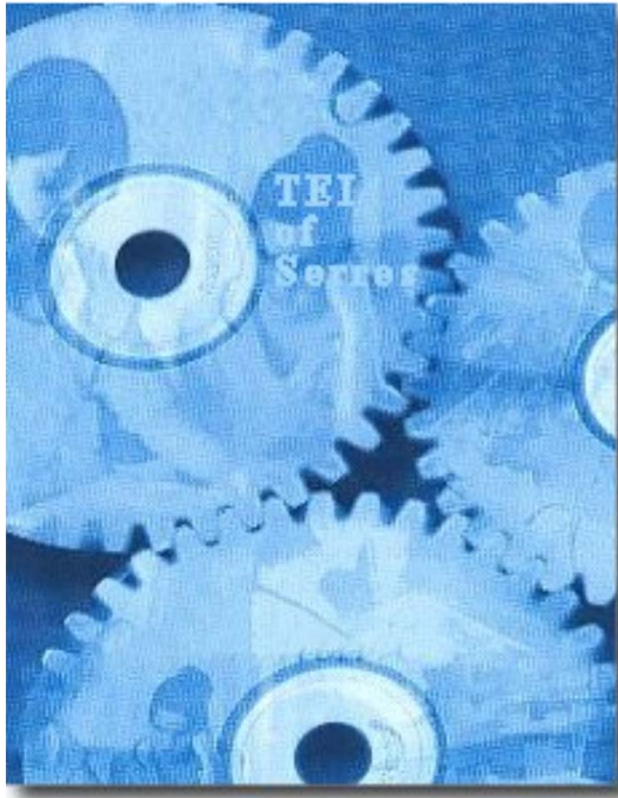


Μάθημα: Πειραματική αντοχή των υλικών

Σκληρομετρήσεις



Κατασκευαστικός Τομέας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών

Με τον όρο «**σκληρότητα**» ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα στην προσπάθεια διείσδυσης κάποιου άλλου σκληρότερου εισβολέα υπό φορτίο.

Γενικά, μία δοκιμή σκληρομέτρησης εκτελείται όταν ένας εισβολέας προκαθορισμένης γεωμετρίας και γνωστών μηχανικών ιδιοτήτων πιέζει το δοκίμιο που εξετάζεται. Η σκληρότητα του υπό δοκιμήν υλικού καθορίζεται μέσω μιας βαθμονομημένης κλίμακας σκληρότητας, η οποία προκύπτει από δοκιμές σε πρότυπα υλικά.

Η δοκιμή σκληρότητας αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο χαρακτηρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, καθώς:

- Είναι μια πολύ απλή μέθοδος, επομένως δεν χρειάζεται εξειδικευμένες γνώσεις
- Δεν απαιτεί ειδικής μορφής δοκίμια ή δύσκολη προετοιμασία
- Ο εξοπλισμός της δοκιμής είναι πολύ φθηνός
- Είναι πολύ γρήγορη μέθοδος
- Έχει πολύ καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα
- Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον ποιοτικό έλεγχο κομματιών παραγωγής

Υπάρχουν **τρεις μεγάλες κατηγορίες** των μεθόδων μέτρησης της σκληρότητας

- Μέτρηση σκληρότητας **μέσω διείσδυσης – Στατικές μέθοδοι**

Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση της σκληρότητας των μετάλλων

- Μέτρηση σκληρότητας **μέσω χάραξης**

Κυρίως στην ορυκτολογία (σκληρότητα διαμαντιού και πολύτιμων λίθων

- **Δυναμική** μέτρηση σκληρότητας

Εφαρμόζεται κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες και σε δοκίμια σύνθετης γεωμετρίας

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι λιγότερο διαδεδομένες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση σκληρότητας συγκεκριμένων υλικών, όπως το γυαλί ή τα ελαστικά

Ανάλογα με την κλίμακα μέτρησης και το φορτίο του διεισδυτή, οι μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας μπορούν να χαρακτηριστούν ως

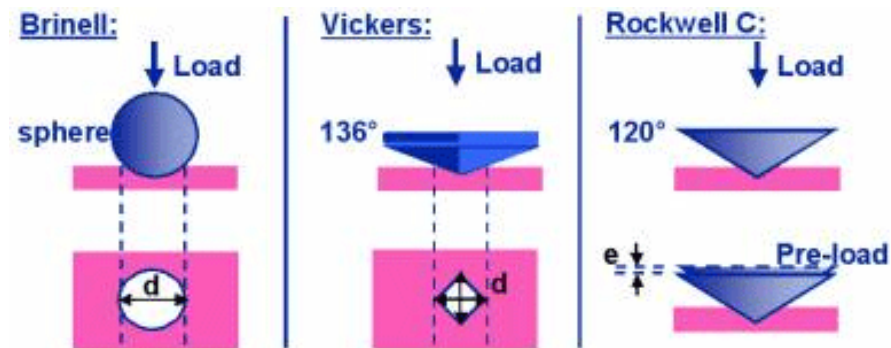
- **Μακροσκληρότητα** ($F_{max} = 50 \text{ N}$ ως 1500 N)
- **Μικροσκληρότητα** ($F_{max} = 2 \text{ N}$ ως 50 N) ειδικά για πολύ ψαθυρά υλικά
- **Νανοσκληρότητα** ($F_{max} = 1 \text{ mN}$ ως 1000 mN) για πολύ λεπτά φιλμ

Συνολικά υπάρχουν πολλές μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας, αλλά δεν υπάρχει κοινή κλίμακα. Είναι επομένως απαραίτητο κάθε μέθοδος που χρησιμοποιείται να συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά της.

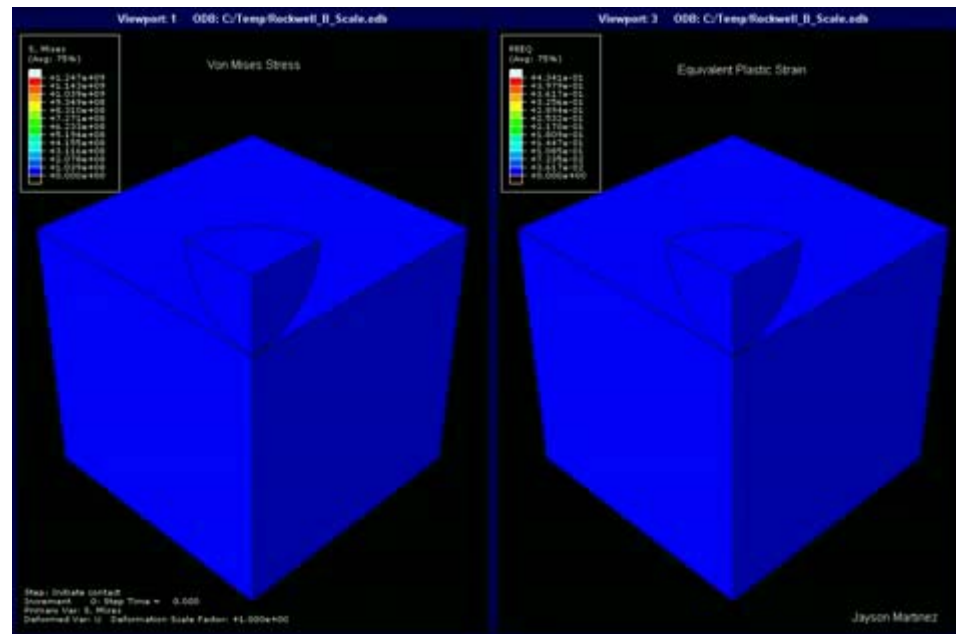
Στις στατικές μεθόδους μέτρησης της σκληρότητας, ένας εισβολέας από πολύ σκληρό χάλυβα ή από διαμάντι, κατάλληλη γεωμετρικής μορφής, πιέζεται από κάθετο φορτίο στο υπό εξέταση δοκίμιο.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι χαρακτηρισμού της σκληρότητας είναι:

- Η μέθοδος Brinell
- Η μέθοδος Vickers
- Η μέθοδος Rockwell





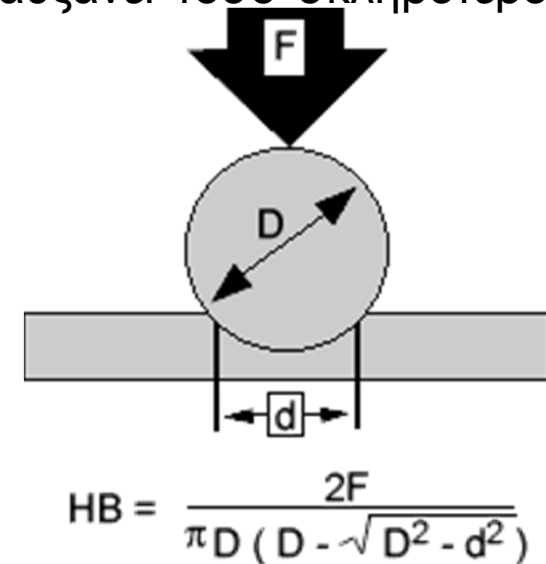


Κατά τη μέθοδο Brinell μια μικρή σφαίρα διαστάσεων 2.5, 5 ή 10 mm, πιέζεται με σταθερό φορτίο για καθορισμένο χρόνο (10 έως 30 s) πάνω στο δοκίμιο.

Μετά το πέρας του πειράματος, μετρώνται οι διαστάσεις του αποτυπώματος και η σκληρότητα υπολογίζεται με έναν προκαθορισμένο τύπο (βλ. σχήμα) και προκύπτει ένας αριθμός, π.χ. 356HB30 ο οποίος όσο αυξάνει τόσο σκληρότερο είναι το υλικό

Αν και η μέθοδος Brinell είναι διαδεδομένη, υπάρχουν ωστόσο αρκετοί περιορισμοί στην εφαρμογή της:

- Τα φορτία πρέπει να εκλέγονται ώστε να προκαλούν βάθος αποτυπώματος $>0.01D$ και $<0.15D$, στην πράξη είναι 500-3000 kg δύναμης
- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να έχει χαμηλή τραχύτητα, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το αποτύπωμα
- Η επιβολή του φορτίου πρέπει να είναι απολύτως κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου
- Ανάλογα με τη σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού, πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συνθήκες πειράματος και διαφορετικοί εισβολείς
- Η δοκιμή (30 s) και η προετοιμασία της επιφάνειας του δοκιμίου κάνουν τη δοκιμή χρονοβόρα, επομένως δύσκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία.



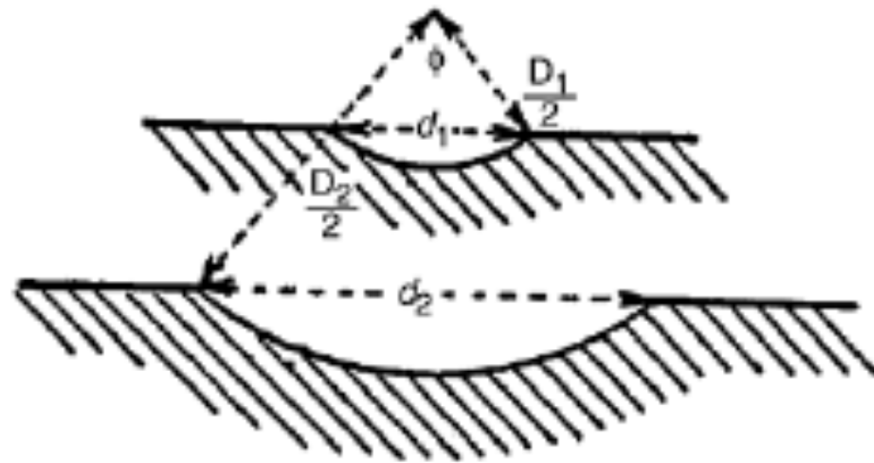
Για την εφαρμογή της μεθόδου Brinell με μικρότερα φορτία, αποδείχτηκε πειραματικά από τον Meyer ότι πρέπει να τηρείται γεωμετρική ομοιότητα στα αποτυπώματα.

Από τα πειράματα του Meyer αποδείχτηκε ότι

$$P/D^2 = k = \text{σταθερό}$$

Μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί διαφορετική σφαίρα, αρκεί ο λόγος P/D^2 να είναι σταθερός, ώστε η σκληρότητα να μπορεί να αξιολογηθεί στην ίδια κλίμακα Brinell.

Ως συμπέρασμα από τα παραπάνω, προκύπτει ότι **χρησιμοποιώντας την ίδια σφαίρα με διαφορετικό φορτίο, προκύπτει διαφορετική τιμή της σκληρότητας**. Επομένως είναι αναγκαίο να καταγράφονται οι συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος, πιο συγκεκριμένα: η σχέση φορτίου-διαμέτρου, η διάμετρος του σφαιρικού εισβολέα και ο χρόνος επιβολής του φορτίου. Π.χ. η σκληρότητα **356HB30** αναφέρεται σε λόγο $P/D^2=30$



$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d1}{D1} = \frac{d2}{D2}$$

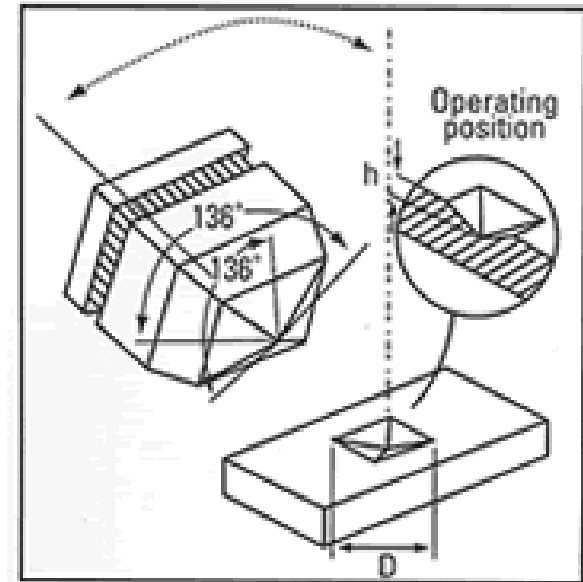
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου Brinell είναι:

- Ολόκληρο το φάσμα σκληροτήτων των διάφορων υλικών καλύπτεται από μία ενιαία κλίμακα, παρόλο που τα αποτελέσματα για να είναι συγκρίσιμα πρέπει να υπάρχει σταθερή σχέση φορτίου-διαμέτρου.
- Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί φορτίου-διαμέτρου που δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα, επομένως η μέθοδος έχει πολύ μεγάλη ευελιξία.
- Η δοκιμή είναι μη καταστροφική, το δοκίμιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.
- Λόγω της σφαιρικής μορφής του εισβολέα, είναι κατάλληλη για τον καθορισμό της σκληρότητας σε υλικά που έχουν μεγάλο μέγεθος κόκκων, όπως τα σφυρήλατα και τα χυτά.
- Με τη μέθοδο Brinell είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό.

Στη μέθοδο Vickers χρησιμοποιείται ως ειβολέας αδαμάντινη κανονική τετραγωνική πυραμίδα με γωνία των απέναντι εδρών 136° . Από τη διείσδυση δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα με διαγωνίους μήκους d_1 και d_2 . Αν d είναι η μέση τιμή των δύο διαγωνίων, η επιφάνεια του αποτυπώματος δίνεται από τη σχέση: $A=(d^2)/(2\cos 22^{\circ})$

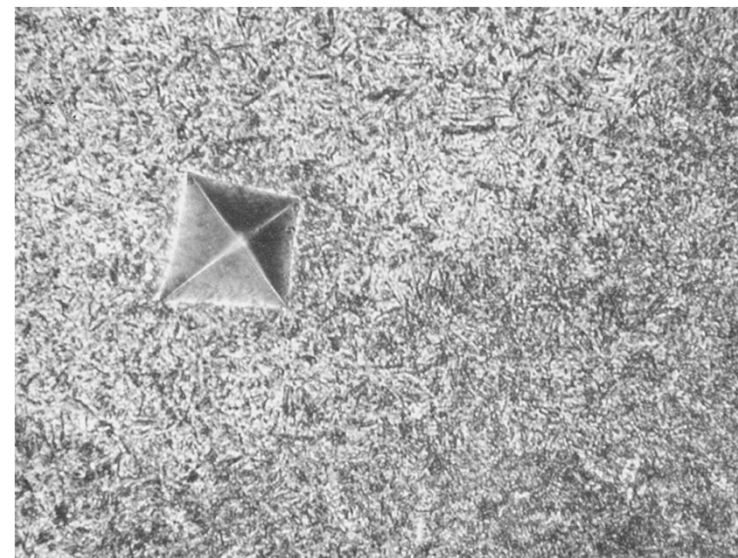
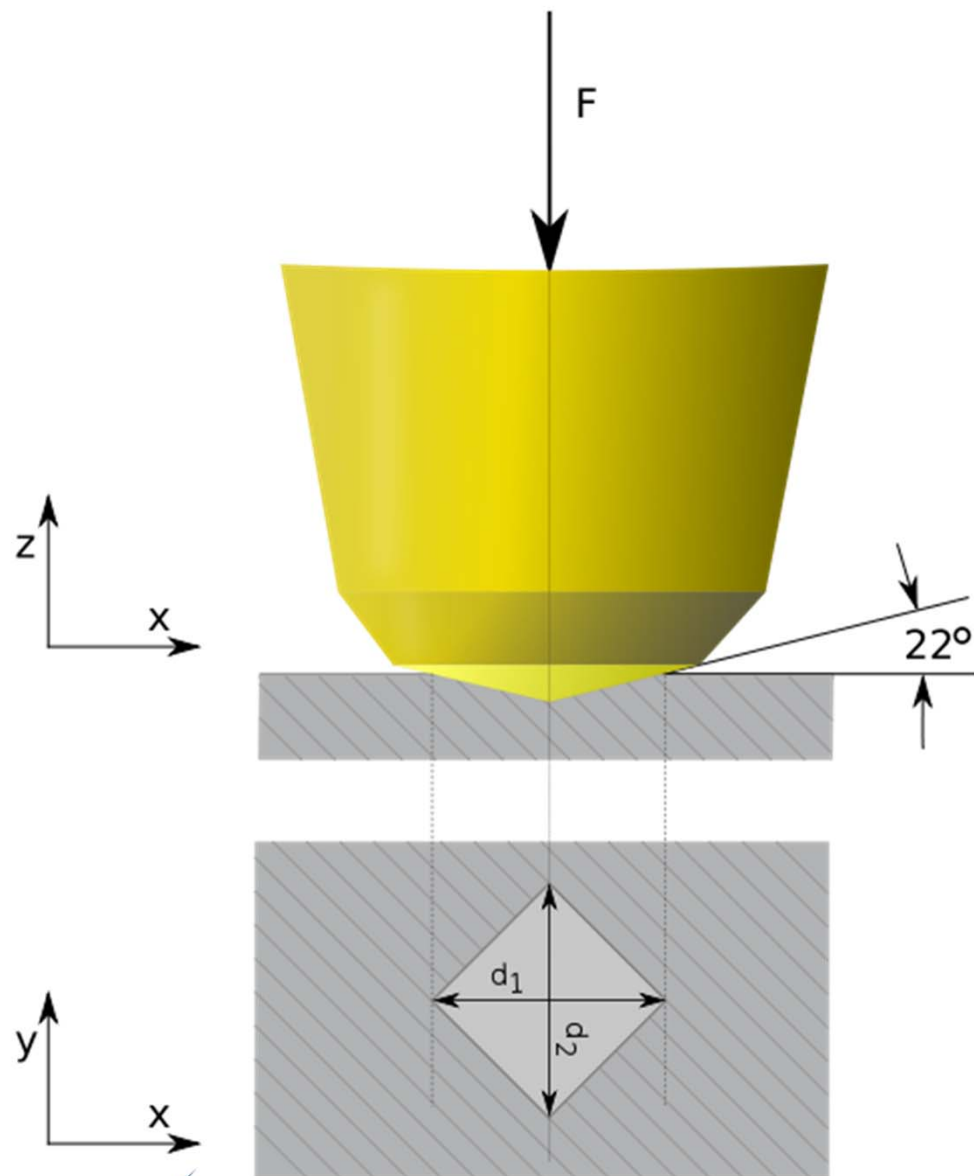
Έτσι ως αριθμός σκληρότητας για μέγιστο φορτίο διείσδυσης P προκύπτει από το λόγο P/A :

$$HV = \frac{0.1891P}{d^2} N / mm^2$$



Η δοκιμή αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Ο ειβολέας διεισδύει στο δοκίμιο υπό σταθερό φορτίο, το οποίο παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα (10-15 s)
2. Όταν περάσει ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου, ο ειβολέας απομακρύνεται και μετρώνται οι διαστάσεις των διαγωνίων του αποτυπώματος
3. Καθορίζεται η τιμή σκληρότητας σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, π.χ. $HV= 485$ γράφεται 485HV



Αποτύπωμα σε χαλύβδινο δοκίμιο

Μερικά από τα **πλεονεκτήματα** της μεθόδου Vickers είναι:

- Η σκληρομέτρηση Vickers εφαρμόζεται τόσο στην κλίμακα μακρο-σκληρότητας, όσο και στην κλίμακα μικρο- και νανο-σκληρότητας, λόγω της μορφής του εισβολέα και του τελικού αποτυπώματος, τα οποία δίνουν την ίδια τιμή σκληρότητας ανεξαρτήτως του φορτίου.
- Λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης σκληρότητας του αδαμάντινου εισβολέα, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μέταλλα, καθώς και σε πολύ σκληρά υλικά, όπως τα κεραμικά, οι βαμμένοι χάλυβες κ.α.
- Τα μήκη των διαγωνίων του αποτυπώματος είναι εύκολο να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια.
- Η παραμόρφωση του εισβολέα είναι αμελητέα ακόμα και για πολύ σκληρά υλικά

Τα σοβαρότερα **μειονεκτήματα** της μεθόδου Vickers είναι:

- Η δοκιμή είναι αργή και δύσκολα μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικό επίπεδο
- Οι επιφάνειες προς μέτρηση πρέπει να είναι καθαρές και να έχουν χαμηλή τραχύτητα.
- Τα μήκη των διαγωνίων του αποτυπώματος όταν μετρώνται με ανθρώπινο μάτι δεν είναι ακριβή.

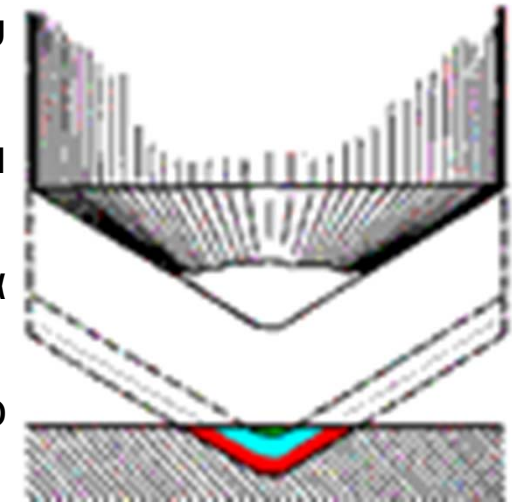
Η πιο διαδεδομένη στατική μέθοδος μέτρησης της σκληρότητας στη βιομηχανία είναι η δοκιμή Rockwell. Πρωτοχρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση σκληρότητας δακτυλίων εδράνων κύλισης στη βιομηχανία και από τότε καθιερώθηκε ως η πλέον γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος σκληρομέτρησης.

Υπάρχουν δύο παραλλαγές της μεθόδου ανάλογα με τον εισβολέα:

- Μέθοδος Rockwell C (HRC) με αδαμάντινο κώνο γωνίας κορυφής 120°
- Μέθοδος Rockwell B (HRB) με χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου $1/16''$

Στη μέθοδο αυτή μετριέται το βάθος διείσδυσης του εισβολέα με μονάδα μέτρησης $2 \mu\text{m}$.

1. Ο εισβολέας τοποθετείται χωρίς φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου
2. Ένα μικρό φορτίο (10kgf) εφαρμόζεται για να ξεπεραστούν οι επιφανειακές ανωμαλίες και καθορίζεται ένα επίπεδο αναφοράς
3. Εφαρμόζεται το κύριο φορτίο (150kgf) για 5 s και έπειτα απομακρύνεται
4. Μετριέται το τελικό βάθος του αποτυπώματος από το επίπεδο αναφοράς και προκύπτει ο αριθμός HRC, π.χ. 44HRC



Λόγω της διαφορετικής σκληρότητας των υλικών, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά φορτία και διαφορετικοί εισβολείς ανάλογα με το υπό εξέταση δοκίμιο. Οι εισβολείς είναι κώνος 120° ή σφαίρες 1/2, 1/4, 1/8 και 1/16".

Όνομα	Φορτίο	Εισβολέας	Χρήση
HRA	60 kgf	120° diamond cone	Tungsten carbide
HRB	100 kgf	1/16" steel sphere	Aluminium, brass, and soft steels
HRC	150 kgf	120° diamond cone	Harder steels
HRD	100 kgf	120° diamond cone	
HRE	100 kgf	1/8" steel sphere	
HRF	60 kgf	1/16" steel sphere	
HRG	150 kgf	1/16" steel sphere	

Μερικά από τα **πλεονεκτήματα** της μεθόδου Rockwell είναι:

- Γρήγορη δοκιμή, ένα πείραμα σκληρομέτρησης δεν κρατάει πάνω από 15 s, ενώ η μόνη προετοιμασία που χρειάζεται είναι ένας απλός καθαρισμός της επιφάνειας
- Άμεσο αποτέλεσμα με μεγάλη ακρίβεια, δεν χρειάζεται παρατήρηση γιατί η μέτρηση του βάθους γίνεται απευθείας στη συσκευή σκληρομέτρησης.

Τα σοβαρότερα **μειονεκτήματα** της μεθόδου Rockwell είναι:

- Χρειάζονται 30 κλίμακες για να καλύψουν όλο το φάσμα σκληροτήτων των υλικών
- Οι μετατροπές στις διαφορετικές κλίμακες εξαρτώνται από τα υλικά.



Τα περισσότερα σκληρόμετρα που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν εισβολέα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές κλίμακες σκληρότητας με ακρίβεια, ενώ έχουν και τη δυνατότητα εφαρμογής διαφορετικού φορτίου διείσδυσης.

Όλα τα σκληρόμετρα συνοδεύονται από πρότυπα πλακίδια συγκεκριμένης σκληρότητας για τη σωστή βαθμονόμηση της συσκευής.

Οι βιομηχανικές συσκευές μέτρησης της σκληρότητας (βλ. σχήμα) χρησιμοποιούν ένα σύστημα μέτρησης του βάθους του αποτυπώματος ώστε να εξαλειφθεί το σφάλμα μέτρησης λόγω ανθρώπινου παράγοντα και να μειωθεί δραστικά ο χρόνος της δοκιμής. Η αρχή λειτουργίας είναι αυτή της δοκιμής Rockwell C. Η ακρίβεια της μετατροπής σε διαφορετική κλίμακα συχνά διαφέρει από υλικό σε υλικό και χρειάζεται τις περισσότερες φορές επιπλέον διερεύνηση για να εισαχθεί ακριβέστερος συσχετισμός μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων σκληρότητας.



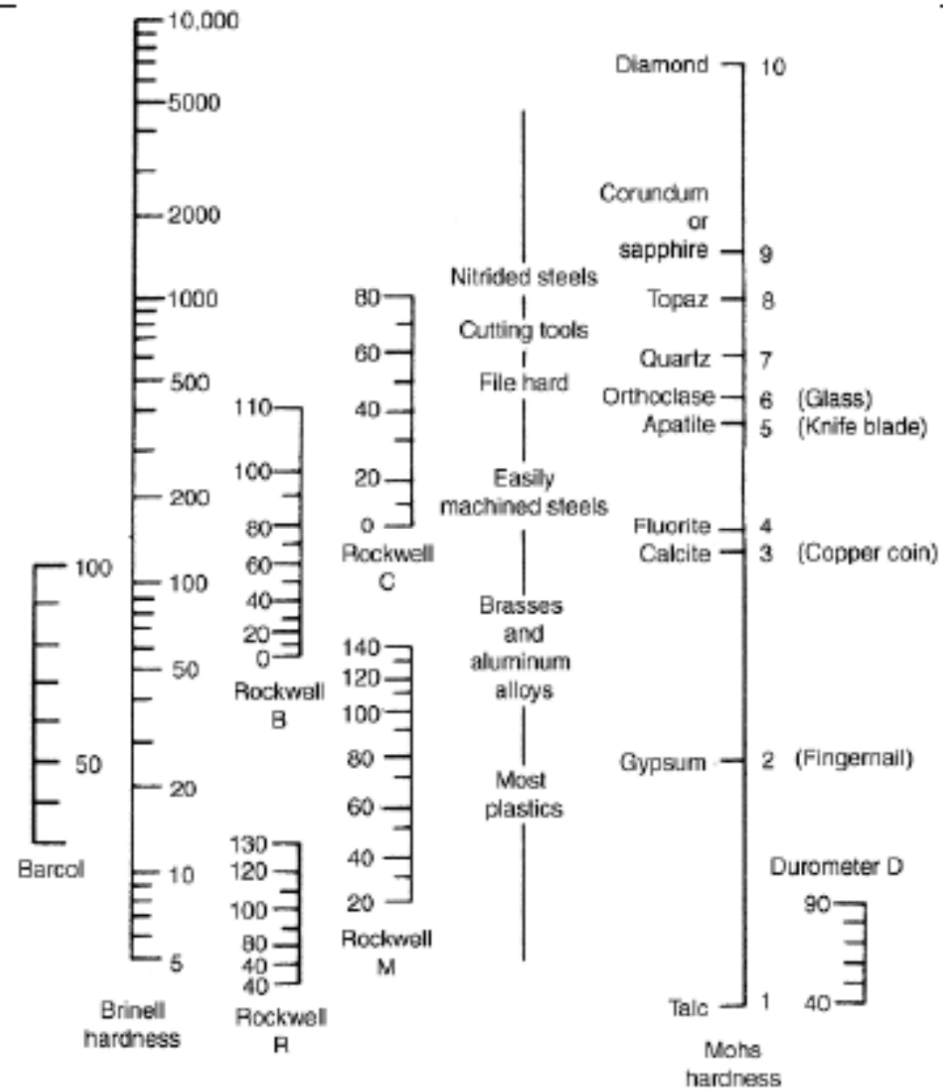
Άλλες πιο εξελιγμένες διατάξεις, που συνήθως χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακό επίπεδο, χρησιμοποιούν διατάξεις λήψης μικροφωτογραφιών και ειδικό λογισμικό ανάλυσης εικόνας για να προσδιορίσουν τη σκληρότητα βάσει μέτρησης της γεωμετρίας του αποτυπώματος.



ROCKWELL			SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL		VICKERS OR FIRTH DIAMOND HARDNESS NUMBER	SCLERO-SCOPE	TENSILE STRENGTH	
Diamond Brale			1/16" Bull	"N" Brale Penetrater			10 m/m Ball				
150 kgm C Scale	60 kgm A Scale	100 kgm D Scale	100 kgm B Scale	15 kg Load 15N	30 kg Load 30N	45 kg Load 45N	Diam. Of Ball Impression in m/m	Hardness Number		Equivalent 1000 lb. Sq. In.	
80	92	87		97	92	87			1865		
79	92	86			92	87			1787		
78	91	85		96	91	86			1710		
77	91	84			91	85			1633		
76	90	83		96	90	84			1556		
75	90	83			89	83			1478		
74	89	82		95	89	82			1400		
73	89	81			88	81			1323		
72	88	80		95	87	80			1245		
71	87	80			87	79			1160	99	
70	87	79		94	86	78			1076	98	
69	86	78		94	85	77			1004	97	
68	86	77			85	79			942	96	
67	85	76		93	84	75			894	95	
66	85	76		93	83	73			854	93	
65	84	75		92	82	72	2.25	745	820	91	
64	84	74			81	74	2.3	710	789	88	
63	83	73		92	80	70	2.3	710	763	87	
62	83	73		91	79	69	2.35	682	746	85	
61	82	72		91	79	68	2.35	682	720	83	
60	81	71		90	78	67	2.4	653	697	82	
59	81	70		90	77	66	2.45	627	674	80	326
58	80	69		89	76	65	2.55	578	653	78	315
57	80	69		89	75	63	2.55	578	633	77	304
56	79	68		88	74	62	2.6	555	613	75	294
55	79	67		88	73	61	2.6	555	595	74	287
54	78	66		87	72	60	2.65	534	577	72	279
53	77	65		87	71	59	2.7	514	560	71	269
52	77	65		86	70	57	2.75	495	544	69	261
51	76	64		86	69	56	2.75	495	528	68	254

Οι διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας είναι απαραίτητο να έχουν μια σύνδεση μεταξύ τους. Αυτό γίνεται μέσω μαθηματικής διερεύνησης της γεωμετρίας των διαφορετικών αποτυπωμάτων λαμβάνοντας υπόψη τις χαρακτηριστικές τιμές του υλικού του εισβολέα, ώστε να προκύψει ένας τύπος μετατροπής της σκληρότητας, π.χ. HRC=0.1 HB30.

Στην πράξη χρησιμοποιούνται έτοιμοι πίνακες μετατροπής, όπως αυτός του σχήματος.



Η σκληρότητα ενός υλικού μπορεί να χαρακτηριστεί και από την ελαστική επαναφορά ενός υλικού. Οι μέθοδοι με διείδυση εισβολέα (στατικές μέθοδοι) καθορίζουν τη σκληρότητα βάσει της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, ενώ οι δυναμικές μέθοδοι καταπόνηση συσχετίζουν τη σκληρότητα με την ελαστική απόκρισή του.

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι δυναμικής σκληρομέτρησης είναι η μέθοδος **Shore** και η μέθοδος **Leeb** (“Equotip”) στις οποίες ένας εισβολέας προσκρούει στο προς εξέταση υλικό. Μετριέται το ύψος αναπήδησης της σφαίρας και καθορίζεται η ενέργεια που χάθηκε κατά την πρόσκρουση.

Οι μέθοδοι αυτές είναι πολύ διαδεδομένες στη μέτρηση σκληρότητας των ελαστικών των αυτοκινήτων, καθώς και σε μετρήσεις δοκιμίων με πολύ μεγάλες διαστάσεις (που είναι δηλαδή δύσκολο να τοποθετηθούν στα σκληρόμετρα διείδυσης)



Σκληρομέτρηση με τη μέθοδο Leeb

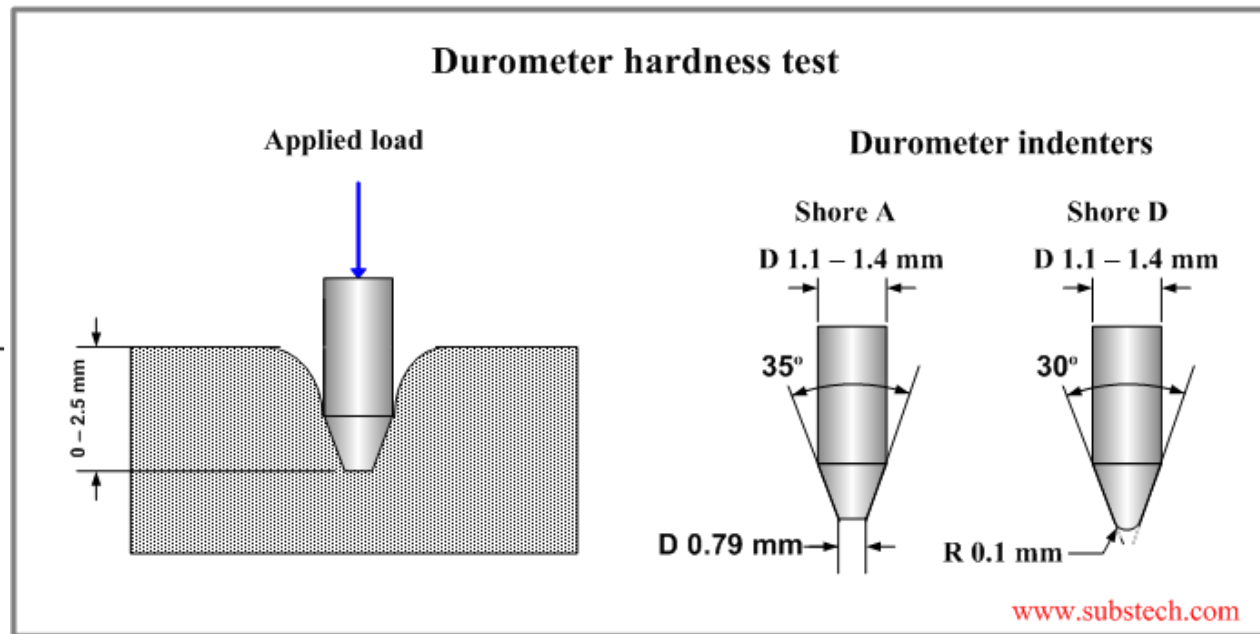
Με τη μέθοδο Shore καθορίζεται η σκληρότητα από το ύψος αναπηδήσεως μικρής σφύρας διαμέτρου 6.5 mm από ύψος 20 mm, η οποία καταλήγει σε μικρή αδαμάντινη αιχμή και **πέφτει ελεύθερα** στο προς εξέταση δοκίμιο. Το ύψος αναπήδησης μετριέται σε κλίμακα 146 υποδιαίρεσεων.

Επειδή το αποτύπωμα είναι πολύ μικρό, χρησιμοποιείται σε έτοιμα κομμάτια, αλλά τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δοκιμίου και το είδος στήριξης. Επομένως το δοκίμιο πρέπει να στηρίζεται κατάλληλα, ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση.

Με τη μέθοδο Shore είναι δυνατόν να καθοριστεί πλήρως το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$$E = \frac{0.0981(56 + 7.66S)}{0.137505(254 - 2.54S)}$$

Όπου S είναι η σκληρότητα στην κλίμακα Shore



Η μέθοδος Leeb είναι μια σύγχρονη μέθοδος που εξελίχθηκε μόλις το 1975, ώστε να προσφέρει φορητότητα και ταχύτητα στη μέτρηση σκληρότητας για μεγάλα τεμάχια.

Χρησιμοποιεί μια σφαίρα από σκληρό καρβίδιο η οποία αναπηδά με τη δύναμη ενός προεντεταμένου ελατηρίου αντί για τη δύναμη της βαρύτητας (βλ. Shore).

Συχνά αναφέρεται ως “Equotip” από την ονομασία της συσκευής σκληρομέτρησης.

Ένα ηλεκτρονικό αισθητήριο μετρά την ταχύτητα της σφαίρας πριν και μετά την πρόσκρουση στο δοκίμιο. Η τιμή της σκληρότητας Leeb είναι ο λόγος της ταχύτητας μετά προς την ταχύτητα πριν την πρόσκρουση επί 1000. Η τιμή αυτή μπορεί να συσχετιστεί με άλλες κλίμακες σκληρότητας όπως π.χ. η Rockwell και η Vickers.

Επειδή η συσκευή είναι ηλεκτρονική, η μετατροπή γίνεται αυτόματα και έτσι μπορούν να μελετηθούν πολλών ειδών υλικά. Ο κυριότερος περιορισμός είναι ότι το προς εξέταση τεμάχιο πρέπει να έχει σχετικά λεία επιφάνεια και βάρος μεγαλύτερο των 5 kg. Οι συσκευές Equotip είναι φορητές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές γωνίες, αρκεί να βρίσκονται κάθετα με την προς δοκιμή επιφάνεια.

