

ANYAGOK KÁROSODÁSA ÉS VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

KEMÉNYSÉGMÉRÉS

VARGA FERENC

Kossuth Lajos Tudományegyetem Műszakai Főiskolai Kar

TÓTH LÁSZLÓ

Bay Zoltán Intézet

GUY PLUVINAGE

University of Metz (Franciaország)

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc
- 1999 -

Kiadja a Miskolci Egyetem

A kiadásért felelős: *Dr. Tóth László*

Műszaki szerkesztő: *Dr. Tóth László*

Példányszám: 40

Készült Colitó fóliáról az MSZ 5601-59 és 5602-55 szabványok szerint

Miskolci Egyetem Sokszorosító Üzeme

A sokszorosításért felelős: *Kovács Tiborné*

TB. - '99- 4 - ME

A levonat sokszorosításba leadva: 1999. május 15.

ELŐSZÓ

Minden történelmi korszak fejlődésének megvan a maga hajtóereje. Míg a XIX. században a tudomány előrehaladását egyértelműen a vasúti közlekedés robbanásszerű elterjedése hatotta át (évente átlagosan 10.000 km hosszágban építettek új vasútvonalakat), addig jelen korunkban a mikroelektronika adta lehetőségek szőtték át a mindennapjainkat, így a műszaki életünket is, szolgáltatva annak fejlődéséhez szükséges hajtóerőt. E két periódus fejlődésének sajátosságai természetesen megmutatkoztak a társadalmi struktúra formálódásában is. Az elmúlt században kialakult a nagyüzemi munkásság, megvalósult a tőke koncentrációja és létrejött a reál - dominánsan a műszaki - tudomány művelőinek népes tábora. Ez utóbbiak kivívták maguknak a széles társadalmi elismertséget, hisz tevékenységük közvetlenül hozzájárult a társadalom látható fejlődéséhez. Napjaink sajátossága az *információs társadalom* kialakulása, amelyben a mikroelektronikai elemek fejlődése átszövi a mindennapi életünk, tevékenységünk lehetőségeit. A műszaki életben ez többek között a számítástechnika robbanásszerű elterjedését, a diagnosztikai vizsgálatok eszközparkjának átalakulását, az anyagok viselkedésének, tulajdonságainak mélyebb megismerését szolgáló anyagvizsgálati módszerek, eszközök létrejöttét eredményezték. A fejlődés ütemét jól tükrözi az, hogy mindez az utóbbi 20 évben következett be (pl. a számítógépek mikroprocesszorainak műveleti sebessége 1978-1998 periódusban 3 nagyságrendet változott!).

A nagy értékű műszaki létesítményeket, szerkezeteket (hidakat, erőműveket, gázolajfeldolgozó rendszereket, vegyipari üzemeket, tranzit energiaszállító vezetéseket, repülőgépeket, hajókat, stb.) 15-50 éves üzemeltetésre tervezik az adott periódusban érvényben levő szabványok, műszaki irányelvek figyelembevételével. Ezekben pedig az azt megelőző néhány év ismeretszintje, technológiai színvonala testesedik meg. A mikroelektronika által diktált fejlődési ütem lehetővé teszi azt, hogy a nagy értékű szerkezetek, létesítmények üzemeltethetőségi feltételeit, maradék élettartamát egyre nagyobb megbízhatósággal becsüljük, azaz integritását egyre kisebb kockázattal ítéljük meg.

Az előzőkből adódóan kialakult egy új, diszciplína, a „*szerkezetek integritása*”, vagy „*szerkezetintegritás*” fogalma és létrejött intézményrendszere szerte a világon. A döntően mérnöki ismereteket integráló tudományterület feladata annak eldöntése, hogy egy adott szerkezet, létesítmény milyen feltételek mellett üzemeltethető a továbbiakban, ill. mennyi a maradék élettartama és ez milyen módon menedzselhető. Ahhoz a szerkezet állapotát a lehető legnagyobb biztonsággal felmérhessük - ebből adódóan a további üzemeltethetőség feltételeit a legkisebb kockázattal megbecsüljük - elengedhetetlen az, hogy

- *diagnosztikai vizsgálatokkal felmérjük a szerkezet állapotát,*
- *tisztázzuk a valóságos üzemi körülményekre jellemző mechanikai állapotot,*
- *megítéljük a beépített anyagok károsodásának folyamatát és mértékét az adott üzemeltetési feltételek mellett.*

Nyilvánvaló egyrészt az, hogy az előzőekben említett három fő terület (méréstechnika - mechanika - anyag) egyforma jelentőséggel bír a szerkezet integritásának megítélésében és bármelyik terület elhanyagolása, súlyának csökkentése hibás döntéshez, esetleg katasztrófákhoz vezethet. Nyilvánvaló másrészt az, hogy minden műszaki döntésben, így az üzemeltethetőség feltételeinek megítélésében is, bizonyos kockázat rejlik, hisz a tudomány adott szintjét hasznosítjuk és a rendelkezésre álló eszközpark maga is az adott kor színvonalát képviseli. Ebből

adódóan mérlegelni kell az esetleges hibás döntés műszaki, jogi, közgazdasági és környezetvédelmi következményeit. Ezek együttes figyelembevételével viszont már kialakíthatók az ésszerű kockázatvállalás feltételei.

A szerkezetintegritás tehát egy igen komplex terület. Akik ezt művelik azoknak képesnek kell lenniük arra, hogy az üzemelthezőséggel kapcsolatos problémákat teljes körűen átlássák, kiemeljék a meghatározó paramétereket, kérdéscsoportokat és alkalmasak legyenek arra, hogy az érintett tudományterületek szakembereivel érdemben szakmailag konzultálni tudjanak.

A szerkezetek integritásának, reális állapotának, maradék élettartamának megítélése mind az üzemeltetők, mind pedig a biztosítótársaságok alapvető érdeke. Az üzemeltető szempontjából a tudatos tervezés, fejlesztés megkerülhetetlen sarokpontja az üzemben levő készülékek műszaki állapota, biztonsága; a szükséges biztosítás tekintetében pedig az ésszerű kockázatvállalás, biztosítási összeg alapeleme a reális állapot ismerete. Ezek jelentőségét mérlegelve támogatta az Európai Unió a TEMPUS program keretében a „*Teaching and Education in Structural Integrity in Hungary*” címmel összeállított pályázatot, amelynek fő célkitűzése ezen új diszciplína meghonosításán kívül egyrészt a szerkezetintegritás oktatási anyagainak kidolgozása, másrészt a **Szerkezetintegritás - Biztosítási Mérnök Szakmérnöki Szak** beindítása. A négy hazai intézmény - Miskolci Egyetem, Budapesti Műszaki Egyetem, Kossuth Lajos Tudományegyetem Műszaki Kara és a Széchenyi István Műszaki Főiskola szakembereinek bevonásával elérendő célok megvalósítását nagyban segítették a következő külföldi partnereink:

- Prof. T. Varga, Bécsi Műszaki Egyetem
- Prof. H. P. Rossmann, Bécsi Műszaki Egyetem
- Dr. J. Blauel, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
- Prof. S. Reale, Università Degli Studi di Firenze
- Prof. G. Pluvinage, University of Metz, e-fűzet társszerzője
- Dr. S. Crutzen, Joint Research Centre, European Commission

Miskolc, 1999. május 8.

Tóth László

egyetemi tanár
a projekt koordinátora

Tartalomjegyzék

ELŐSZÓ	1
Bevezetés	4
1. Történeti áttekintés	6
2. A leggyakrabban használatos keménységmérési eljárások	7
2.1. Brinell keménységmérés	10
2.2. Vickers keménység mérése	12
2.3. Rockwell keménység mérése	13
2.4. Szuper-Rockwell keménységmérés	13
2.5. Egyéb eljárások, követelmények – egyéb anyagok. Dinamikus vizsgálat	14
2.6. Néhány megjegyzés a hagyományos módszerekhez	17
3. Erő-elmozdulás mérésén alapuló eljárások	19
3.1. Módosított szerszámgeometria alkalmazása	19
3.2. A benyomódási munka elemzésével	21
3.2.1. A fajlagos benyomódási munka számítása Brinell keménységmérésnél	21
3.2.2. A fajlagos benyomódási munka számítása Vickers keménységmérésnél	24
3.3. A fajlagos benyomódási munka értéke különböző anyagoknál	26
3.3.1. A különböző anyagjellemzők kapcsolata	26
3.3.2. A vizsgálati eredmények és az anyagjellemzők kapcsolata	27
3.3.2.1. A Mayer-féle kifejezés a paramétere és a keménység közötti kapcsolat	27
3.3.2.2. A fajlagos benyomódási munka és a keménység kapcsolata	28
4. Az anyagok valós keménységének fogalma	29
4.1. A Brinell és Vickers eljárással meghatározott valós keménységek kapcsolata	31
4.2 A keménységmérés során befektetett munka	32
5. A szilárdsági-, alakváltozási jellemzők és a keménység kapcsolata	33
6. IRODALOM	34

1. Történeti áttekintés

Mint az előszóban már említettük a statikus anyagvizsgálati módszerek közül az egyik legáltalánosabb a keménységmérés - nevezetesen az anyagoknak egy mérőtest behatolásával szembeni ellenállásának meghatározása. A leggyakrabban alkalmazott módszereket, azok jellemzőit az 1. Táblázat foglalja össze időrendi sorrendben.

Statikus benyomódási keménység meghatározása 1. táblázat

Szerző, név műszer	Működési elv összefüggés	Mérendő paraméter kiszámítási módszer és viszonyszám
Hertz (1881)	Gömb és mérendő anyag érintkezése a képlékeny maradó deformáció eléréséig v. repedéséig	$H_r = 6 \frac{P}{d^2} \pi$
Brinell prés (1900)	Keményre edzett acélgolyó benyomása; Ø 1,25; 2,5; 5; vagy 10 mm 15,65-3000 kg; képlékeny lenyomat keletkezik	A keménységet a lenyomat átmérőivel számolja $HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Shore monotron	Gyémántgolyó Ø 0,75 mm, vagy acél-golyó Ø 1/16"; 2,5 mm és a szabványos mélység: 0,045 mm	A keménység mértékét az a terhelés jelenti, amely szükséges a mérőtestnek szabványos mélységig történő benyomásához
Ludvig (1907)	90°-os acélkúp benyomása az anyagba	A keménység mérőszámát a terhelőerő és a vetületterület viszonya adja meg
Rockwell és szuper Rockwell mérés (1922)	120°-os gyémántkúp vagy 1/2"; 1/4"; 1/8"; 1/16" -os acélgolyók benyomása terhelés- ekkel; 150-100-60 kg vagy a szuper Rockwell esetén 45-30-15 kg	A keménység meghatározása a benyomódási mélység alapján történik, figyelembe véve az előterhelés hatását
Vickers mérés (1925)	136°-os lapszögű gyémántgúla benyomása 1-120 kg terheléssel	A keménységet a terhelés és a benyomódás felületének viszonya adja $HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$
Drozd (1958)	P golyóterheléssel méri a benyomódás h mélységét és az anyag folyáshatárából Ø d-vel számítható erőértékeket levonva kapja a keménységet	$H = \frac{P - P_s}{H\pi h}$
Káldor M- Bárczy P: (1967) [4]	Vickers normálkeménységet határoznak meg az anyagra jellemző n érték segítségével és ez a HN (normál-keménység) független a terhelőerőtől	$HN = 1,8544 \frac{P}{d^n}$
Brunner, G.G.- Schimmer L. (1978)	A parabolid geometriájú gyémánt be- nyomódó test [2] benyomódási mélységét méri az erő függvényében és az a kapcsolat lineáris - függetlenül az anyag-minőségétől	$HW_{szil} = \frac{F_p(y)}{y}$, ill. $HW_{szil} = C(1 - \frac{y_0}{y})$ y_0 max. behatolási mélység y maradó behatolási (képlékeny) mélység C gépállandó

A különböző eljárások jellegzetességeit összefoglalva a következő megállapítások tehetők:

- az eljárások egyik csoportja egy adott nagyságú terhelőerő és az általa létrehozott lenyomat felületének viszonyát tekinti mérőszámnak,
- míg a másik csoport az adott geometriájú szerszám adott erő hatására létrejövő mélységirányú elmozdulását tekinti mérőszámnak.

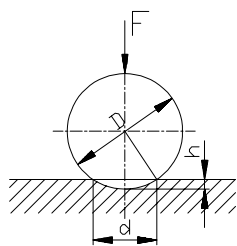
A rövid táblázatos áttekintés csupán azon eseteket foglalja össze, amikor új elv, eljárás, szerszám vagy a keménység eddigiektől eltérő módon történő értelmezése vált ismeretessé.

2. A leggyakrabban használatos keménységmérési eljárások

Napjainkban a gyakorlatban legáltalánosabban az ún. szűrő keménységvizsgáló eljárásokat alkalmazzák. E vizsgálatok során meghatározott alakú és méretű tárgyat ugyancsak meghatározott nagyságú erővel nyomnak a vizsgálandó anyagba. A szűrőkeménységvizsgálatok közül általánosan használt a Brinell-, Vickers- és Rockwell-féle keménységmérő eljárás.

2.1. Brinell keménységmérés

Ha a vizsgált munkadarab felületébe - a felületre merőleges erővel - golyó alakú szűrőszerszámot nyomunk, a keletkezett lenyomat gömbsüveg lesz. Az 1. ábra jelöléseivel a gömbsüveg felülete $D \pi h$, ahol D a golyó átmérője, h a gömbsüveg magassága. Ezzel a HB-vel jelölt Brinell-keménység: $HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h}$



1. ábra. A Brinell-vizsgálat elvi vázlata

A mértékegységek nemzetközi rendszerének (SI) hatályba lépése óta a benyomódást létesítő erőt N-ban kell mérni, ennek következtében a benyomódás felületének egységére vonatkoztatott keménységértékek, a **HB** és **HV** keménységi számok kereken egy nagyságrenddel nagyobbak lennének a megszokottnál azért, hogy ezek ne változzanak meg, a terhelőerőt N-ban mérik, megszorozzák $1/9,80655 = 0,102$ -vel. Az így kiszámított **HB** és **HV** értékek megegyeznek a megszokottakkal, amelyeknek kp/mm^2 volt a dimenziójuk. Ezt a dimenziót az új rendszerben nem használják, hanem a keménységet mértékegység nélküli számnak tekintik.

A fentiek alapján tehát:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{D \cdot \pi \cdot h} \quad \text{ha a terhelő erő, az } F \text{ értéke N-ban adott.}$$

A gömbsüveg magassága (**h**) közvetlenül nem mérhető, de a golyó átmérőjéből (**D**) és a lenyomat jól mérhető átmérőjéből meghatározható

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Ezzel a Brinell keménység kiszámítására az alábbi összefüggés szolgál:

$$HB = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{D \cdot \pi(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

A vizsgálatához használt szabványos golyók 10; 5; 2,5; 2; és 1 mm átmérőjűek. A golyó keménységét szabvány írja elő (850 HV).

A golyó átmérőjét a tárgy vastagsága szabja meg, tekintettel arra, hogy ha vékony lemezeknél nagy átmérőjű golyót használunk, vagy a lenyomat átmérője lesz túlságosan kicsi és így nem mérhető pontosan, vagy pedig ha a golyó túlságosan mélyen hatol be a tárgyba, akkor a keménységmérés eredménye nem lehet pontos, mert a tárgytartó keménysége a mérés eredményét befolyásolja. Éppen ezért a tárgy (próbatest) olyan vastag legyen, hogy a vizsgálat után a hátoldalon a benyomódás semmilyen alakváltozást ne okozzon. Ennek érdekében a próbatest legkisebb vastagsága a benyomódás mélységének legalább tízszerese legyen.

A golyóátmérőt és a hozzá tartozó terhelést úgy kell megválasztani, hogy a lenyomat átmérője $0,25 D \leq d \leq 0,6 D$ legyen.

A vizsgálati terhelést a terhelési tényező (**K**) és a golyóátmérő függvényében határozzák meg.

$$F = \frac{K \cdot D^2}{0,102} \quad [\text{N}]$$

illetve $F = K D^2$ [kp]

A **K** terhelési tényező dimenziója N/mm^2 , (illetve kp/mm^2) amelynek értékeit a szokásos anyagminőségek esetében a 2. Táblázat foglalja össze.

A Brinell keménység nem független az alkalmazott terhelőerőtől. Meyer mérései szerint egy meghatározott átmérőjű golyót különböző nagyságú erővel benyomva az anyagba, nem mindig ugyanazt a HB értéket kapjuk. Ezt fejezi ki a róla elnevezett hatványtörvény, amely szerint a terhelőerő és a lenyomat átmérője között az

$$F = a d^n$$

összefüggés áll fenn.

Az **a** és **n** anyagjellemzők Az **n** értéke az anyagminőségtől függően 1,8 és 2,4 között változik. Ha az $n = 2$ középértéket vesszük és ezt a hatványtörvénybe helyettesítjük, kapjuk, hogy

$$d^2 = \frac{F}{a}$$

Beírva a fenti kifejezést összefüggést a Brinell-keménység számításának összefüggésébe

$$HB = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{D \cdot \pi \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - \frac{F}{a}} \right)}$$

adódik, amiből nyilvánvaló, hogy F értéke nem esik ki, tehát a keménység értéke az erő értékétől is függ: **HB = f(F)** ezért kell a vizsgálat adatait pontosan előírni.

A terhelési tényező értékei különböző anyagokra 2. táblázat

Golyóátmérő	Terhelés F [N] (F=KxD ² , kp)				
	D (mm)	K=30	K=10	K=5	K=2,5
10	29430 (3000)	9800 (1000)	4900 (500)	2450 (250)	980 (100)
5	7355 (750)	2450 (250)	1225 (125)	613 (62,5)	245 (25)
2,5	1840 (187,5)	613 (62,5)	306,5 (31,2)	153,2 (15,6)	61,6 (6,2)
2	1176 (120)	392 (40)	196 (20)	98 (10)	39,2 (4)
1	294 (30)	98 (10)	49 (5)	24,5 (2,5)	9,8 (1)
Vizsgálható anyagok	acél, nagyszilárdságú ötvözetek, öntöttvas	réz, nikkél és ötvözetek	Alumínium, magnézium és ötvözetek	Csapágy-ötvözetek	ón, ólom
HB-keménység	96 ... 450	32 ... 200	16 ... 100	8 ... 50	3,2 ... 20

A Brinell-vizsgálat eredményét a kísérlet időtartama is befolyásolja. Ennek oka az, hogy minden maradó alakváltozásnál az alakváltozás csak egy bizonyos idő után jut nyugalmi állapotba. Ez az idő annál rövidebb, minél lassabban folyt le a terhelés. A Brinell vizsgálatnál a terhelőerőt 0-ról 15 sec alatt növeljük fel a vizsgálatnak megfelelő értékekre, majd a terhelést még egy ideig rajta tartjuk a vizsgálati darabon. Ez az idő az anyag keménységének függvénye, minél keményebb az anyag, az idő annál kisebb. A szokásos értékek:

- acél anyagnál 15 sec
- alumínium és réz ötvözetek 30 sec
- szín alumínium, réz 120 sec
- ólom, ón és ötvözetek 180 sec.

Az előzőkből következik, hogy a vizsgálat feltételeinek megadásához három adat kell: a terhelőerő nagysága, a golyó átmérője és az időtartam, amíg a maximális terhelőerő rajta volt a darabon. Csak azok a keménységmérések adnak egymással teljesen összemérhető értéket, amelyeknél ez a három adat ugyanaz.

2.2. Vickers keménység mérése

A Brinell-keménységmérés hibája, hogy a golyó átmérőjétől és a terheléstől függ a HB nagysága és így nem ad eléggé jól összehasonlítható értékeket. Ezen kívül nagyobb keménységű anyagok mérésére a golyó torzulása miatt nem alkalmas.

A Vickers-keménységmérés részben kiküszöböli a Brinell-vizsgálat hibáit:

- szúrószerszáma gyémántból készül és így a legkeményebb anyagok vizsgálatára alkalmas,
- a szerszám és az alkalmazott terhelés olyan kicsi, hogy alig észrevehető nyomot hagy, ezért legtöbbször kész tárgyak is károsodás nélkül vizsgálhatók,
- a kis terhelés miatt nem töri át a vékony kérget, tehát cementált felületek keménysége is megmérhető vele,
- a lenyomat felülete arányos az erővel és így az alkalmazott terhelés – bizonyos határok között – nem befolyásolhatja a mért keménységi értéket. A 100 – 300 N között különböző terheléssel mért Vickers keménységek (HV) egymás között összehasonlíthatók.

A Vickers keménységméréshez használt szúrószerszámot úgy alakították ki, hogy a vele mért keménységértékek a lehetőség szerint egyezzenek meg a vizsgált darab Brinell keménységével. A Brinell golyó lenyomata $0,25 D \leq d \leq 0,5 D$ értékű, mint leggyakoribb értéket a középértéket $d = 0,375 D$ véve számításba, a gömbhöz a lenyomati kör mentén szerkesztett négyzet alapú gúla lapszöge 136° -nak adódik (3.a ábra)

A Vickers keménységmérés szúrószerszáma egy olyan négyzet alapú egyenes gyémánt gúla, amelynek lapszöge 136° .

Vickers-keménységen a Brinell keménység fogalmához hasonlóan a terhelőerő és a gúla alakú lenyomat felületének viszonyát értjük.

$$HV = \frac{F}{S}$$

A lenyomat felülete a 2. ábra alapján az ABC háromszögből

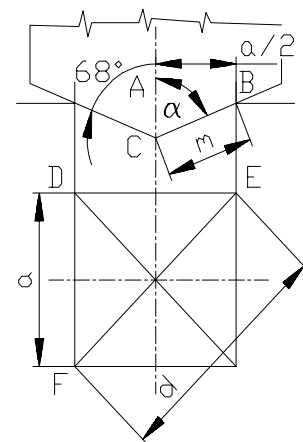
$$m = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha}$$

ezzel

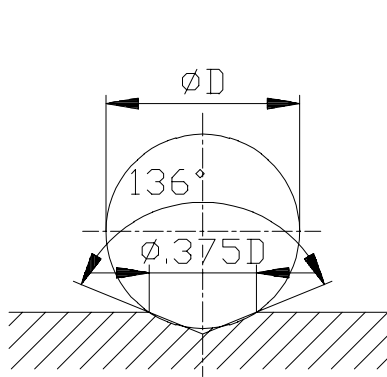
$$S = 4 \cdot \frac{a \cdot m}{2} = \frac{4 \cdot a}{2} \cdot \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{a^2}{\sin \alpha} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin \alpha}$$

A gyakorlatban azért nem a , hanem d értékével számolunk, mert a lenyomat oldalélek metszéspontja a kivetített képen határozottabban látszik, mint maga az oldal és így d pontosabban mérhető. Azért, hogy az anyag esetleges anizotrópiája a mérés eredményét nem befolyásolja, az egymásra merőleges d_1 és d_2 átlót mérjük és d ezek számtani közepe:

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

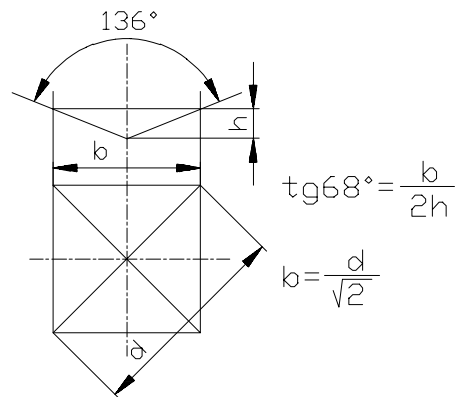


2. ábra A Vickers lenyomat felülete



3. a ábra

A Vickers-gyémánt lapszögének megállapítása



3. b ábra

A Vickers-keménységmérés lenyomatának geometriai alakja

Az EDF háromszögből $d^2 = 2a^2$ adja meg a és d között a kapcsolatot: $\alpha = 68^\circ$ így

$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,854}$$

Így a terhelőerőt N -ban, d -t mm-ben mérve és biztosítva, hogy a mérőszám megegyezzen a korábban kp/mm^2 -ben megadott értékkel

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,854 \cdot 0,102 \cdot F}{d^2} = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

A Vickers keménységet a keménység számértékével és **HV** betűkkel kell jelölni, ha a terhelés 294 N (30 kp) és a terhelési idő 15 sec.

A lenyomat átlóit 0,001 mm pontossággal kell mérni. A vizsgálathoz a felületet elő kell készíteni. A felület simaságának olyannak kell lennie, hogy a megmunkálási barázdák a leolvasás pontosságát ne rontsák. Kis terhelésű vizsgálatnál a pontos mérés érdekében a felületet tükrösíteni kell. Az előkészítés során - intenzív hűtéssel - akadályozzuk meg, hogy a darab felmelegedjen és ezáltal keménysége megváltozzon.

A Vickers keménységmérést görbe felületnél is lehet alkalmazni, de a görbültség függvényében mért értéket korrigálni kell. A gyakorlatban a **HV** értéket nem számoljuk, hanem táblázatból olvassuk ki az **F** erő és a **d** méret függvényében.

A Vickers-féle keménységmérés sokkal vékonyabb anyagok esetén is használható, mint a Brinell keménységmérés. A vizsgált lemezvastagságot csupán az korlátozza, hogy a vizsgált réteg vastagságának nagyobbnak kell lenni, mint a lenyomat átlójának másfélszerese.

Ezen eljárás egyetlen hátránya a relatíve hosszú mérési idő, következésképpen tömeggyártásnál nem használható. Általában laboratóriumi, a legpontosabb mérési eljárásnak tekintik.

2.3. Rockwell keménység mérése

A Vickers-féle keménységmérésnek sok előnye mellett hátránya az, hogy nem eléggé gyors, a gyártó-sorba iktatott tömeges keménységmérésre nem alkalmas. Erre a célra a Rockwell-féle keménységmérő eljárást dolgozták ki, melynek szűrőszerszáma, vagy gyémántból készült kör alapú egyenes kúp, 120°-os kúpszöggel, vagy edzett acélgolyó (850 HV 10) amelynek átmérője 1,59 mm (illetve pontosan 1/16 angol hüvelyk). A keménység mérőszáma a szűrőszerszám bemélyedésének függvénye és egy mérőórán általában közvetlenül elolvasható.

A szűrőszerszámnak megfelelően a keménység mérőszámok:

- kúp alakú szerszám esetén HRC és HRA
- golyó alakú szerszámnál HRB.

A Rockwell féle keménységmérési eljárások 3. táblázat

	Rockwell C HRC	Rockwell A HRA	Rockwell B HRB
Szűrőtest	120°-os csúcshögű gyémántkúp		1/16" (1,5875 mm) átmérőjű acélgolyó
Előterhelés: F_0	98 N (10 kp)		
Főterhelés: F_1	1373 N, (140 kp)	490 N, (50 kp)	883 N, (90 kp)
Teljes terhelés $F = F_0 + F_1$	1471 N (150 kp)	588 N (60 kp)	980 N (100 kp)
A keménység mérőszámának meghatározása	$100 - \frac{e}{0,002}$		$130 - \frac{e}{0,002}$

A Rockwell-féle keménységmérés menetét a 4.a. ábra mutatja. Először a mérendő tárgy felületét a gyémántcsúccsal érintkezésbe hozzuk, majd $F_0 = 98$ N (10 kp) előterhelést adunk rá, ennek hatására a gyémántcsúcs h_0 (mm) mélyen benyomódik a tárgy felületébe. Ennek a benyomódásnak az a célja, hogy a felületi egyenlőtlenségeket kiküszöbölje, a keménység értékének meghatározásában nincs szerepe, ezért a benyomódás mérésére szolgáló mérőóra skálájának 0 pontját a mutatóhoz fordítjuk, azaz a mérőórát nullázzuk. Ezután ráadjuk az $F_1 = 1373$ N (140 kp) főterhelést, mire a gyémántcsúcs h_1 (mm) mélyen benyomódik és ezzel együtt a mérőóra mutatója megfelelően elfordul.

A terhelést fokozatosan 6 sec alatt növeljük a maximumra és 30 sec-ig rajta tartjuk a darabon. 30 sec után levesszük a főterhelést, mire a csúcs a rugalmas benyomódás értékével (h_r) megemelkedik és az óra mutatója ennek arányában visszafordul. Ekkor leolvassuk az órán a h_m mm maradandó benyomódás mértékét. Ezt a benyomódást Rockwell egységekben fejezzük ki

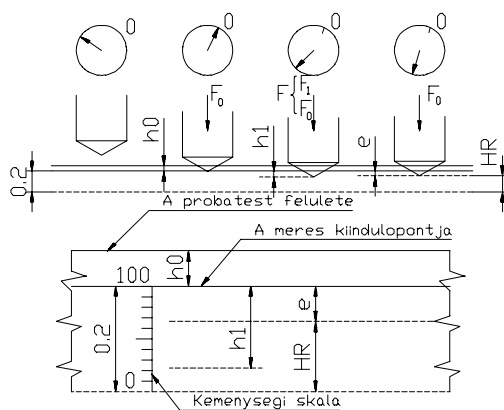
$$e = \frac{h_m}{0,002}$$

Az így kapott számot levonjuk 100-ból. Azért kell így kifejezni a HRC keménységét, hogy annak növekedésével növekvő értékeket kapjunk. Ha a benyomódást elfogadnánk közvetlenül mérőszámnak, a lágyabb anyagokat jellemeznék nagyobb számok. Ezek szerint:

$$\text{HRC} = 100 - e$$

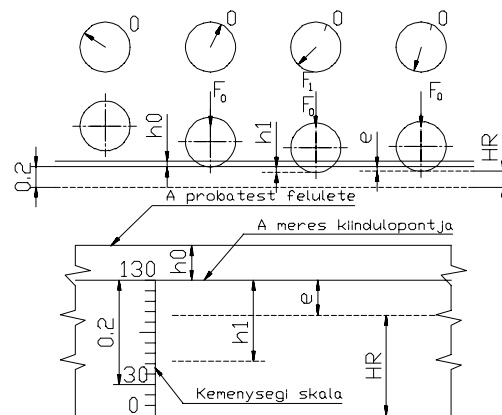
A 100 megválasztása nemzetközi megállapodás eredménye. Így az elméletileg elképzelhető abszolút kemény anyag 100 HRC keménységű, azaz $e = 0$.

Keménységmérésre használjuk még a HRA mérőszámot. Ez a mérés csak annyiban különbözik a HRC méréstől, hogy a főterhelés értéke $F_1 = 490\text{N}$ (50 kp).



4.a. ábra

A Rockwell C (HRC) keménységmérés menete



4.b ábra

A Rockwell B keménységmérés menete

A **HRB** mérésénél gyémántkúp helyett 1,5875 mm (1/16 angol hüvelyk) átmérőjű golyó a szűrő-szerszám. A mérés menete ugyanaz, mint a HRC-nél. Az eltérések a következők:

- a főterhelés $F_1 = 883\text{ N}$ (90 kp), vagyis az összerhelés $F = F_0 + F_1 = 98\text{ N}$ (100 kp).
- a mérőszám kiszámítása pedig a $\text{HRB} = 130 - e$ összefüggéssel történik. Ahol e az előbbieken meghatározott érték (4.b. ábra)

A mérés gyorsítása érdekében a mérőóra számlapjára a benyomódás helyett az annak megfelelő **HRC**, **HRB**, illetve **HRA** értékét viszik fel, így az órán 3 mérőskála van. A mérési módszernek megfelelő skáláról a keménység értéke közvetlenül leolvasható.

A Brinell, Vickers és a Rockwell-keménység értékei nem számíthatók át egymásba, csak összehasonlíthatók.

2.4. Szuper - Rockwell keménységmérés

Vékony darabok (lemezek, szalagok) edzett kérégek felületi keménységét Rockwell-eljárással a viszonylag nagy terhelőerők miatt nem lehet mérni. Ilyen mérésre fejlesztették ki a Szuper - Rockwell keménységmérő eljárást.

A mérés a Rockwell-eljárás elve szerint történik, csak a terhelési értékek mások. Az előterhelés

$F_0 = 29,4 \text{ N}$ (3 kp). Háromféle főterhelést alkalmazhatunk, ezek:

- $F_1 = 117,8 \text{ N}$ (12 kp);
- 265 N (27 kp); vagy
- 412 N (42 kp).

A szuper-Rockwell egység $0,001 \text{ mm}$. Méréshez a korábban már megismert gyémántkúp, vagy acélgolyó szúrószerszámot használunk. A szuper-Rockwell-keménység mérőszámának jele kúp alakú szúró-szerszámmal HR 15 N; HR 30 N; HR 45 N aszerint, hogy az összes terhelés 147 N (15 kp); 294 N (30 kp); vagy $441,5 \text{ N}$ (45 kp). Illetve golyó alakú szúrószerszám esetén HR 15 T; HR 30 T; HR 45 T.

A mérőszám értéke mindkét esetben ugyanúgy számolandó, pl: HR 15 N = 100-e; HR 15 T = 100-e.

Ezek szerint HR 30 N 60 azt jelenti, hogy gyémánt kúp szúrószerszámmal 294 N (30 kp) összerheléssel mérve a szuper-Rockwell-keménység mérőszáma 60.

A mérőberendezés a Rockwell mérőberendezés elvén épül fel. A főterhelést 8 sec alatt növeli 0-ról a maximumra és 30 sec-ig tartja rajta a munkadarabon. A mérés gyorsítása érdekében a mérőóra skáláján itt is a keménység mérőszáma van, így az azonnal leolvasható.

2.5. Egyéb eljárások, követelmények – egyéb anyagok – dinamikus vizsgálat

A szúró keménységmérő eljárásoknál is történt módosítás, vagy a terhelőerő, vagy a szerszámgeometria szempontjából, így

a) Vickersnél:

A terhelőerő tekintetében:

- | | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| • vas és acél | $49 - 980 \text{ N}$ (5-100 kp) |
| • réz és ötvözetei | $24,5 - 490 \text{ N}$ (2,5 – 50 kp) |
| • alumínium és ötvözetei | $9,8 - 980 \text{ N}$ (1-100 kp) |

A Mayer-féle hatványtörvényt itt is érvényesnek találták ($F = a \cdot d^n$), így a Vickers összefüggés

- $HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$ esetén; a $HV = \frac{1,854 \cdot a \cdot d^n}{d^2} = 1,854 \cdot a \cdot d^{n-2}$ formára alakul; illetve
- $HV = 0,189 a \cdot d^{n-2}$, ha a terhelő erőt N-ban értelmezzük.

Mivel az anyagok többségére az $n \sim 2$ értéket fogadták el, így a HV-t függetlennek tekintették a terhelésből – melynek értéke igen széles tartományban változhatott.

Mikrokeménység Vickers szerint

Az ún. „mikro eljárással” az anyagokból erre a célra készített csiszolatokon, az anyag szövetszerkezetének, összetevőinek, vagy egyes fázisainak keménységértékeit határozhatjuk meg. Az eljárást az alkalmazott kis terhelő erők miatt szokás kisterhelésű - Vickers módszernek is nevezni.

A mikrokeménységmérő-műszer egy mérőmikroszkóp. Egyik változatánál a 32-szeres nagyítású objektív külső lencséjének közepén 0,8 mm átlójú Vickers gyémánt van rögzítve. A lenyomatátlókat az okulárba beépített mérőskála segítségével határozhatjuk meg. A mérést úgy végzik, hogy a kiválasztott szemcsét a tárgyasztal mozgatásával az objektív szál-keresztjébe állítják, majd az élesre állító csavart a választott terhelésnek megfelelő skálaosztásig csavarva, a gyémántcsúcsot belenyomják a szemcsébe. A lenyomat átlóit a terhelés megszüntetése után lemérik, majd – a műszerhez mellékelt táblázatból kikeresik a mért átlóhoz tartozó keménységértékeket.

A gyakorlatban a mikro-Vickers eljárásnál az alábbi terhelési értékek szokásosak:

$$F = 5; 10; 20; 40; 65; 80; 100; (p) \text{ (pond) (esetleg } 500 \text{ (p))}$$

Mikro-Vickers eljárás lefolytatásánál figyelembe veendő főbb szempontok az alábbiak:

- A vizsgálathoz mikroszkópos vizsgálatra alkalmas polírozott és megfelelően maratott csiszolatokat kell készíteni.
- A terhelő erő megválasztása a vizsgálatnál kívánt szövetszerkezet, fázis méretétől és várható keménységétől – lenyomatmérettől –függ. Általános szabály nincs. A kis relatív hiba érdekében a nagyobb lenyomat elérésére kell törekedni. Tájékoztatásul: a fémeknek és szilárdolataiknak keménysége pl: acélban a ferrit 100-200 HVM, a vegyületfázisoké, pl: a karbidoké, nitrideké 1000 HVM körüli érték.
- A mikrokeménység-méréssel mért értékek mintegy 10 %-al nagyobbak, a makro-Vickers terheléssel mért értékeknél (a kis terheléseknél fellépő relatíve nagyobb rugalmas deformáció következtében, illetve szövetszerkezeti hatások miatt).
- A keménység mértéke, mérőszám: általában 1600-ig használatos három- vagy négyjegyű szám, mögötte HVM/terhelőerő (p)-ban/terhelési idő (s)-ban.
- Főbb alkalmazási területe: vékony lemezen, fóliákon, termokémiai eljárással, felületi edzéssel, vagy egyéb módon előállított felületi rétegeken, illetve szövetelemeken végzett vizsgálatok.

Mikro-Vickers módosított gúla alakkal:

Legelterjedtebb változata a Knopp-féle módszer, amelynek szűrőszerszáma gyémántgúla. A szűrőszerszám alapterülete a Mikro-Vickers eljárásnál alkalmazott 0,8 (mm) átlójú, gyémánt-gúlaéval megegyezik. A különbség, hogy a lenyomat felülnézetben nem négyzet, hanem rombusz és az átlók mérete között jelentős különbség van. Az ilyen, nyújtott rombusz alapú gúla kialakítását a heterogén

szövetszerkezet pl: az eutektikum fázisainak jobb vizsgálhatósága indokolja. Az F terheléshez tartozó táblázatból a keménység értéke kiolvasható.

b) Brinellnél:

A 40 és 900 °C közötti vizsgálatoknál 210° C-ig villamos fűtéssel melegített olaj; e fölött sófürdő biztosítja a hőmérsékletet. A fürdőt a belehelyezett próbatesttel, mérőelemmel és mérőelem-tartóval együtt kell felmelegíteni. (Az intenzív oxidáció semleges gázban és vákuumban is elkerülhető). Adott hőmérsékleten a terhelési idő min. 180 sec; de a lenyomat méretét szobahőmérsékleten kell mérni $\pm 0,01$ mm pontossággal. Ha a vizsgálati hőmérsékleten szövetszerkezeti változás állna be, akkor a próbatestet ezen a hőmérsékleten meg kell eresztetni. A sikeres méréshez fontos a darab méretének gondos figyelembevétele.

c) Egyéb anyagok: közül – fontossága miatt célszerű kiemelni a műanyagok keménység-vizsgálatát.

A műanyagok rugalmas visszaalakulására való tekintettel az adott terhelés hatására bekövetkező benyomódást a terhelés alatt kell meghatározni. A módszer leginkább a Brinell vizsgálatra hasonlít, a benyomódó mérőtest 5 mm átmérőjű acélgolyó.

A legalább 4 mm vastagságú próbatest előterhelése 9,81 N, majd a mérőórát nullázva az alapterhelést kell biztosítani – 30 sec-on keresztül.

A vizsgálóterhelések: 49 N; 132,4 N; 358 N és 961 N értékűek lehetnek. Úgy kell megválasztani, hogy a golyó benyomódásának mélysége 30 sec után 0,15 – 0,35 mm közötti legyen. Ha 30 sec után a h értéke a fenti tartományon kívül esik, akkor a terhelést úgy kell változtatni, hogy a feltétel teljesüljön.

A keménység számítható:

$$HK = \frac{1}{D \cdot \pi} \cdot \frac{F}{h}$$

összefüggéssel, vagy táblázatból (MSZ 1421 : 1988 2-es Függelék)

d) Dinamikus keménységmérés

Az eljárások csak a végrehajtásuk módszere tekintetében dinamikusak, a kapott mérőszám statikus anyagjellemző.

Szúrószerszámmal mérő dinamikus keménységmérés

Ebben a csoportban a legáltalánosabban elterjedt a Brinell-eljáráson alapuló Poldi-féle vizsgálati módszer.

Elsősorban összehasonlító mérésekre, vas és nemvas fémek és ötvözeteik vizsgálatára alkalmas, de – korlátozott pontossággal – használják abszolút keménységértékek meghatározására is. A mérés fizikai elve teljes egészében megegyezik a hagyományos Brinell-eljárásnál bemutatottakkal. A Poldi-féle vizsgáló szerszám (Poldi-kalapács) golyótartójában $D = 10$ (mm) átmérőjű golyó van lazán illetve, felette egy ismert keménységű etalon („n” jelű) próbatest helyezkedik el.

A vizsgáló golyó alatt elhelyezkedő tárgy, illetve a készülékben lévő – vizsgálat előtt megfelelően pozicionált – etalon ugyanazon külső terhelő erő hatására bekövetkező deformációjából számolható az ismeretlen test keménysége.

Az elméleti levezetés mellőzésével végeredményként kapjuk, hogy az ismeretlen tárgy keménysége, valamint az etalon keménysége közötti arány

$$\frac{HB_n}{HB_x} = \left(\frac{dx}{dn} \right)^2$$

HB_n: az alkalmazott etalon keménysége,

HB_x: vizsgált tárgy keménysége.

dx: lenyomat-átmérő az ismeretlen keménységű tárgyon,

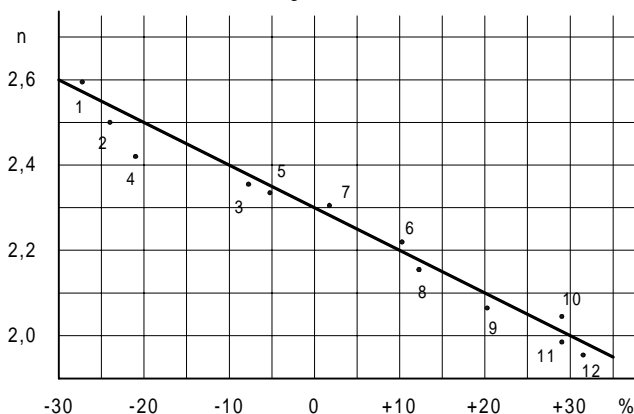
dn: lenyomat-átmérő az etalonon.

Szúrószerszámmal végzett dinamikus keménységmérés lefolytatásának főbb szempontjai az alábbiak:

- a dx/dn viszony 0,5 értéknél kisebb tartományba essék,
- a vizsgálattal kapott eredmények a terhelő erőtlől függetlenek,
- a lenyomat-étmérőket két egymásra merőleges irányban mért lenyomat-átmérő átlagából kell meghatározni,
- az eljárás elsődleges területe az összehasonlítás, azonban használatos abszolút mérőszámú is abban az esetben, ha a tárgy méretei más, laboratóriumi vizsgálatot nem tesznek lehetővé,
- a vizsgált tárgy méreteivel a vizsgálat körülményeivel kapcsolatban az alábbiak betartása szükséges:
 - a vizsgált tárgyon keletkezett lenyomat annak hátoldalán nem hagyhat nyomot (vékony lemezek vizsgálata nem végezhető ezzel az eljárással)
 - a vizsgált tárgy tömegének megfelelően nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy a lenyomat értékelhető legyen
 - ha a vizsgált tárgy felületére helyezett vizsgáló szerszám eltér a merőlegetől, jelentős a mérési hiba.

2.6. Néhány megjegyzés a hagyományos módszerekhez

Bármelyik módszernél felmerül a kérdés, hogy a szerszám behatolása során a mérendő anyag egy része rövidtávú alakváltozás során kisajtolódik és különösen lágy anyagoknál a nyom körüli felboltozódás jelentős mértékű.



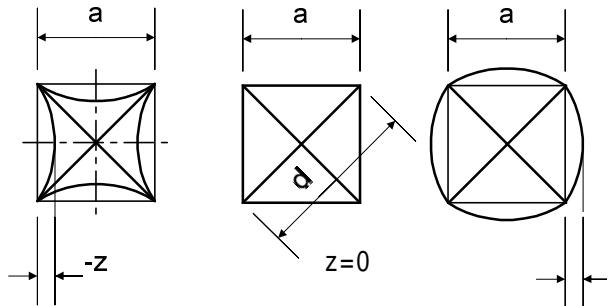
Grigovics vizsgálata a kidudorodás mértékét golyóval történő keménységmérés esetén. Meghatározta a Meyer-féle hatványtörvény ($F = a d^n$) n kitevőjét és kapcsolatot talált n kitevő és a kidudorodás között. Ezt foglalja össze az 5. ábra.

5. ábra Az n kitevő és a kidudorodás kapcsolata

(A vizsgált anyagok: 1 – réz; 2 – réz, hengerlés és 900° C-os hevítés után; 3 – réz, 600° C-os hevítés után; 4 – magnézium, lágyítva; 5 – alumínium; 6 –

lágycél; 7 – G 13-as acél; 8 – közepes széntartalmú szénacél edzés és megeresztés után; 9 – vulkanit; 10 – réz, alakítva (20 %); 11 – réz, alakítva (75 %), 12 – alumínium hidegen alakítva).

Gúla benyomódása esetén a legnagyobb deformáció az oldal közepénél, a legkisebb a szerszám élei mentén adódik, ezért a gúla-alakú benyomódás vetülete nem egy síkban fekszik. Különböző keménységű és alakíthatósági fokú anyagoknál a lenyomat z -vel jellemezhető mértékben torzul.



6. ábra A Vickers lenyomat torzulása

Nagy mértékű torzulás esetén a vetület valódi területének megállapításához ki kell értékelni a görbület területnövelő, vagy csökkentő hatását. A kontúrt parabolaként értelmezve a felületnövekmény:

$$\Delta S = \frac{2}{3} a \cdot z$$

A benyomódás tényleges vetületének területe:

$$F_{\text{tényl. vetület}} = \frac{d^2}{2} + 4 \cdot \frac{2}{3} a \cdot z$$

Bevezetve a viszonylagos oldalgörbület $\frac{z}{a}$ fogalmát és kifejezve az a oldalt a d átlóval, adódik:

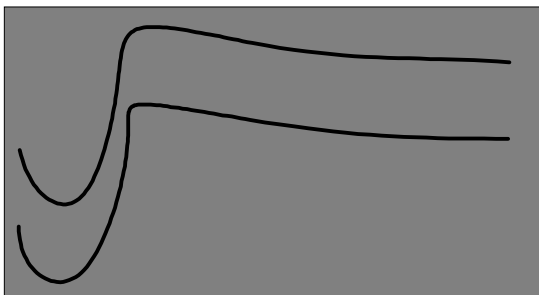
$$F_{\text{tényl. vetület}} = \frac{d^2}{2} + \frac{8}{3} \cdot a \cdot z \left(\frac{a}{a} \right) = \frac{d^2}{2} + \frac{8}{3} \cdot \frac{z}{a} \cdot a^2$$

$$a^2 = \frac{d^2}{2} \text{ helyettesítéssel}$$

$$F_{t.v} = \frac{d^2}{2} \left(1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{z}{a} \right) = \frac{d^2}{2} \left(1 + 2,67 \cdot \frac{z}{a} \right)$$

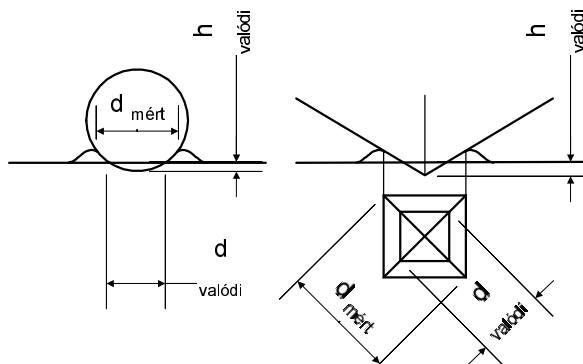
Ha $Z/a = 0$ ($z=0$), akkor a $H_{\text{tényl. vetületei}} = H_{\text{vetületi számított}}$.

Brinellnél az eltérés a nagyobb terhelőerő miatt jelentős. Ezt bizonyítja a 7. ábrán látható Brinell lenyomat átfogója mentén letapogatott képe. Eredetileg a Brinell mérés is a $HB = \frac{F}{D\pi h}$ alapján határozza meg a keménységet, de amikor a feladatot – a h mérését kiküszöbölendő – visszavezeti d mérésre, a kidudorodásból eredő hiba a keménységi érték



gyakorlati meghatározásában bennmarad. Vickers mérésnél a terhelés lényegesen kisebb, a kidudorodás azonban arányaiban hasonló, mint ahogy azt a 8. ábra szemlélteti.

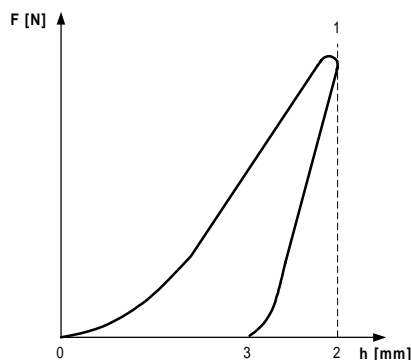
7. ábra A Brinell lenyomat (1840/2,5/30) geometriája



8. ábra A lenyomatok mért és valódi mérete

3. Erő-elmozdulás mérésén alapuló eljárások

A keménység önmagában fizikailag nem teljesen megalapozott mennyiség, hisz általában egy adott erő által létrehozott lenyomat felület (ezzel arányos mélység) hányadosát jelenti, azaz ha azonos erő adott szűrőszámmal azonos lenyomatmélységet hoz létre, akkor a keménység azonos. Ezt a végleges mélységet azonban az erő növekedése során a legkülönbözőbb függvény szerint értheti el. Ennek alapján tehát azt mondjuk, hogy a szűrőszám behatolására az anyag tulajdonságain keresztül az összetartó erő- benyomódás görbével válaszol. Ennek jellegét szemlélteti a 9.ábra.



9. ábra
Jellegzetes erő-benyomódás diagram

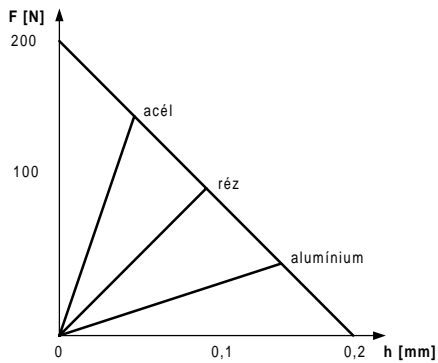
A 0-1 illetve 1-3 görbeívek tükrözik az anyagok viselkedését, azaz ezek paraméterei az anyagok tulajdonságainak hordozói, tehát ezeknek kapcsolatban kell lenni egyéb, ugyancsak szilárdsági és alakváltozási jellemzőkkel. A 9. ábrán szereplő diagram az erő és az elmozdulás villamos úton történő mérésével felvehető.

Az anyagi tulajdonságokat hordozó görbeívek paraméterei egyszerű matematikai módszerekkel számíthatók és felhasználásával az anyagok szilárdsági és alakváltozási jellemzői előre kidolgozott korrelációs rendszerek, összefüggések felhasználásával becsülhetők. Kiemelt jelentőségű lehet e módszer pl: hegesztett kötések rendkívül heterogén hőhatásövezetében a tulajdonságok becslésénél, hisz ekkor valóban egy igen kis környezetre jellemző tulajdonság elemzésére nyílik lehetőség.

3.1. Módosított szerszámgeometria alkalmazása

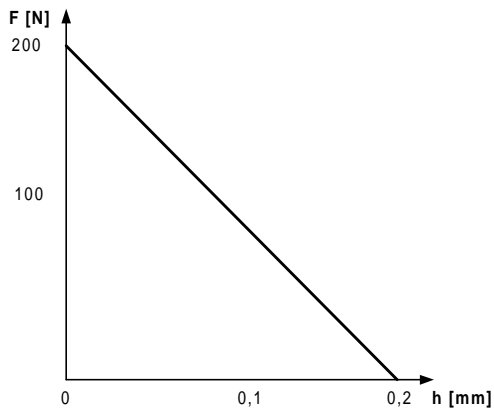
A mérőtest geometriai megváltozásából indul ki Brunner és Schimmer [1], nevezetesen forgási paraboloid alakú a mérőtest, melynek behatolását folyamatosan növekvő terhelés biztosítja. Mérőrendszer segítségével méri a behatolási mélységet és mérőtestre jutó terhelést.

A mérőtestet terhelve lineáris erőnövekedést tapasztaltak (10.ábra); az egyenesek szöge jellemző volt az anyagok keménységére.



10. ábra Néhány anyagminőség erő- benyomódási mélység görbéje

A terhelő erőt és a benyomódási mélységet a 11. ábra szerinti $F_p = f(y)$ karakterisztika határolta ($F = 200-1000$ y), így bármely anyag mérési folyamata csak addig tart, míg az erő és a benyomódás értéke meg nem felel az egyenletnek.

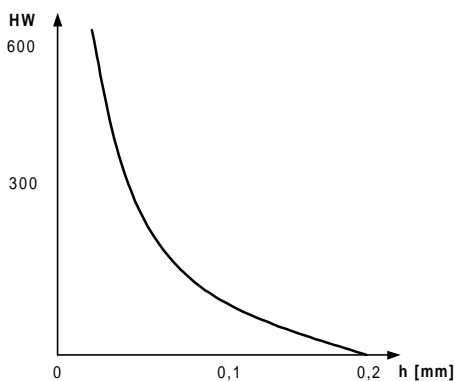


11. ábra Az erő és a benyomódási mélység határa

A keménységi mérőszámot az erő és a benyomódási mélység viszonya adja:

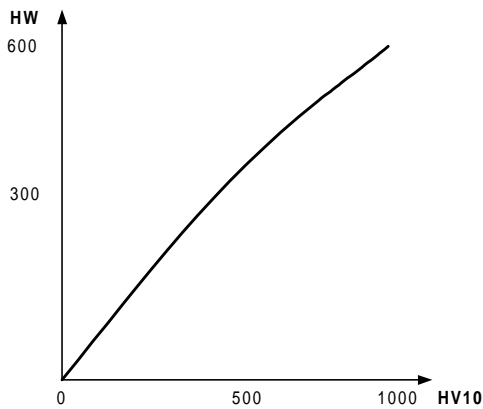
$$HW_{szil} = \frac{F_p(y)}{y}$$

értéke a 0 és ∞ között bármilyen lehet. (12. ábra).



12. ábra A keménységi mérőszám a benyomódás függvényében

Vizsgálataik alapján megadják, hogy hogyan felel meg az általunk javasolt HW_{szil} és HV 10 egymásnak (13. ábra)



13. ábra A keménységi mérőszám és HV 10 függvényében megfelelése

A görbe alapján számítható megfelelés:

$$HW_{szil} = 1,9865 \quad HV 10^{0,8306}$$

A szerzők - a hátrányokról nem beszélve - előnyként említik, hogy

- mivel a szerszám gyémánt, minden anyag keménységmérése megvalósítható,
- a keménységi skála 0-tól ∞ -ig tart,
- minden anyagminőséghez egyetlen próbatest alkalmazható,
- más keménységmérési eljárásoknál, ha az anyagra jellemző n értéke $\neq 2$ -vel, akkor a keménység függ a terheléstől.

Ezen utóbbi megállapításhoz kapcsolódva kell megjegyezni, hogy a paraboloid szerszám geometriai jellemzője nem ismert, nevezetesen, hogy a mérőtestet az

$$y = x^2, \quad y = cx^2, \quad y = x^n, \quad \text{vagy} \quad y = cx^n$$

görbék közül - az y tengely körül megforgatva - melyik eredményezte.

Nem tisztázott, hogy az erőnövekedés meddig lineáris, valószínű, hogy e miatt kellett korlátozni az erő-benyomódás értékeit az $F_p = 200 - 1000$ y (**F** N-ban, **y** mm-ben) egyenleteknek megfelelően.

3.2. A benyomódási munka elemzésével

A szűrőszerszám behatolása során a vizsgált anyag által kifejtett ellenállás mértéke valamilyen mértékű képlékeny alakváltozási munkával jellemezhető. Ennek nagysága természetesen függ a szűrőszerszám geometriájától. Ebből adódóan célszerű az egységnyi térfogat kisajtolásához szükséges munkát, a fajlagos benyomódási munkát elemezni különböző szűrőszerszámok esetén.

3.2.1. A fajlagos benyomódási munka számítása Brinell keménységmérésnél

Ha egy D átmérőjű golyót a vizsgálandó anyagba h mélységig fokozatosan növekvő F erővel nyomunk, akkor a végzett munka:

$$W = \int_0^h F \cdot d \cdot h$$

A geometriai viszonyok alapján (1. ábra)

$$d = 2\sqrt{h(D-h)}$$

A lenyomat pillanatnyi átmérője és a pillanatnyi terhelő erő közötti legegyszerűbb kapcsolatot a Meyer-féle $F = ad^n$ összefüggés tükrözi, melyben \underline{a} és \underline{n} anyagi tulajdonság hordozója. A Meyer-féle összefüggést: és az 1. ábrából kiolvasható geometriai kapcsolatokat is figyelembe véve adódik:

$$W = a \cdot 2^n \int_0^h h^{n/2} (D-h)^{n/2} dh$$

ezt kell vonatkoztatni a gömbsüveg alakú kisajtott térfogatra, melynek nagysága:

$$V = \pi \cdot h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)$$

A fajlagos munkavégzés tehát:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{a 2^n \int_0^h h^{n/2} (D-h)^{n/2} dh}{\pi h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)}$$

elosztva \underline{a} -val mindkét oldalt:

$$\frac{W}{V \cdot a} = \frac{2^n \int_0^h h^{n/2} (D-h)^{n/2} dh}{\pi h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)} \quad (1)$$

egy \underline{n} paraméterű görbesereg egyenletét kapjuk.

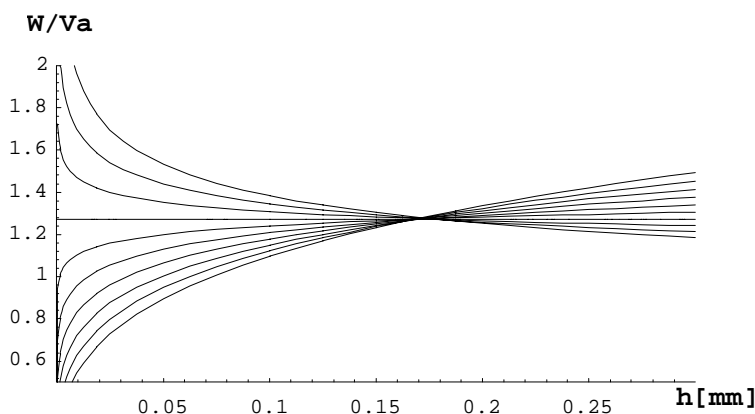
Ha $\underline{n} = 2$; akkor

$$\frac{W}{V \cdot a} = \frac{2^2 \int_0^h h(D-h) d \cdot h}{\pi \cdot h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)} = \frac{4 \int_0^h (Dh - h^2) d \cdot h}{\pi \cdot h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right)} = \frac{4 \left(\frac{Dh^2}{2} - \frac{h^3}{3} \right)}{\left(\frac{Dh^2}{2} - \frac{h^3}{3} \right)} = \frac{4}{\pi} = 1.2732$$

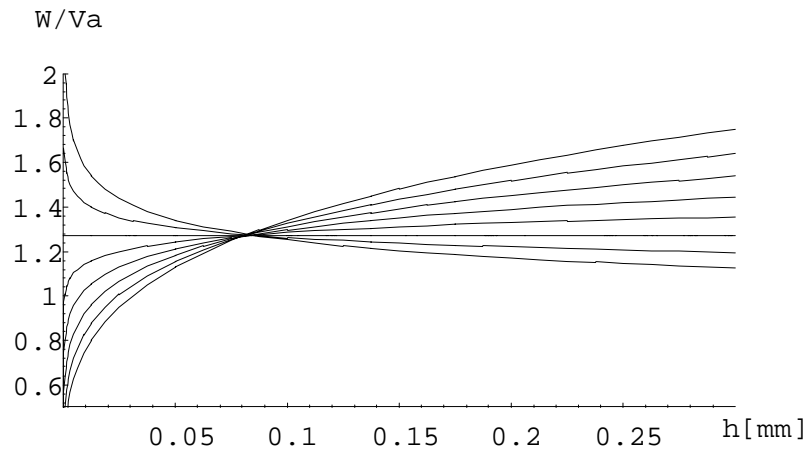
Ez esetben a \underline{w} értéke csak az erőnövekedési törvény \underline{a} paraméterétől függ, értéke:

$$w = 1,2732 a$$

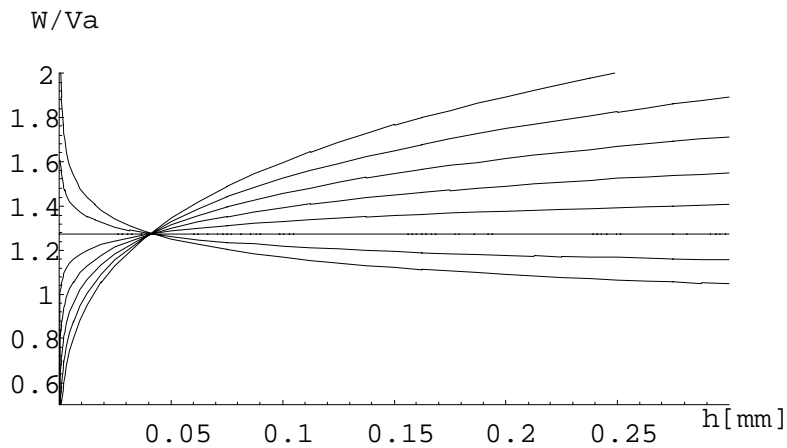
Ha $\underline{n} \neq 2$, akkor az (1) összefüggés csupán numerikusan integrálható. Ezt elvégezve - a Brinell mérésnél szokásos $D = 2,5$; 5 ; és 10 mm-es golyóátmérőknél és a gyakorlatban előforduló \underline{n} értéknél - kapjuk a 14. 15 és 16. ábrákon feltüntetett görbesereget.



14. ábra A fajlagos benyomódási munka és benyomódási mélység kapcsolata; $D = 2,5$ mm-es mérőelemnél



15. ábra A fajlagos benyomódási munka és a benyomódási mélység kapcsolata; $D = 5$ mm-es mérőelemnél



16. ábra A fajlagos benyomódási munka és a benyomódási mélység kapcsolata; $D = 10$ mm-es mérőelemnél

E görbeseregnek három jellegzetessége van:

- egyrészt a fizikai tartalmúnak tekinthető $\frac{W}{V \cdot a}$ jelentősen függ a Meyer-féle hatványtörvény n kitevőjétől és a szokásos terhelő erőknél az anyag keménységétől.
- másrészt, ha pl: egy HB = 300 keménységű, $n = 2,4$ kitevőjű acélt veszünk, akkor a $\frac{W}{V \cdot a}$

értéke

- $D = 2,5$ mm esetén kb: 1;
- $D = 5$ mm esetén 1,35 és
- $D = 10$ mm esetén 1,8.

Ez a magyarázata annak, hogy a különböző paraméterekkel végzett Brinell keménységmérés eredményei egymással nem hasonlíthatók össze, azaz mindig meg kell adni a golyóátmérőt és a terhelő erőt,

- a harmadik leglényegesebb megállapítás az, hogy a görbesereg minden esetben egy pontban a $d = 1,2732$ mm-es lenyomatátmérőnél metszi egymást, az ehhez tartozó lenyomat-mélységek
 - $D = 2,5$ mm eset én $h = 0,1733$ mm,
 - $D = 5$ mm-nél $h = 0,0824$ mm, míg
 - $D = 10$ mm-nél $h = 0,0407$ mm.

Ez utóbbi megállapítás azt jelenti, hogy minden anyagminőségnél van olyan fajlagos benyomódási munka, amely a terhelő erőtlől független $n = 2$ Meyer-féle kitevőjű anyagra igaz, ennek értéke $W = 1,2732 \underline{a}$. Ha $n \neq 2$ akkor a terhelő erőt úgy kell megválasztani, hogy $d = 1,273$ mm átmérőjű lenyomatot hozzunk létre a golyó átmérőjétől függetlenül (ezt a jelenlegi gépi berendezések nem tudják megvalósítani.)

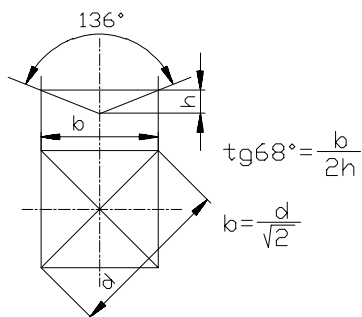
3.2.2. A fajlagos benyomódási munka számítása Vickers keménységmérésnél

A 136° -os lapszögű gyémánt gúla fokozatosan növekvő F erővel h mélységig történő benyomása során végzett munka

$$W = \int_0^h F \cdot d \cdot h$$

A geometriai viszonyok alapján (17. ábra)

$$h = \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} 68^\circ} = \frac{d}{2 \cdot \operatorname{tg} 68^\circ \sqrt{2}} = \frac{d}{7,000602} \cong \frac{d}{7}$$



17. ábra A Vickers keménységmérés geometriai viszonyai

Az $F = ad^n$ alakú Meyer-féle összefüggés és a $d = 7h$ viszony figyelembevételével:

$$W = \int_0^h a 7^n h^n \quad dh = \frac{a 7^n h^{n+1}}{n+1} = \frac{a 7^n d^{n+1}}{(n+1) 7^{n+1}}$$

$$W = a \frac{d^{n+1}}{7(n+1)}$$

Ezt gúla alakú kisajtott térfogatára kell vonatkoztatva:

$$V = \frac{b^2 h}{3} = \frac{d h}{3 \cdot 2} = \frac{d^2 d}{3 \cdot 2 \cdot 7} = \frac{d^3}{42}$$

a fajlagos munkavégzés (\underline{a} -val való osztás után):

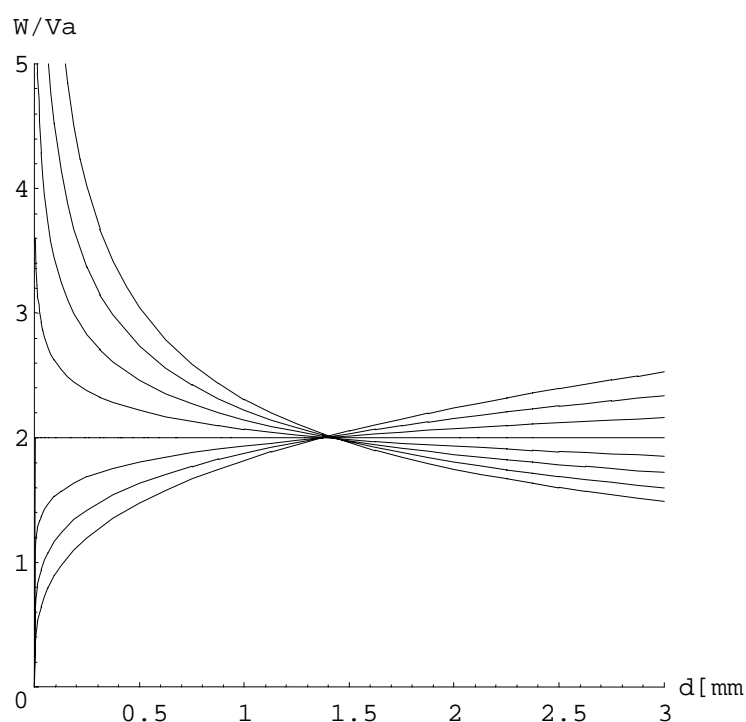
$$\frac{W}{V \cdot a} = \frac{a}{z(n+1)} d^{n+1} \frac{42}{d^3} = \frac{6}{n+1} d^{n-2} \quad (2)$$

Hasonlóan a Brinell eljáráshoz, itt is egy \underline{n} paraméterű görbesereg egyenletét kapjuk.

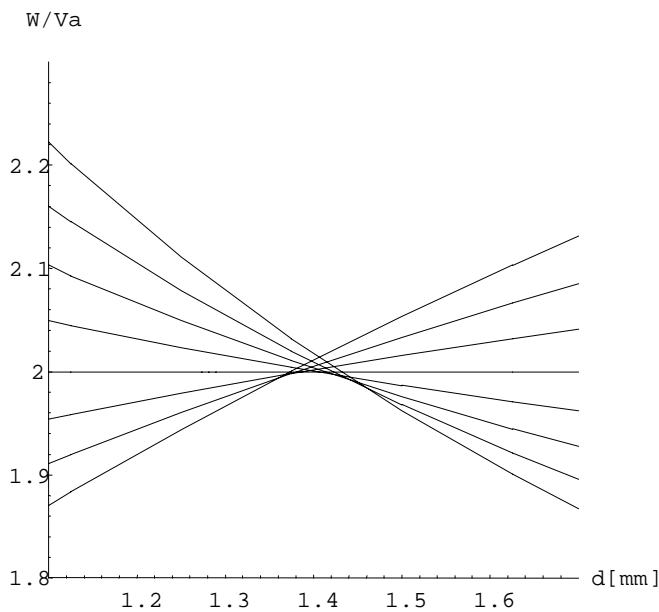
A (2) összefüggés is azt tükrözi, hogy az egyébként fizikai tartalommal felruházható fajlagos benyomódási munka értéke adott anyagnál függ a lenyomat átlójától, azaz a terhelő erőtől, illetve általánosabban mondva a mérés körülményeitől. Ha viszont a Meyer-féle hatványkitevő $n = 2$; akkor a fajlagos benyomódási munka a mérés körülményeitől független értéke $w = 2a$. Az (1) és (2) kifejezésekben természetesen nem azonos az a nagysága, hisz egyik esetben a szűrőszerszám golyó, a másik esetben pedig gyémánt gúla. Az a kérdés azonban jogosan vetődik fel, hogy a fajlagos benyomódási munka függ-e a szűrőszerszámtól. Ha nem, akkor a **HV** illetve **HB** mérésre jellemző a értékek arányára $2/1,2732 = 1,571$ -et kellene kapni az anyagoktól függetlenül. Hogy ez fennáll-e vagy sem, arra a későbbiekben kell visszatérni.

A továbbiakban elemezzük a (2) kifejezést. A Vickers keménységmérésnél az n értéke biztosan $1,6 = n = 2,3$ tartományba esik. Az adott n értékhez tartozó $\frac{W}{V \cdot a}$ görbesereget a 18. ábra, ennek kinagyított részét a 19. ábra szemlélteti, melyből látható, hogy itt közös metszéspont nincs. Ha viszont a különböző n -hez tartozó görbék és az $n = 2$ -höz tartozó egyenes metszéspontjait meghatározzuk, akkor ez $d = 1,38 - 1,42 \text{ mm}$ ($0,19 = h = 0,21 \text{ mm}$) intervallumba esik. Ennek alapján tehát azt mondhatjuk, hogy ha $d = 1,4 \text{ mm}$ -es lenyomatátlót, vagy ezzel egyenértékű $h = 0,2 \text{ mm}$ -es lenyomat mélységet hozunk létre, akkor olyan mérési feltételeket teremtettünk, hogy a fajlagos benyomódási munka $w = 2a$; független a Meyer kitevőtől (hasonlóan mint a Brinell mérésnél).

A további feladat a HB vagy HV mérésre jellemző $F = a d^n$ kapcsolat paramétereinek meghatározása. Ez történhet vagy úgy, hogy különböző erővel létrehozva a lenyomatot annak átmérőjét ábrázoljuk a terhelés függvényében (a továbbiakban optikai módszer), vagy pedig villamos úton regisztráljuk a 9. ábrán feltüntetett görbét. A gyakorlati igényeket tekintve természetesen ez utóbbi a célszerűbb. Erre a célra egy berendezés lett kifejlesztve és számos anyag vizsgálatára került sor.



18. ábra. A fajlagos benyomódási munka és a benyomódási mélység kapcsolata Vickers mérésnél



19. ábra. A fajlagos benyomódási munka és a benyomódási mélység kapcsolata Vickers mérésnél ($a = 1.2-1.6$ tartomány kinagyítva)

3.3. A fajlagos benyomódási munka értékei különböző anyagoknál

A vizsgált lágyított és különböző módon hőkezelt állapotú anyagok keménysége $89 = HV_{30} = 975$ közötti (Cu-E ls DA 10 típusú keménység). Az alapanyagokhoz hegyanyagok is társultak, melyek keménysége a $121 = HV_{30} = 570$ tartományban van. Az anyagminőségek részletezve:

Alapanyagok: Cu-E; AlCuMg; AlMgSi 1; Sr60k; Ti; C10; C60; BC3; A50; M1; S10;G03; K013; K036; K1; CrV3;60SM1; C60 hőkezelve; Go3 hőkezelve; keménység; K13 hőkezelve; NK hőkezelve;

Heganyagok: EB11 (OK48.00); ER21 (OK 46.16); UTP8; UTP683LC; UTP65; UTP630; FoxEV47; GRINOX S; UTP701; ABRASUDOR43;

3.3.1. A különböző anyagjellemzők kapcsolata

A vizsgálatok alapvető célja annak eldöntése, hogy a hagyományosan definiált keménység és a fajlagos benyomódási munka között létezik-e kapcsolat. Kissé részletesebben fogalmazva a következő kérdések megválaszolása a cél:

- Kapcsolatba hozható-e a Meyer-féle hatványtörvény a konstansa a valamilyen módszerrel mért keménységgel ?
- Van-e kapcsolat a fajlagos benyomódási munka és a keménység között?
- Hogyan definiálható olyan általános keménységi mérőszám, amely független a mérés körülményeitől, azaz adott szűrőszerszám esetén csupán a Meyer-féle hatványtörvény a és n anyagi tulajdonságokat hordozó paramétereit foglalja magába?

- Van-e kapcsolat a Brinell és Vickers eljárással meghatározott valódi keménységek között?
- A Meyer-féle hatvány törvény ($F = a d^n$) konstansai azonosak-e, ha a folyamatosan regisztrált erő benyomódási görbék, illetve a különböző terhelőerőkkel létrehozott erő-lenyomat átmérő adatpárok alapján számítjuk?
- A keménységmérés során befektetett munka és a valódi keménység között milyen a kapcsolat?

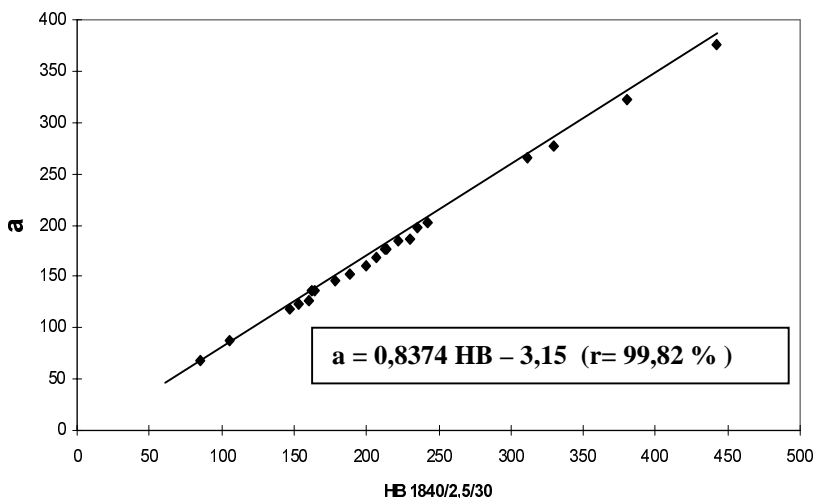
3.3.2. A vizsgálati eredmények, az anyagjellemzők kapcsolata

A 3.3.1. pontban megfogalmazott célkitűzésnek megfelelően a kapott eredményeket a következő két szempont szerinti csoportosításban kerülnek bemutatásra:

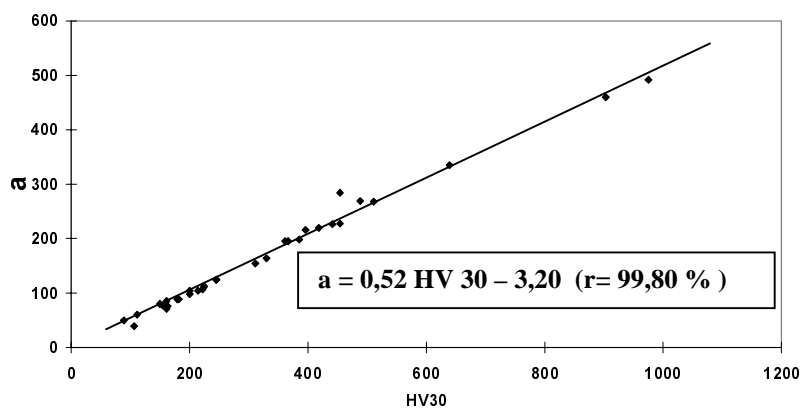
- a Meyer-féle kifejezés a paramétere és a keménység közötti kapcsolat,
- a fajlagos benyomódási munka és a keménység kapcsolata.

3.3.2.1. A Meyer-féle kifejezés a paramétere és a keménység kapcsolata

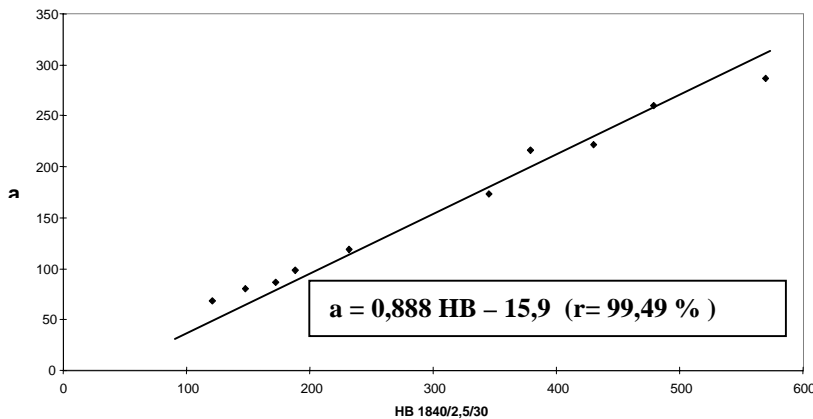
A Meyer-féle hatványtörvény a konstansa és a Brinell, illetve Vickers módszerrel mért keménység közötti kapcsolatot alapanyagra a 20. és 21. ábrák foglalják össze. A 22. ábra a hegyanyagokra kapott eredményeket szemlélteti.



20. ábra. A Brinell keménység és az a paraméter kapcsolata



21. ábra. Az a és HV 30 kapcsolata



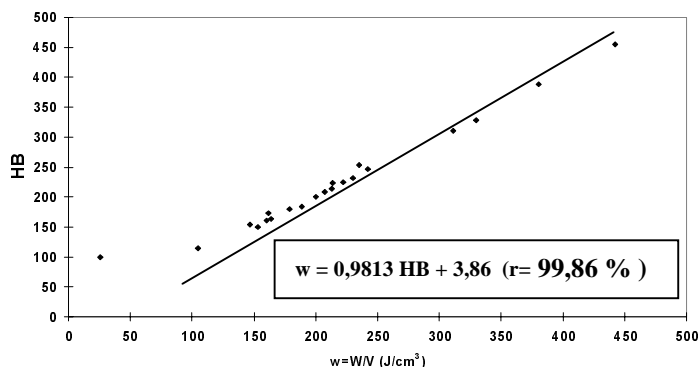
22. ábra. Az a és HB kapcsolata hegyanyagoknál

Az ábrákat tekintve a következő megállapítások tehetők:

- a Meyer-féle hatványtörvény a paramétere a keménységmérés eredményei alapján jól becsülhető, hiszen a korrelációs együttható értéke minden esetben nagyobb mint 99,5 % !
- a Brinell és Vickers keménységmérés jellemző a értékek arányára az elméletileg várt 1,57 helyett 1,61 illetve csak a szűkebb keménységi tartományt átfogó kevesebb adatot tartalmazó hegesztő anyagokat tekintve, 1,65 adódott. Az eltérés tehát kisebb mint 5 %, ami alátámasztja az elméleti megállapítások helyességét.

3.3.2.2. A fajlagos benyomódási munka és a keménység kapcsolata

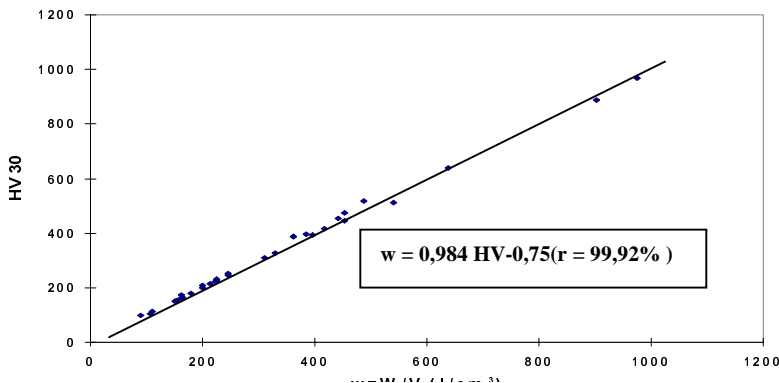
A fajlagos benyomódási munka és a HB 1840(2,5)30 közötti kapcsolatot a 23. ábra; a HV 30-al való összefüggését a 24. ábra szemlélteti. A hegyanyagokra kapott eredményeket a 25. ábra foglalja össze.



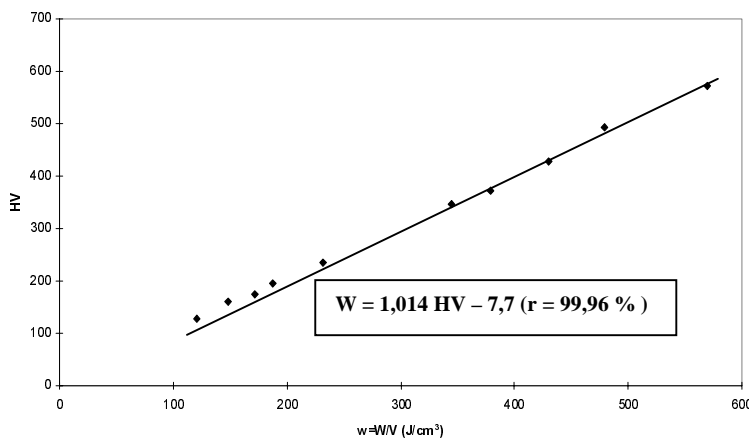
23. ábra. A HB keménység és a fajlagos benyomódási munka kapcsolata

Az ábrákat tekintve a következő megállapítások tehetők:

- a fajlagos benyomódási munka gyakorlatilag megegyezik a HB 1840(2,5)30 illetve a HV 30 értékkel,
- a két különböző szűrőszerszámmal meghatározott keménység és a fajlagos benyomódási munka közötti korreláció mindig nagyobb a Vickers eljárásnál,
- az előzőekből következik, hogy a *fajlagos benyomódási munka a szűrőszerszámtól független*, anyagra jellemző mennyiség.



24. ábra. Vickers keménység és a fajlagos benyomódási munka kapcsolata



25. ábra. Heganyagok Vickers keménységének kapcsolata a fajlagos benyomódási munkával

Az előbbi pontokban tett megállapításokból arra is lehetne következtetni, hogy a keménységmérés folyamatával tovább nem érdemes foglalkozni, hiszen a HB 1840(2,5)30 illetve HV 30 egy fizikailag megalapozott mennyiség, amelyből egyben a Meyer-féle hatványtörvény – HB-re illetve HV-re – jellemzője is becsülhető. Azt azonban észre kell venni, hogy a Meyer-féle hatványtörvény n kitevőtője sem a HB 1840(2,5)30 sem HV30 értékben közvetlenül nem szerepel.

4. Az anyagok valós keménységének fogalma

Nyilvánvalónak tűnik, hogy az anyagok valós keménysége csak úgy definiálható reálisan, ha figyelembe vesszük a 9. ábra 0 – 1 szakaszát leíró Meyer-féle hatványtörvény mindkét (a és n) paraméterét. Mint láttuk a fajlagos benyomódási munka fizikailag megalapozott mérőszám, értéke független az n kitevőtől és a mérés körülményeitől (golyó átmérő), ha Brinell mérésénél $d = 1,2732 \text{ mm}$ lenyomat átmérőt, vagy HV mérésénél $d = 1,4 \text{ mm}$ ($h = 0,2 \text{ mm}$) lenyomat átlót hozunk létre. Az ezen erőkhöz tartozó keménységek valós keménységnek tekinthetők, és az alábbi kifejezésekkel számíthatók:

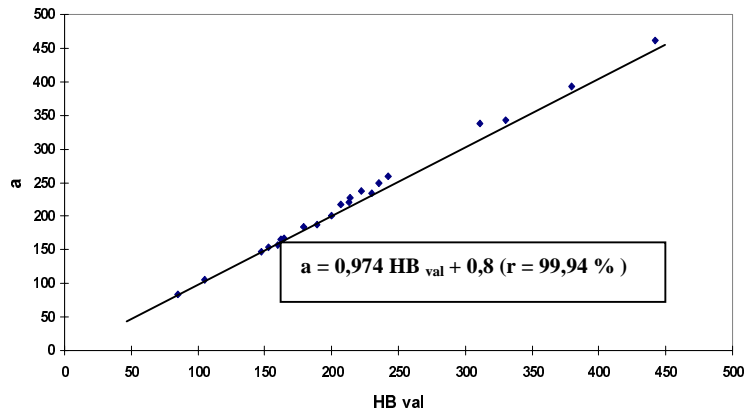
$$HB_{\text{val}} = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} = \frac{a \cdot d^n}{D \cdot \pi \cdot h} = \frac{a \cdot 1,2732^n}{2,5 \cdot \pi \cdot 0,1733}$$

$$HB_{\text{val}} = 0,7347 \cdot a \cdot 1,2732^n$$

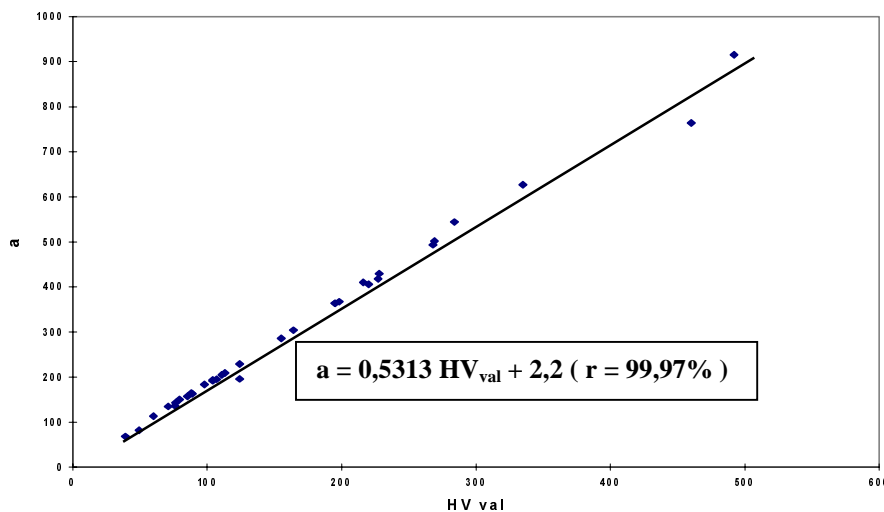
$$HV_{\text{val}} = \frac{F}{A} = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot a \cdot d^n}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot a \cdot 1,4^n}{1,4^2}$$

$$HV_{\text{val}} = 1,8544 \cdot a \cdot 1,4^{n-2}$$

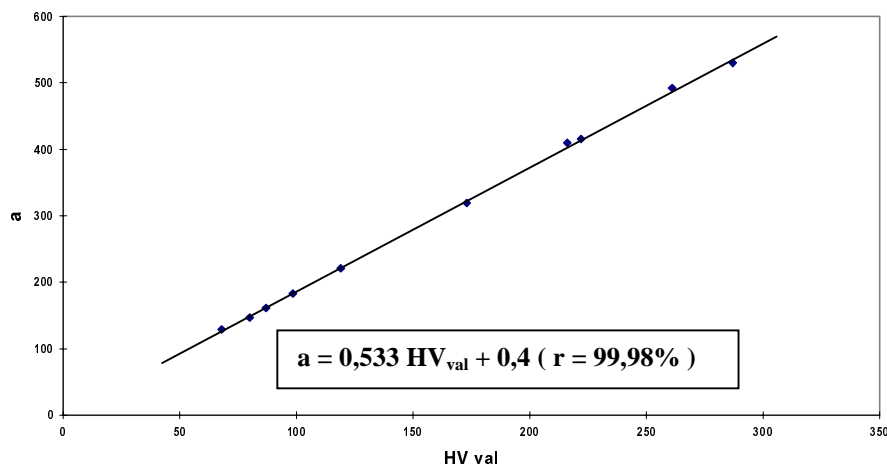
A két összefüggésben szereplő \underline{a} értékek számszerűleg természetesen nem azonosak. Az így számított $HB_{val} - \underline{a}$ és $HV_{val} - \underline{a}$ kapcsolatokat alapanyagokra a 26. és 27. ábrák mutatják, hegyanyagokra a 28. ábra szemlélteti. Ezeket a 23-24. és 25. ábrákkal összehasonlítva látható, hogy a kapcsolatok korrelációs együtthatói javultak és csaknem 100 % (minden esetben nagyobb mint a 99,96 %), azaz e megfontolásokkal valóban egy reális keménység fogalmat definiálhatunk.



26. ábra. Az \underline{a} és HB_{val} kapcsolata



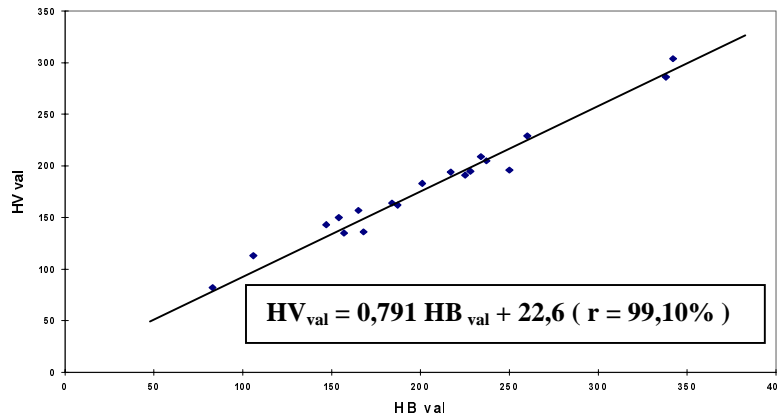
27. ábra. Az \underline{a} és HV_{val} kapcsolata alapanyagokra



28. ábra. Az \underline{a} és HV_{val} kapcsolata hegyanyagokra

4.1. A Brinell és Vickers eljárással meghatározott valós keménységek kapcsolata

A Vickers keménységmérés gyémánt gúlájának 136° -os lapszöge abból a megfontolásból lett megválasztva, hogy a 400 HB-ig a $HV = HB$. Ez meggyőzően igazolva lett azzal is, hogy a HB 1840(2,5)30 = HV 30 feltétel valóban teljesült a vizsgált anyagokra. A Brinell mérés alkalmazhatósági határáig a HV_{val} és a HB_{val} kapcsolatát a 29. ábra mutatja.



29. ábra. A HB_{val} és HV_{val} kapcsolata

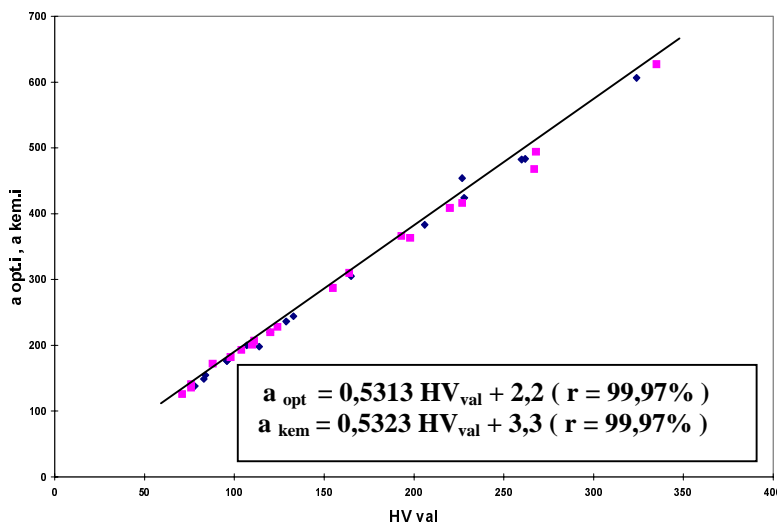
Ezt az ábrát tekintve a következő megállapítások tehetők:

- a $HB_{val} \neq HV_{val}$ ellentétben a HB 1840(2,5)30 és HV 30 egyenlőségével,
- a HB_{val} és HV_{val} közötti korrelációs együttható értéke az eddigiekhez képest a legkisebb.

Az előző két megállapítás okát részletesen elemezve a két különböző szúrószerszám benyomódásához szükséges rugalmas munkák jelentősen eltérő arányában található meg.

Mintegy 20 különböző anyagminőségen – melynek keménysége $120 - 650 HV_{val}$ tartományba esik - az $F = a d^n$ kapcsolat a paramétere kétféleképpen lett meghatározva, nevezetesen:

- az erő-benyomódás görbe folyamatos regisztrálásával, illetve
- különböző terhelőerőkkel készített lenyomatok átlóit felhasználva (10-10 pontpár)



30. ábra. Az optikai és a folyamatos regisztrálással meghatározott a értékek és a valós Vickers keménység kapcsolata

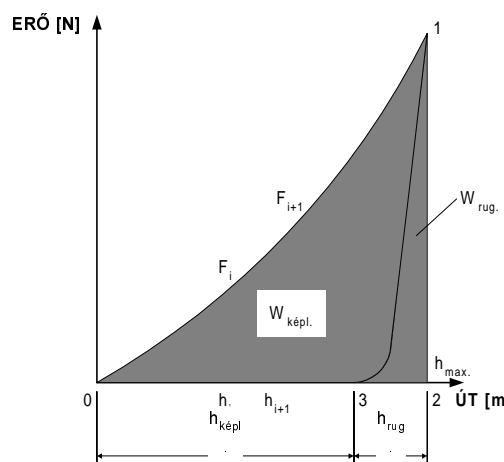
Tisztázandó, hogy az a

paraméter azonos-e mindkét esetben, mert a különböző terhelőerőkkel készített lenyomatok átlómérésénél a kidudorodás miatt a valóságtól nagyobb érték mérhető.

A kétféle eljárással meghatározott erőnövekedési törvény a paramétere és a valós Vickers keménység közötti kapcsolat lineáris (30. ábra). Az optikai (összetartozó erő/lenyomat átló) és a folyamatos regisztrálással kapott a értékek görbéjének meredeksége gyakorlatilag azonos (relatív eltérés mindössze 0,19 % !)

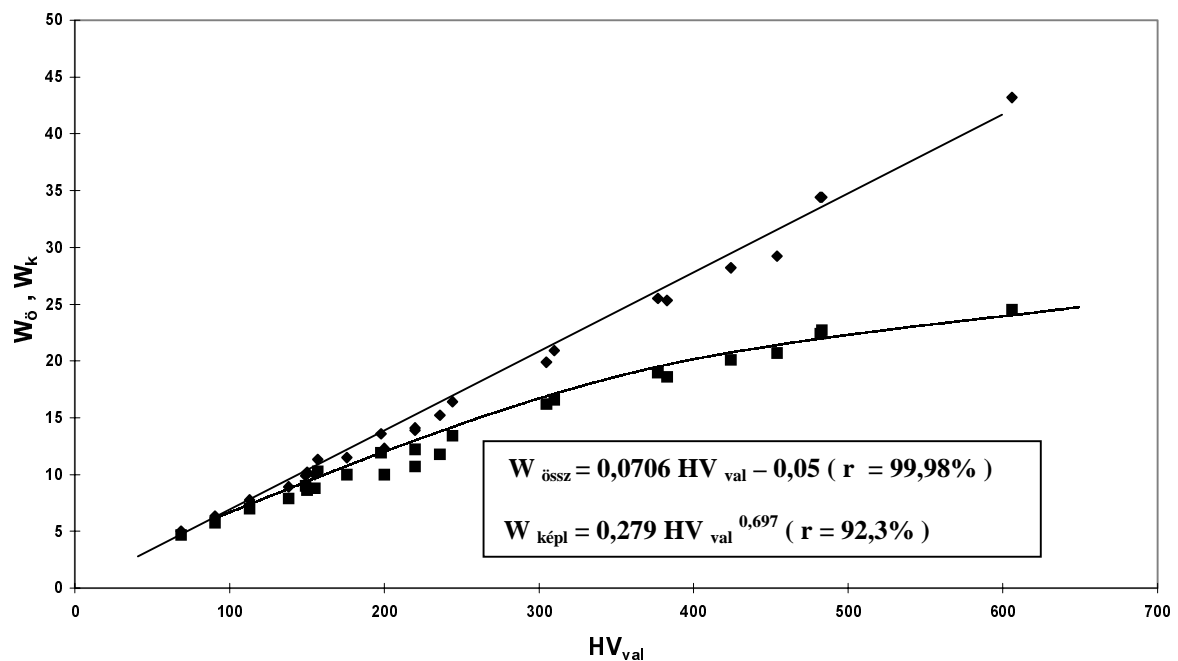
4.2. A keménységmérés során befektetett munka

A keménységmérés során lejátszódó folyamatot szemlélteti a 31. ábra, ahol a pillanatnyi erő és benyomódás kapcsolata látható. E görbék (keménységi diagramok) alapján a keménységmérés során befektetett munka közvetlenül meghatározható planimetrálással a terület léptékének figyelembevételével. A $0-1-2-0$ pontokkal körülhatárolt terület az összes munkát reprezentál ($W_{\text{összes}}$); amelyből a $0-1-3-0$ terület a képlékeny ($W_{\text{képl.}}$) és a $3-1-2-3$. Tartomány a rugalmas ($W_{\text{rug.}}$) hányadot képviseli (31. ábra).



31. ábra. Elvi ábra az összes befektetett munka megoszlásához

A 32. ábra 24 különböző minőségű anyagra vonatkozó mérési eredményeket foglalja össze.



32. ábra. Az összes munka és képlékeny részének kapcsolata a valós keménységgel

Az elvi diagram figyelembevételével megállapíthatjuk:

- a keménység növekedésével nő az összmunka, amely az adott mélységű szerszám elmozduláshoz szükséges,
- minél alacsonyabb a keménység, annál nagyobb a képlékeny alakváltozásra fordított hányad az összmunkán belül,
- növekvő keménységnél megnő a rugalmas utóhatás szerepe.

A 32 ábra alapján megállapítható, hogy az összes munkán belül:

- a képlékeny hányad csökken; $HV_{val} \sim 100$ környékén mintegy 90 %-a, míg $HV_{val} \sim 480$ környékén, ahol a kidudorodásból adódó hiba megszűnik, mintegy 66 %-a az összes munkának,
- az összes és képlékeny rész megoszlása:

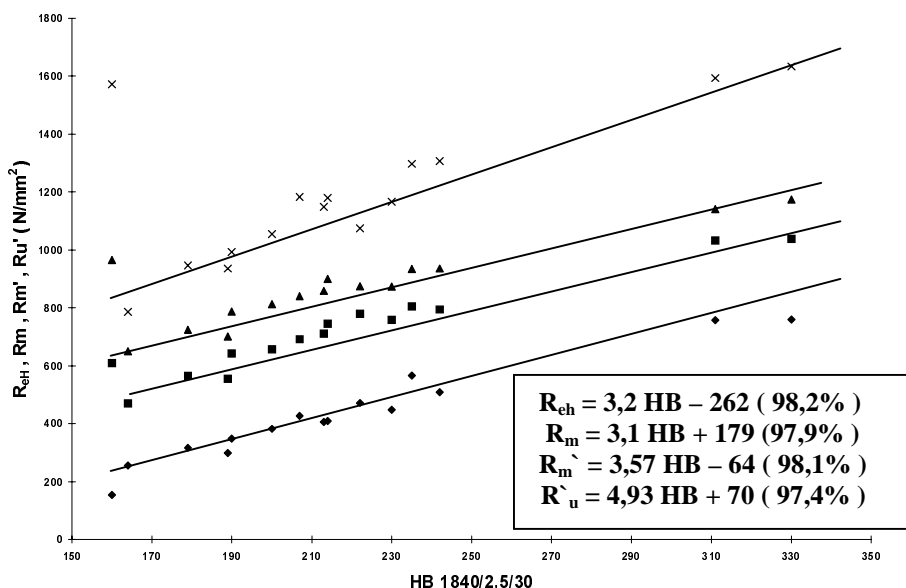
$$\begin{aligned} \text{➤ } W_{\text{összes}} &= 0,1309 \underline{a} \cong 0,13 \underline{a} \\ \text{➤ } W_{\text{képl}} &= 0,429 \underline{a}^{0,697} \cong 0,43 \underline{a}^{0,7} \end{aligned}$$

értéke \underline{a} ismeretében számítható.

- a rugalmas (W_{rug}) hányad gyors növekedése azt jelenti, hogy a befektetett munka egyre nagyobb hányadát a lenyomat környezete rugalmasan elnyeli és egyre kisebb lesz a képlékeny alakváltozás mértéke. Ez azt is felveti, hogy bizonyos valós Vickers keménység felett az anyagok rugalmas tulajdonságát vizsgáljuk, illetve kell vizsgálnunk, semmint a hagyományos módon értelmezett keménységét. Ez további alapos elemzést igényel.

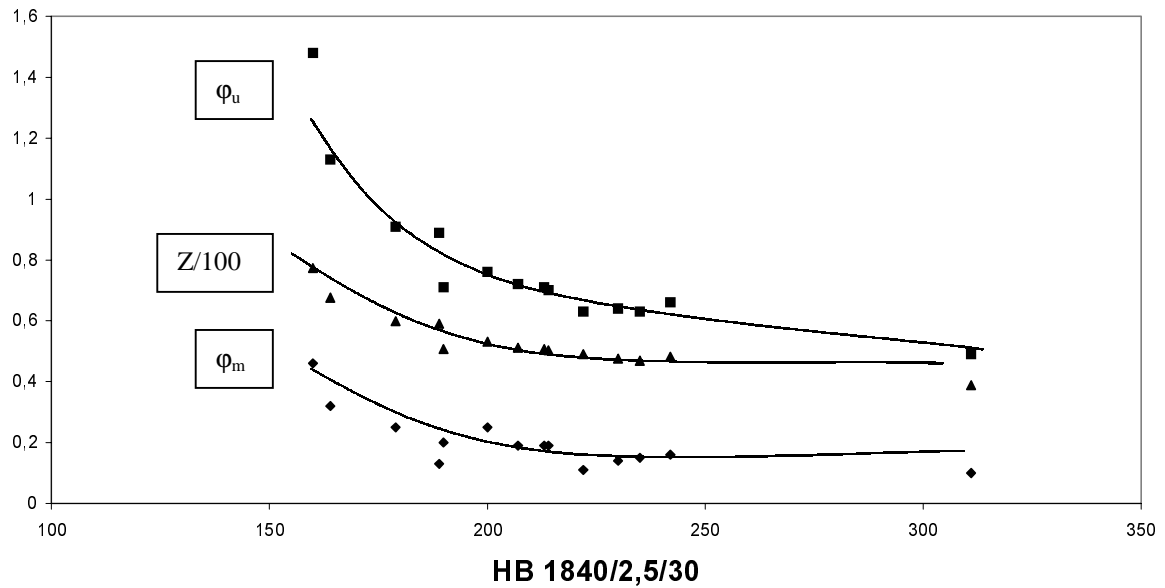
5. A szilárdsági-, képlékenységi jellemzők és a keménység kapcsolata

A Brinell keménység (1840/2,5/30) függvényében a 33.ábrán látható a folyáshatár (R_{eH}), a szakítószilárdság (R_m), a maximális terhelésnél mért valódi feszültség (R'_m) és a szakadási szilárdság (R'_u) alakulása. A KO 36-os anyag kivételével e tartományban a keménység és a szilárdsági értékek kapcsolata jó.



33. ábra.
A szilárdsági jellemzők és a Brinell keménység kapcsolata

A 34. ábra keménység és az alakváltozási jellemzők kapcsolatát foglalja össze.



34. ábra. Képlékenységi jellemzők és a Brinell keménység kapcsolata

A 34. ábrán összefoglalt eredmények analitikus formában a következő kifejezésekkel közelíthetők:

$$\varphi_m = \frac{8855}{HB^2} \quad r = 96,2\% \quad \varphi_u = \frac{1214,2}{HB} \quad r = 93,2\% \quad Z = \frac{5073,4}{HB^{0,855}} \quad r = 98,6\%$$

Mindkét diagram meggyőzően alátámasztja azt, hogy a keménység értékből más, nehezebben és költségesebben meghatározható jellemzők kellő megbízhatósággal becsülhetők.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Brunner, R. G. – Schimmer, L: Ein neues Härteprüfsystem, ein neues Härteprüfgerät. VDI-Berichte, Nr 308, 1978. P 57-62.
- [2] Dengel, D. – Kroeske, E.: Vorstellung eines neuen Gerätes für mechnaische Werkstoffprüfungen. VDI-Z., 1976. Nr5, p 161-166.
- [3] Grigorovics, V. K.: A fémek keménysége és mikrokeménysége. "Nauka" Moszkva, 1976.
- [4] Gudkov, A. A. – Szlaviszkiy, Ju. I.: A fémek és ötvözetek keménységének meghatározási módszerei. "Metallurgia" Moszkva, 1982.
- [5] Káldor Mihály – Bárczy Pál: Terheléstől független keménységi mérőszám és meghatározása. BKL – Kohászat, 1967. 8. sz. p. 349-351.
- [6] Bárczy Pál: Homogén fémek és ötvözetek keménysége és húzószilárdsága közötti kapcsolat. BKL – Kohászat, 1969. 5. sz. p. 202-207.
- [7] Newey, D. – Wilkins, M. A. – Pollack, H. M.: An ultra – low – load penetration hardness tester. J.of phys. E.: Sci. Instr. 1982. P. 11-122.
- [8] Westbrook, J. H. – Conrad, H. /eds/: "The science of hardness testing and its research application." Symp. Oct 18-20. 1971. ASM, Metals Park, Ohio
- [9] Hugh O'Neill: Hardness Measurement of Metals and Alloys, Chapman and Hall, London, 1967.
- [10] Drozd – Szlavszkiy: Zavodszkaja Laboratorija, 1970 Nr. 1. p. 80-84
- [11] Tilevics – Glikman: Zavodszkaja Laboratorija, 1961. Nr. 6.p. 738
- [12] Vaszauskasz – Zsidonisz: Zavodszkaja Laboratorija, 1962. Nr. 5. p. 605-607.
- [13] Eyerer, P. – Lang G. – Heinzelmann: Investigation concerning the dam formation around microhardness indentations. Materialprüfung, 1973. No. 11. p. 379-385.
- [14] Cahoon, J. R. – Broughton, W. H. – Kutzak, A. R.: The determination of yield strength from hardness measurements Metallurgical Transaction 1971. Nr. 6. p. 1979-1983.
- [15] Markovec, M. P.: Fémek mechanikai tulajdonságának meghatározása a keménység alapján. Masinosztroenie, Moszkva, 1979. p. 191.