθμίζεται από την μείωση του χρόνου επίδρασης της θερμικής πηγής.
- Επίσης βλέπουμε ότι το βάθος κοπής επιδρά έντονα στο αποτέλεσμα για χαμηλές ταχύτητες πρόωσης. Σε υψηλές ταχύτητες οι καμπύλες του HPD «εκφυλίζονται» σε μια ευθεία.
- Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 9.7, η μεταβολή του HPD συναρτήσεως του βάθους κοπής για συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης μπορεί να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια από πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Πρέπει να τονίσουμε ότι οι εξισώσεις αυτές δεν έχουν καθολική ισχύ, καθώς προέρχονται από υπολογισμούς για πεπερασμένο εύρος συνθηκών κοπής και συγκεκριμένο υλικό τεμαχίου.

Συμπεράσματα

[Ενότητα 10]

Αρχικά, για να υπολογίσουμε θεωρητικά τις δυνάμεις, τις θερμικές ροές και τον επιμερισμό θερμότητας, βλέπουμε ότι εκτός από τις συνθήκες κατεργασίας (έχουμε αναφερθεί σε αυτές ως «παράμετροι διαδικασίας»), ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζουν οι «παράμετροι συστήματος». Η τοπογραφία του λειαντικού τροχού, είναι καίριας σημασίας, και χρησιμοποιώντας ημι – εμπειρικές σχέσεις που συνδέονται με την τυποποίηση του, μπορούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις ολίσθησης και κοπής. Επίσης ο επιμερισμός θερμότητας εξαρτάται από το είδος του λειαντικού τροχού, οι ιδιότητες του οποίου ως «σύνθετο υλικό» επηρεάζονται από το υλικό και το μέγεθος των κόκκων του. Πρέπει να τονιστεί η αδυναμία των μοντέλων μας να προβλέψουν και να μοντελοποιήσουν παραμέτρους φθοράς – ποιότητας του τροχού. Σημείο αναφοράς μας είναι ένας «ιδανικός» τροχός, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η «αναγέννηση» και η πιθανή αντικατάστασή του, όταν παρατηρείται εκτεταμένη φθορά, είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για την επιτυχή ολοκλήρωση της κατεργασίας.

Υπολογίζοντας την ισχύ της κατεργασίας και τον επιμερισμό θερμότητας, παρατηρούμε ότι ενώ με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης και του βάθους κοπής, σε απόλυτα νούμερα, η ισχύς της κατεργασίας και η θερμική ροή προς το τεμάχιο αυξάνονται, η θερμότητα που απορροφάται από το τεμάχιο ποσοστιαία μειώνεται. Αυτό μας οδηγεί στο να υποθέσουμε (επιβεβαιώνεται και με τους υπολογισμούς της ενότητας 9), ότι υπάρχει αφενός κάποιος βέλτιστος συνδυασμός συνθηκών κατεργασίας για το εκάστοτε επιθυμητό αποτέλεσμα, αφετέρου ότι υπάρχει και ένα όριο πέραν του οποίου η κατεργασία μας παύει να έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Στη βιβλιογραφία άλλωστε (σχήμα 4.4), βλέπουμε ότι οι αποτελεσματικοί συνδυασμοί συνθηκών κατεργασίας είναι περιορισμένοι, και εξαρτώμενοι από το κατεργαζόμενο υλικό και από τον τύπο του λειαντικού τροχού. Επίσης διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει αξιόλογη διαφοροποίηση ανάμεσα σε ομόρροπη και αντίρροπη λείανση.

Η επίλυση των αναλυτικών σχέσεων είναι το επόμενο βήμα, ώστε να προσδιοριστεί το θερμοκρασιακό προφίλ στα τεμάχια μας. Απαιτείται να δοθούν ως «inputs», εκτός από τις θερμικές ροές προς το τεμάχιο (οι οποίες έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενη φάση της εργασίας μας), και οι φυσικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού. Ως γνωστόν οι περισσότερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενες, καθιστώντας έτσι την επίλυση ακόμα πιο πολύπλοκη. Ως λύση (η οποία και χρησιμοποιήθηκε) προτείνεται ο υπολογισμός μιας μέσης τιμής των μεγεθών, για το θερμοκρασιακό εύρος που μελετάται. Εναλλακτικά μπορεί να ορισθούν κατάλληλα “Isop”, έως ότου επιτύχουμε σύγκλιση στις θερμοκρασίες.

Έχοντας υπολογίσει το θερμοκρασιακό προφίλ, ελέγχουμε την ορθότητα των υπολογισμών μας, συγκρίνοντας την μέγιστη θερμοκρασία που προκύπτει από την επίλυση των αναλυτικών σχέσεων, με αυτή που υπολογίζουμε μέσω ημι – εμπειρικής σχέσης που προτείνεται στη βιβλιογραφία. Παρατηρούμε ότι έχουμε απόκλιση μικρότερη του 0.5%. Τα αποτελέσματα επίσης ελέγχονται ώστε να συνάδουν με τη «λογική», και να μην αποτελούν απλή επίλυση σχέσεων. Οι θερμοκρασίες αυξάνονται με αύξηση της θερμικής ροής, ενώ το «προφίλ θερμοκρασίας» μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού μας (όπως είναι αναμενόμενο και λογικό).

Στο επόμενο βήμα χρησιμοποιούμε υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS) προκειμένου να προσομοιώσουμε την κατεργασία μας. Πρέπει στο στάδιο αυτό να κάνουμε ορθολογική διαχείριση της υπολογιστικής ικανότητας ορίζοντας μέγεθος τεμαχίου, μέγεθος πλέγματος και χρονικό βήμα επίλυσης, με κριτήριο την ακρίβεια, αλλά και την λειτουργικότητα. Τα δεδομένα μας καταχωρούνται ως πίνακες και μπορούμε σχετικά εύκολα να διαχειριστούμε μεγέθη θερμοκρασιακά εξαρτώμενα, και να επιλύσουμε ένα μη γραμμικό μοντέλο. Με τη μέθοδο που αναλύθηκε στην ενότητα 7 προσομοιώνουμε την κινούμενη τριγωνική πηγή μας, και επιλύοντας έχουμε το θερμοκρασιακό προφίλ του τεμαχίου, και πως αυτό διαμορφώνεται – εξελίσσεται χρονικά. Τέλος συγκρίνουμε τα αποτελέσματά με αυτά που έχουν προκύψει από την επίλυση του αναλυτικού μοντέλου και διαπιστώνουμε απόκλιση μικρότερη του 3%, η οποία και κρίνεται ικανοποιητική. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι αύξηση της ταχύτητας πρόωσης (αύξηση της ισχύος) προκαλεί αύξηση και των μέγιστων θερμοκρασιών. Λόγω όμως του μειωμένου χρόνου επίδρασης της πηγής έχουμε αυξημένη «κλίση θερμοκρασίας» και όχι ουσιαστική μεταβολή του πάχους της ζώνης που επηρεάζεται θερμικά. Επίσης παρατηρούμε (όπως και με το αναλυτικό μοντέλο), έντονη διαφοροποίηση ανάμεσα στα τεμάχια διαφορετικών υλικών.

Στη συνέχεια υπολογίσαμε με βάση το θερμοκρασιακό προφίλ και τη χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας (ψύξη τεμαχίου), το προβλεπόμενο βάθος σκλήρυνσης (HPD), και την αναμενόμενη μέγιστη επιφανειακή σκληρότητα. Για τον υπολογισμό του βάθους σκλήρυνσης από τα διαγράμματα CCT του κάθε υλικού βρίσκουμε την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης A_{c1f} , την οποία διορθώνουμε κατάλληλα, και με βάση αυτή υπολογίζεται το οριακό βάθος στο οποίο έχουμε ωστενιτικό και στη συνέχεια μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Για τον υπολογισμό της μέγιστης σκληρότητας, για τους λόγους που αναλύθηκαν στην ενότητα 8, και λόγω της ιδιομορφίας που παρουσιάζουν οι κατεργασίες short – zero time, μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση σκληρότητας με βάση τα διαγράμματα CCT των υλικών μας, αλλά για ακριβέστερα και ορθότερα αποτελέσματα, ανατρέχουμε στη βιβλιογραφία. Για το υλικό AISI O1 το οποίο χρησιμοποιήθηκε υπάρχουν «εγγενή προβλήματα» που σχετίζονται με την αρχική μικροδομή του, και στα οποία επίσης αναφερθήκαμε στην ενότητα 8. Στην ενότητα αυτή επίσης προχωρήσαμε και σε σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου που ακολουθήσαμε, με δεδομένα της βιβλιογραφίας και πειραματικά, διαπιστώνοντας σύγκληση των αποτελεσμάτων.



Στη συνέχεια επεκτείναμε τους υπολογισμούς για περιπτώσεις με χρήση υγρού κοπής. Η δυσκολία υπολογισμών έγκειται στην πολυπλοκότητα υπολογισμού ενός συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h_f του υγρού κοπής. Στη βιβλιογραφία προτείνεται μια σχέση θεωρώντας «laminar flow» την οποία και χρησιμοποιήσαμε. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένα σημαντικό ποσό θερμότητας απομακρύνεται μέσω του υγρού κοπής, με αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες και HPD εξαιρετικά μικρά ή και μηδενικά. Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με την κρατούσα θέση ότι μόνο σε ειδικές περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση υγρού κοπής σε κατεργασία σκλήρυνσης μέσω λείανσης. Τέλος επεκτείναμε τους υπολογισμούς μας για χαμηλότερες ταχύτητες πρόωσης και περισσότερα βάθη κοπής, διαπιστώνοντας ότι οι λειτουργικοί συνδυασμοί συνθηκών κατεργασίας εντοπίζονται σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες.

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτή μπορούμε να πούμε ότι η κατεργασία της σκλήρυνσης μέσω λείανσης είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, και απαιτεί προσεκτική – ακριβή μοντελοποίηση και μελέτη. Η περαιτέρω ερευνά μπορεί και πρέπει να εστιάσει στις παραμένουσες τάσεις του τεμαχίου, στην ποιότητα επιφανείας και πιθανή ανάγκη για λείανση και σε επόμενο στάδιο κατεργασίας, στην συμπεριφορά των υλικών υπό συνθήκες έντονης θερμικής φόρτισης για «μικρούς χρόνους» και στην επίδραση της ποιότητας – είδους – φθοράς του λειαντικού τροχού. Με αναλυτική μελέτη και δημιουργία βάσης δεδομένων για εύρος υλικών και συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα κοπής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής, χρήση ή μη υγρού κοπής) μπορεί να ενταχθεί η κατεργασία στις συμβατικές, ευρέως χρησιμοποιούμενες από τη βιομηχανία. Επίσης αποτελεί πεδίο έρευνας η επέκταση – εφαρμογή της σε κυλινδρικά τεμάχια ή τεμάχια πολύπλοκης γεωμετρίας όπου υπάρχουν προβλήματα λόγω overlapping.

Εν κατακλείδι, το σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κατεργασίας είναι η δυνατότητα αξιοποίησης – διαχείρισης της ούτως ή άλλως παραγόμενης θερμότητας, με ενεργειακό και οικονομικό όφελος.

Βιβλιογραφία

- B. Kolkwitz, T. Foeckerer, C. Heinzl, M.F. Zaeh, E. Brinksmeier, (2012), "Experimental and Numerical Analysis of the Surface Integrity resulting from Outer – Diameter Grinding – Hardening", *Procedia Engineering*, Vol. 16, pages (222 – 227).
- E. Brinksmeier, C. Heinzl, M. Wittmann, (1999), "Friction, Cooling and Lubrication in Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 48/2, pages (581 – 593).
- Fritz Klocke, (2009), *Manufacturing Processes 2 (Grinding, Honing, Lapping)*, Springer.
- George F. Vander Voort, (2004), *Metallography and Microstructure*, ASM International, United States of America.
- G. Chryssolouris, K. Tsirbas, K. Salonitis, (2005), "An Analytical, Numerical and Experimental Approach to Grind Hardening", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 7
- G.E. Totten, (2006), *Steel Heat Treatment Handbook*, New York, Taylor & Francis.
- Han Zheng – tong, ZHANG Ning – ju, GAO Ding, YANG Gang, (2007), "Research into Grinding Hardening of Microalloyed Non – quenched and Tempered Steel, *Science Foundation of China University Mining & Technology*, Vol. 17, pages (238 – 241).
- Harry Chandler (1995), *Heat treater's guide: Practices and procedures for iron and steel*, ASM International.
- Heinzl C., Solter J., Jermolajev S., Kolkwitz B., Brinksmeier E., (2014), "A versatile method to determine thermal limits in grinding", *2nd CIRP Conference on Surface Integrity*, pages (131 – 136).
- J Dossett and G.E. Totten, (1991), *Introduction to Surface Hardening of Steels, Heat Treating*, ASM International.
- J Dossett and G.E. Totten, (2013), *Introduction to Surface Hardening of Steels, Heat Treating*, ASM International.
- Jianhua Zhang, Peiqi Ga, Tien Chien Jen, Lei Zhang, (2007). "Experimental and numerical studies of AISI1020 steel in grinding hardening", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pages (787 – 795).
- Jianping Li, Songyong Liu, Changlong Du, (2013), "Experimental Research and Computer Simulation of face Grind – Hardening Technology", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 59, pages (81 – 88).
- Joachim Roesler, Harald Harders, Martin Baeker, (2007), *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*, Springer.
- Ju Dong Li, Jie Zhen ZHUANG, Zhi Long Hu, (2014), "Influence of Speed feed on Grind – Hardened layer and its Uniformity", *International Conference on Mechanism Science and Control Engineering*, pages (85 – 89).
- K. Ishida, (1995), "Calculation of the effect of alloying elements on the M_s Temperature in steels", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 220, pages (126 – 131).
- Liu Judong, Yuan Wei, Huang Songwei, Xu Zhilong, (2012), "Experimental Study on Grinding Hardening of 1060 Steel", *Energy Procedia*, Vol. 16, pages (103 – 108).
- Mei Liu, Thai Nguyen, Liangchi Zhang, Qiong Wu, Dale Sun, (2014), "Effect of grinding induced cyclic heating on the hardened layer generation in the plunge grinding of a cylindrical component", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 89, pages (55 – 63).
- Norton Company, (1947), *A Handbook on Tool Room Grinding*, U.S.A..

- R.E. Smallman, R.J. Bishop, (1999), **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering**, Butterworth Heinemann.
- S. Malkin, C. Guo, (2007), “Thermal Analysis of Grinding”, **Annals of the CIRP**, Vol. 56/2.
- S. Malkin, C. Guo, (2008), **Grinding Technology**, New York, industrial Press.
- Salonitis Konstantinos, (2015), **Grind Hardening Process**, Springer.
- Robert C. Uhl, (1991) **Metals Handbook Vol. 4 Heat Treating**, ASM International.
- T. Foeckerer, M.F. Zaeh, O.B. Zhang, (2013), “A three – dimensional analytical model to predict the thermo – metallurgical effects within the surface layer during grinding and grind – hardening”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, pages (223 – 237).
- T. Jin, D.J. Stephenson, (2008), “A study to the convection heat transfer coefficient of grinding fluids”, **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Vol. 57, pages (367 – 370).
- Thai Nguyen, I. Zarudi, L.C. Zhang, (2007), “Grinding hardening with liquid nitrogen: Mechanism and technology”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 47, pages (97 – 106).
- Thai Nguyen, L.C. Zhang, (2010), “Grinding Hardening using dry air and liquid nitrogen: Prediction and verification of temperature fields and hardened layer thickness”, **International Journal of Machine & Tools Manufacture**, Vol. 50, pages (901 – 910).
- U. Alonso, N. Ortega, J.A. Sanchez, I. Pombo, B. Izquierdo, S. Plaza, (2014), “Hardness control of Grinding – Hardening and finishing grinding by means of area – based specific energy”, **International Journal of Machine tools & Manufacture**, Vol. 88, pages (24 – 33).
- W. Brian Rowe, (2014), **Principles of Modern Grinding Technology**, Elsevier.
- Wole Soboyejo, (2003), **Mechanical Properties of Engineered Materials**, Marcel Dekker.
- Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, (2008), **Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών**, Αθήνα, Παπασωτηρίου.
- Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, (2011), **Κατεργασίες II**, Αθήνα, Ε.Μ.Π.
- Κωνσταντίνος Σαλωνίτης, (2006), **Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Υπολογισμού της Κατανομής και του Βάθους Διείσδυσης Σκλήρυνσης λόγω διεργασίας Σκλήρυνσης μέσω Λείανσης**, Πάτρα.
- Κωνσταντίνος Τσίρμπας, (2002), **Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση της Διεργασίας Σκλήρυνσης Δια Λειάνσεως**, Πάτρα.

Web

- <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/>
- <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26076/>
- <http://www.azom.com/>
- <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/MHXANOLOGIKA%20YLIIKA.html>
- <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Steel/HotRolledCarbonSteel/thermalProperties.htm>
- <http://www.metalravne.com/selector/steels/CK60.html>
- <http://www.mie.uth.gr/>
- <http://www.oilandgas.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGoilandgas/Documents/Refractories/AH199H-en.pdf>