

Άσκηση 2

ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- 2.1. Εισαγωγή
 - 2.2. Μέθοδος Brinell
 - 2.3. Μέθοδος Rockwell
 - 2.4. Μέθοδος Vickers
 - 2.5. Συσχέτιση αριθμών σκληρότητας
 - 2.6. Πειραματικό μέρος
-

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

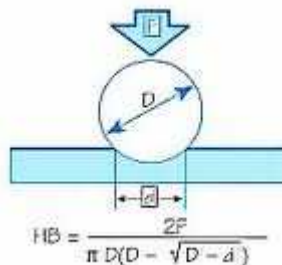
Η σκληρότητα των υλικών είναι μια σύνθετη ιδιότητα των υλικών που δεν μπορεί να οριστεί κατά τρόπο μοναδικό. Έτσι παρά του ότι πρόκειται για έννοια εύκολα κατανοητή, στην πράξη ο προσδιορισμός της σκληρότητας ενός υλικού βασίζεται στη μέτρηση κάποιων μηχανικών ιδιοτήτων που διαφέρουν από υλικό σε υλικό ή ακόμα και ανάλογα από τη χρήση του υλικού. Για παράδειγμα διαφορετική είναι η μέθοδος προσδιορισμού της σκληρότητας ενός πετρώματος από ένα μεταλλικό υλικό, ή η σκληρότητα διείδυσης ενός μεταλλικού υλικού από τη σκληρότητα τριβής του ίδιου υλικού.

Για τα μεταλλικά υλικά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην πράξη παρουσιάζει η σκληρότητα διείδυσης, δηλαδή η αντίσταση του υλικού στην πλαστική παραμόρφωση υπό την επίδραση ενός στατικού φορτίου. Η σκληρότητα διείδυσης έχει το πλεονέκτημα ότι:

- η μέτρηση είναι απλή και γίνεται σχετικά εύκολα.
- δίνει το μέτρο των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, έτσι που να μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό.
- ο έλεγχος δεν είναι καταστροφικός.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΣ BRINELL

Η μέθοδος βασίζεται στη διείδυση χαλύβδινης σφαίρας ορισμένης διαμέτρου, υπό την επίδραση φορτίου P , στο προς δοκιμή υλικό. Το εφαρμοζόμενο φορτίο (kgf) προς την επιφάνεια του κυκλικού αποτυπώματος (mm^2) δίνει το μέτρο της σκληρότητας του υλικού (σχ. 1.)



<http://www.hardnesstesters.com>

Σχ. 1: Μέθοδος Brinell

Η σκληρότητα σύμφωνα με την μέθοδο Brinell συμβολίζεται ως BHN (Brinell Hardness Number) ή ως HB και δίδεται από την σχέση :

$$HB = \frac{P}{S} \text{ (Kgf/mm}^2 \text{)}$$

όπου S είναι η επιφάνεια του αποτυπώματος, και η οποία προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$S = \pi \cdot D \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

όπου : D η διάμετρος της σφαίρας.

d η διάμετρος του αποτυπώματος.

Για σωστά αποτελέσματα ο λόγος d / D πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0.3 και 0,6. Συνήθως η μέτρηση γίνεται με φορτίο από 500 – 3000 kgf και διεισδυτή διαμέτρου D = 5 -1 mm. Ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου είναι από 10 – 30sec.

Απαραίτητη προϋπόθεση για σωστή μέτρηση είναι η επιφάνεια του δοκιμίου να είναι επίπεδη, λεία και απαλλαγμένη από οξείδια και σκόνη. Αυτό επιτυγχάνεται με λείανση και καθαρισμό του δοκιμίου.

Ο αριθμός σκληρότητας κατά Brinell που συμβολίζεται απλά με HB, υποδηλώνει standard συνθήκες δοκιμής με χρήση διεισδυτή διαμέτρου D = 10mm , P = 3000 Kgf και χρόνο εφαρμογής του φορτίου 10 – 15 sec. Για άλλες συνθήκες το σύμβολο HB συμπληρώνεται με αριθμούς σε θέση δεικτών που υποδηλώνουν τις συνθήκες δοκιμής με σειρά: D, P, διάρκεια. Για παράδειγμα, 75 HB 10/500/30 υποδηλώνει, σκληρότητα Brinell 75 που μετρήθηκε με σφαιρίδιο D = 10mm P = 500Kgf για 30sec.

Επίσης για σωστές μετρήσεις πρέπει:

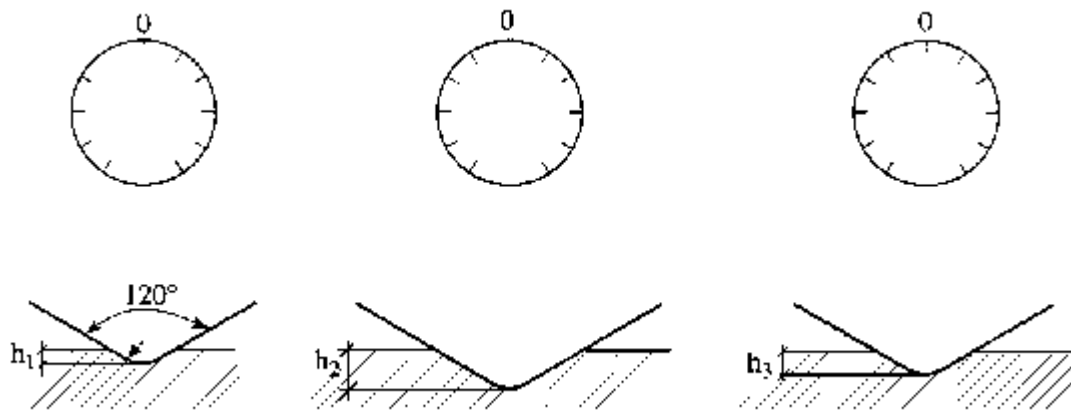
- το πάχος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 10 φορές το βάθος του αποτυπώματος.
- η απόσταση του διεισδυτή από τις άκρες του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 2,5 φορές τη διάμετρο του αποτυπώματος.
- τα σημεία δοκιμής να απέχουν τουλάχιστον 5 διαμέτρους μεταξύ τους.

2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ROCKWELL

Η μέθοδος Rockwell στηρίζεται και αυτή στη μέτρηση της διείσδυσης ενός διεισδυτή κάτω από την επίδραση ενός φορτίου. Η διαφοροποίηση της μεθόδου από τη μέθοδο Brinell συνίσταται στο ότι η μέθοδος Brinell βασίζεται στη μέτρηση της επιφανείας του αποτυπώματος, ενώ η μέθοδος Rockwell βασίζεται στη μέτρηση της προσαύξησης του βάθους του αποτυπώματος που προκύπτει από την εφαρμογή ενός προκαταρκτικού και ενός κυρίως φορτίου.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου Rockwell είναι το ότι φέρει ωρολογιακή κλίμακα ανάγνωσης που δίνει απευθείας τη μέτρηση της προσαύξησης του βάθους του αποτυπώματος σε μονάδες σκληρότητας Rockwell.

Γιά την μέτρηση της σκληρότητας των μαλακών μεταλλικών υλικών χρησιμοποιείται ως διεισδυτής χαλύβδινη σφαίρα 1,58mm και φορτίο 100Kg (κλίμακα Β), ενώ για σκληρότερα υλικά κώνος με γωνία 120° με ημισφαιρική αδαμάντινη απόληξη (Brale) και φορτίο 150Kg (κλίμακα C). Αρχικά εφαρμόζεται ένα προκαταρκτικό φορτίο 10kg και στη συνέχεια ανάλογα με την κλίμακα το αντίστοιχο κυρίως φορτίο, 100kg στην κλίμακα Β και 150kg στην κλίμακα C.



<http://www.teicrete.gr/chemistry/matlab/ask10>

Σχ. 2: Μέθοδος Rockwell

Υπάρχουν 30 διαφορετικές κλίμακες Rockwell, που ορίζονται με συνδυασμό του διεισδυτή και ελάχιστων ή μέγιστων φορτίων. Η πλειονότητα των εφαρμογών

Καλύπτεται από την κλίμακα Rockwell C και B για δοκιμές σε χάλυβα και άλλα υλικά. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι κλίμακες Rockwell με τα αντίστοιχα φορτία και εισχωρητή.

Κλίμακες Rockwell

Κλίμακα	Τύπος εισχωρητή	Φορτίο (Kg)
B	1/16" σφαιρίδιο	100
C	Κώνος διαμαντιού	150
A	"	60
D	"	100
E	1/8" σφαιρίδιο	100
F	1/16" σφαιρίδιο	60
G	"	150
H	1/8" σφαιρίδιο	60
K	"	150

Η ανάγνωση της σκληρότητας γίνεται στον ωρολογιακό μηχανισμό ανάγνωσης του οργάνου. Το σύστημα ανάγνωσης φέρει δύο κλίμακες με ενδείξεις από 0 - 100. Η μία κλίμακα, τυπωμένη με κόκκινο χρώμα, φέρει την ένδειξη B και χρησιμεύει για την ανάγνωση τιμών σύμφωνα με την κλίμακα B. Η άλλη κλίμακα φέρει ενδείξεις με μαύρο χρώμα και την ένδειξη C και μετρά την αντίστοιχη σκληρότητα.

Για την σωστή μέτρηση της σκληρότητας απαιτείται όπως:

- η επιφάνεια του δοκιμίου είναι λεία, επίπεδη και καθαρή.
- το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου να είναι τουλάχιστον 10 φορές το βάθος του αποτυπώματος.

2.4. ΜΕΘΟΔΟΣ VICKERS

Η μέθοδος κατά Vickers εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της σκληρότητας σε διείδυση λεπτών δοκιμίων.

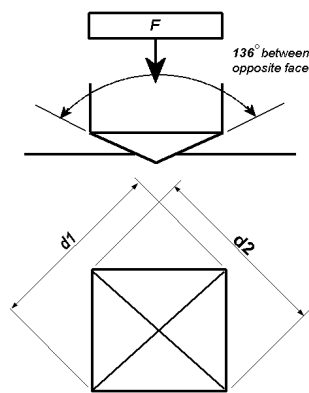
Ο διεισδυτής, ο οποίος χρησιμοποιείται, έχει μορφή κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας (Σχήμα 3). Η περιεχόμενη γωνία μεταξύ των συγκλινουσών επιφανειών της πυραμίδας είναι 136°. Συνεπώς, η παραμόρφωση, η οποία δημιουργείται πάνω στο δοκίμιο, είναι μια ορθογώνια ουλή.

Για τον προσδιορισμό του βαθμού σκληρότητας του εξεταζόμενου δοκιμίου επιβάλλεται στο διεισδυτή καθορισμένο φορτίο F , σε Kgf και υπολογίζεται η μέση τιμή των διαγωνίων της ουλής d , σε mm. Δηλαδή, αν είναι d_1 και d_2 οι δύο διαγώνιοι της ουλής, τότε είναι :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Η μέτρηση των διαγωνίων της ουλής γίνεται με τη βοήθεια μικρομετρικής διόπτρας. Ο βαθμός σκληρότητας κατά Vickers, HV, δίνεται από τη σχέση :

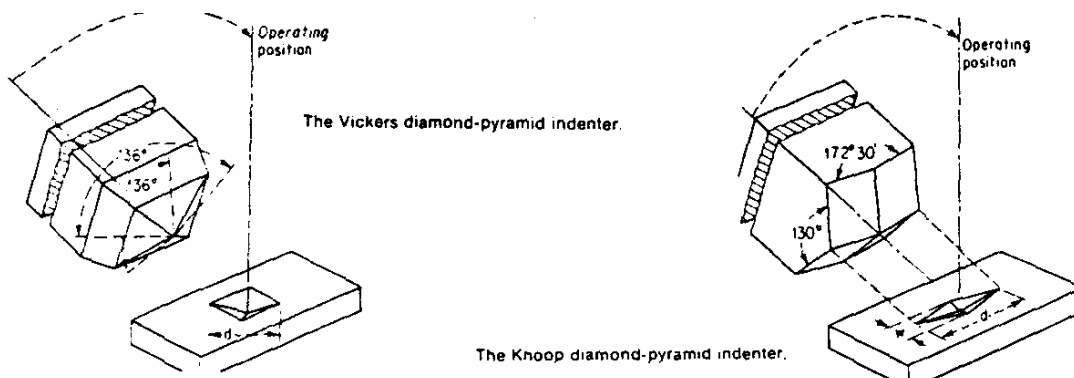
$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \text{ (Kgf/mm}^2\text{)}$$



Σχ. 3: Μέθοδος Vickers

<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>

Στην περίπτωση πιο επιμηκυμένου διεισδυτή με διαφορετικές γωνίες των συγκλινουσών επιφανειών της πυραμίδας, η μέθοδος αναφέρεται σαν μέθοδος Κνοορ (σχήμα 4).



Σχ. 4: Σχηματική παράσταση μεθόδων Vickers και Κνοορ

<http://web1.boun.edu.tr/ercanbalikci/hardness.pdf>

2.5. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΡΙΘΜΩΝ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Αν και υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στη συσχέτιση της σκληρότητας μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται, στην πράξη με την εφαρμογή ημιεμπειρικών τύπων και με σφάλμα της τάξης του $\pm 10\%$ είναι δυνατή η συσχέτιση της σκληρότητας που προσδιορίζεται με τη μέθοδο Brinell με αυτήν της μεθόδου Rockwell.

Η σχέση που εφαρμόζεται στην περίπτωση τιμών Rockwell B μεταξύ 35 και 100, είναι η παρακάτω:

$$HB = 7300 / (130 - HRB)$$

Υπάρχουν στην βιβλιογραφία διαγράμματα, που συσχετίζουν τις σκληρότητες ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την συσχέτιση αυτή πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή.

Συσχέτιση σκληρότητας με αντοχή σε εφελκυσμό

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ο προσδιορισμός της σκληρότητας διείσδυσης είναι δυνατόν να συσχετιστεί με τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό (σ_t) του υλικού.

Ο συσχετισμός αυτός εφαρμόζεται στις περιπτώσεις εκείνες που ο προσδιορισμός με το πείραμα του εφελκυσμού είτε είναι ανέφικτος είτε δύσκολος.

Οι προσεγγιστικές σχέσεις που εφαρμόζονται για τις βασικές κατηγορίες μεταλλικών υλικών ενδιαφέροντος δομικού είναι :

- *Χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (< 1%)*
για σκληρότητα 120 - 175 HB $\sigma_t = 0,34 \text{ HB (kg/mm}^2 \text{)}$
- *Χαλκός, ορείχαλκος, μπρούτζος*
ανοπτημένος $\sigma_t = 0,55 \text{ HB (kg/mm}^2 \text{)}$
σκληρυμένος με παραμόρφωση $\sigma_t = 0,40 \text{ HB}$
- *Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου*
για HB μεταξύ 20 - 25 $\sigma_t = 0,33 - 0,36 \text{ HB}$
- *Ντουραλουμίνιο* $\sigma_t = 0,36 \text{ HB}$

Στον Πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται οι προσεγγιστικές σχέσεις μεταξύ σκληρότητας στις δύο βασικές κλίμακες μέτρησης και αντοχής σε εφελκυσμό. Οι αντιστοιχίες αυτές προσεγγίζουν την πραγματικότητα στην περίπτωση των χαλύβων μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα, π.χ. δομικοί χάλυβες.

Σκληρότητα Brinell	Σκληρότητα Rockwell		Αντοχή σε εφελκυσμό	
	Κλίμακα Β	Κλίμακα C	MN/m ² (MPa)	Kgf/mm ²
415		44,5	1416,5	144,4
388		41,8	1330,5	135,6
363		39,1	1220,2	124,4
341		36,6	1123,7	114,6
321		34,3	1047,9	106,8
302		32,1	985,8	100,5
285		29,9	937,6	95,6
269		27,6	882,4	90,0
255		25,4	834,2	85,0
248		24,2	813,5	82,9
241	100,0	22,8	785,9	80,1
235	99,0	21,7	765,2	78,0
229	98,2	20,5	751,4	76,6
217	96,4		710,1	72,4
212	95,5		689,4	70,3
207	94,6		682,5	69,6
201	93,8		668,7	68,2
197	92,8		648,0	66,1
192	91,9		634,2	64,6
187	90,7		620,5	63,2
183	90,0		613,6	62,5
179	89,0		606,7	61,8
174	87,8		592,9	60,4
170	86,8		579,1	59,0
167	86,0		572,2	58,3
163	85,0		565,3	57,6
156	82,9		551,5	56,2
149	80,8		503,3	51,3
143	78,7		489,5	49,9
137	76,4		461,9	47,1
131	74,0		448,1	45,7
126	72,0		434,3	44,3
121	69,0		413,6	42,2
116	67,6		399,8	40,8
111	65,7		386,1	39,4

2.6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Λαμβάνουμε τρία επίπεδα δοκίμια από μέταλλα διαφορετικής σκληρότητας. Ένα δοκίμιο δομικού χάλυβα, ένα δοκίμιο χαλκού και ένα δοκίμιο κράματος αλουμινίου. Και στα τρία δοκίμια μετρούμε την σκληρότητα με την μέθοδο και την συσκευή που περιγράφονται στη συνέχεια.

Η μέτρηση γίνεται σε 3 διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου και ως σκληρότητα λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων.

Στη συνέχεια το δοκίμιο του χάλυβα θα υποστεί τη διεργασία της βαφής. Αρχικά τοποθετείται σε φούρνο (Σχ. 5) που έχει ρυθμιστεί στους 763°C. Αφού παραμείνει για 20 λεπτά στο φούρνο, ακολουθεί η εμβάπτιση του στο λουτρό βαφής.



Σχ. 5. Φούρνος Εργαστηρίου Γενικού τμήματος Θετικών Επιστημών του ΑΤΕΙ Λάρισας

Το λουτρό βαφής μπορεί να είναι υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου 10 % w/w ή νερό. Μετά την ολοκλήρωση της βαφής το δοκίμιο του χάλυβα καθαρίζεται, σκουπίζεται και στη συνέχεια γίνεται εκ' νέου μέτρηση της σκληρότητάς του. Η νέα σκληρότητα μετά τη βαφή συγκρίνεται με την αρχική και υπολογίζεται το ποσοστό αύξησης της σκληρότητας του χάλυβα με τη διεργασία της βαφής.

Η μέτρηση της σκληρότητας των υλικών πραγματοποιείται με τη μέθοδο Vickers χρησιμοποιώντας τη συσκευή HMV-02 της εταιρείας SHIMADZU η οποία φαίνεται στο Σχ. 6.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Αρχικά ανοίγουμε τη συσκευή και τοποθετούμε το δοκίμιο που θέλουμε να μετρήσουμε στο έδρανο της συσκευής.
2. Στη συνέχεια επιλέγουμε το φορτίο το οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε, καθώς και το χρόνο άσκησης του φορτίου.
3. Από την οθόνη της συσκευής επιλέγουμε την έναρξη (START) της δοκιμής.
4. Στη συνέχεια με το μοχλό πάνω από το έδρανο τοποθετώ το αντικειμενικό φακό (40x) του μικροσκοπίου πάνω από το δοκίμιο στο σημείο όπου έχει εφαρμοστεί το φορτίο.
5. Τέλος αφού έχει εντοπισθεί το αποτύπωμα του διεισδυτή, γίνεται μέτρηση της διαγωνίου του αποτυπώματος χρησιμοποιώντας τους μοχλούς δεξιά και αριστερά του προσοφθάλμιου φακού.



Σχ. 6. Συσκευή μέτρησης σκληρότητας με τη μέθοδο Vickers (SHIMADZU HMV-02)

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων γίνεται αξιολόγηση της σκληρότητας των διαφόρων υλικών (χάλυβας, βαμμένος χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός).