

Erő – behatolási út mérésén alapuló keménységmérési eljárások

dr. Czinege Imre* - dr. Réti Tamás* - dr. Sárossy György*

Bevezetés

A mikroelektronika, valamint a mérés- és számítástechnika közelmúltban tapasztalt fejlődésével párhuzamosan előtérbe került a keménységmérési módszerek továbbfejlesztése, automatizálása is. A fejlesztési törekvéseket elsősorban a mérés gyorsaságának és megbízhatóságának növelése, a mérés szubjektív tényezőinek kiküszöbölése, valamint az eredmények számítógépes feldolgozásának és dokumentálásának igénye motiválta. A megújulás két fő irányaként a klasszikus keménységmérési eljárások elektronizálása, és az eddigiektől eltérő mérési eljárások kidolgozására tett kísérletek jelölhetők meg. A kialakuló új szemlélet lényege az, hogy a keménységvizsgálat az idő függvényében végbemenő dinamikus folyamat, ahol a keménység értelmezése a terhelés és a behatolási mélység elektromikus regisztrálásán és számítógépes feldolgozásán alapul.

Irodalmi áttekintés

Keménységen a szilárd anyagoknak az alakváltozással szembeni ellenállását szokás érteni, azt az ellenállást, melyet egy szűrőszerszám behatolásával szemben kifejtenek. Ebből következően a klasszikus eljárások mérőszáma a terhelés és a lenyomat nagyságára jellemző méret kombinációjából adódott; *Brinell*, *Vickers* és *Knopp* eljárásnál az erő és a maradón alakváltozott felület hányadosaként, *Rockwell* keménységmérésnél pedig az adott erőhöz tartozó benyomódási mélységként. Ezen hagyományos mérések főbb jellemzői a következők:

- A keménységi mérőszám származtatása mindössze két adat, a névleges terhelő erő és a kapott lenyomat nagyságát jellemző geometriai méret alapján történik, a mérés egész folyamatának és az eredményt befolyásoló tényezők többségének figyelmen kívül hagyásával,
 - A keménység meghatározására kizárólag a maradó alakváltozással létrehozott lenyomat szolgál, a rugalmas alakváltozást az értékelés nem veszi figyelembe.
 - A mérés szubjektív hibákkal valószínűsíthető, és off-line típusú adatfeldolgozásra épül.
- Ezzel a statikus szemlélettel ellentétben valamennyi új típusú keménységmérés közös jellemzője, hogy a keménység definiálásához

használt geometriai alapadat a terhelő erő hatására folyamatosan változó behatolási mélység. A mérés során az F terhelő erőt, valamint az anyagba hatoló szűrőszerszám elmozdulását villamos erőmérő cellával, illetve útdóval mérik, és az eredményeket rendszerint digitalizált formában rögzítik. A keménység értelmezéséhez a felvett erő-út és út-idő függvényeket digitális jelfeldolgozással értékelik. Általában megjegyezhető, hogy az erő – behatolási mélység folyamatos detektálásán alapuló új módszerekkel kapott keménységek, és a hagyományos eljárásokkal meghatározott mérőszámok közvetlenül nem számíthatók át egymásba, csak kísérletileg meghatározott regressziós kapcsolatok írhatók fel közöttük.

Az új módszerek egy tipikus példája az a keménységmérési eljárás, amelyről *Brunner* és *Schimmer* [1] számol be. A mérés legfőbb jellemzője, hogy szinte minden anyagra alkalmazható, a mérőszám zérustól végtelenig terjed, a mért keménység független a terhelő erőtől, a rugalmas és maradó alakváltozás külön detektálható és értékelhető, sőt még az anyag folyási viselkedésére is lehet következtetni. Méréskor az F_v vizsgált erő zérustól 200 N-ig folyamatosan növekszik az s behatolási mélység lineáris függvényeként. A linearitást speciális kompenzátor egység, valamint a szűrőszerszám különleges kialakítása biztosítja (a profilgörbe parabola). A mérés adataiból számított HW keménységet a

$$HW = \frac{F_v(s)}{s} \quad (1)$$

képlet definiálja, mértékegysége formálisan N/mm, értékészlete zérustól plusz végtelenig terjed.

A hagyományos keménységmérési eljárások továbbfejlesztése során a kutatók a meglévő *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell* keménységmérőgépek elvét megtartva próbálták különféle villamos erő-út érzékelőkkel folyamatos regisztrátumokat felvenni.

Ezen kísérletek középpontjában az állt, hogy miként lehet a regisztrátum alapján a keménységet definiálni, milyen pontossági követelmények támasztandók az egyes paraméterek mérése során, milyen kapcsolatban van a létrejövő rugalmas és maradó alakváltozás a keménységgel és az anyag szerkezetével, valamint az újonnan értelmezett keménység hogy hasonlítható össze a hagyományos mérőszámokkal?

A változó kérdésekre az irodalom [2-16] nem ad teljesen egyértelmű választ, de az idézett művek tanulmányozása mindenki szá-

mára meggyőzővé teheti, hogy a viszonyok hallatlanul bonyolultak, és az új típusú regisztrátumok feldolgozásakor is szükség van számos egyszerűsítő feltételezésre. Ezek fényében érthető, hogy a század elején kidolgozott keménységmérési eljárások miért voltak olyan hosszú ideig elfogadottak kétségtelen hibáik ellenére is.

Az erő – út mérésén alapuló eljárások értékelési elve

Közismert, hogy a *Vickers* és *Brinell* eljárás geometriai jellemzőként a lenyomat átlóját fogadja el, de ez az ismert összefüggésekkel átszámítható behatolási mélységre. *Vickers* mérésnél a két mennyiség közötti kapcsolat:

$$d = 2\sqrt{2} \cdot s \cdot \operatorname{tg} 68^\circ = 7,0006 s \quad (2)$$

Ezzel a keménységet definiáló összefüggés: (megkülönböztetésül az erő – út mérésből értékelt keménységi mérőszám jellemző betűje felső indexben szerepel)

$$H^v = 0,00386 F/s^2 \quad (3)$$

Brinell méréskor a lenyomat átlójára a szokásos $d = 0,375 D$ értéket felvéve az átló és a lenyomat mélysége közötti kapcsolat

$$d = 10,28 s \quad (4)$$

A keménységi mérőszám a közismert alakú

$$H^B = \frac{0,102 F}{D \pi s} \quad (5)$$

képlettel adható meg. A felírt egyenletekből az alábbi következtetések vonhatók le:

- a (3) egyenletből következik, hogy *Vickers* mérésnél az $F(s)$ függvénykapcsolat parabolikus. Tekintettel arra, hogy a mérés során a behatolási mélység s_0 kezdeti értéke (a zérus terheléshez tartozó út) csak elvileg definiálható, célszerű ezt a (3) egyenlet átalakításakor figyelembe venni:

$$F = \frac{H^v}{0,00386} (s - s_0)^2 \quad (6)$$

A digitálisan felvett erő – út diagram összetartozó pontjaira az

$$F = a (s - s_0)^2 \quad (7)$$

parabolát illesztve az a értékével közvetlenül kifejezhető a keménység.

- *Brinell* méréskor az $F(s)$ függvénykapcsolat lineáris, az arányossági tényező a geometriai jellemzőkön kívül csak a keménységet tartalmazza:

$$F = D \frac{\pi}{0,102} H^B s \quad (8)$$

* Bánki Donát Műszaki Főiskola

Ennek következtében elegendő az $F(s)$ egyenes iránytangensét meghatározni, majd azt a (8) egyenlet arányossági tényezőjével összevetve a keménység számítható.

– A (2), illetve (4) egyenletekből látszik, hogy a lenyomat átlója és mélysége közötti kapcsolatban kerekítve egy tízes szorzó szerepel. Ez azt jelenti, hogy a mélység meghatározásakor legalább egy nagyságrenddel pontosabban kell mérni, mint az átló mérésekor, hogy a keménységi mérőszám kiszámításakor ugyanakkora pontosság legyen elérhető, mint a hagyományos Brinell és Vickers eljárásnál. Feltételezve, hogy ez utóbbi esetekben a leolvadási pontosság egy ezred mm, a lenyomat mélységét tízezred mm pontossággal kell mérni. A nagyságrendek szemléltetésére egy példa: 0,21 mm-es Vickers lenyomat átlónak 0,03 mm mélység felel meg, ezt 300 tizedes mm-ben kell kifejezni, amely jelentős követelmény a mérőrendszerrel szemben.

A Rockwell keménységmérésnél az előbbiekhez hasonló átszámítási igények nem merülnek fel, mert ez a mérőszám közvetlenül a benyomódási mélységgel van meghatározva. Ezért a közismert definíciók egyenlet a

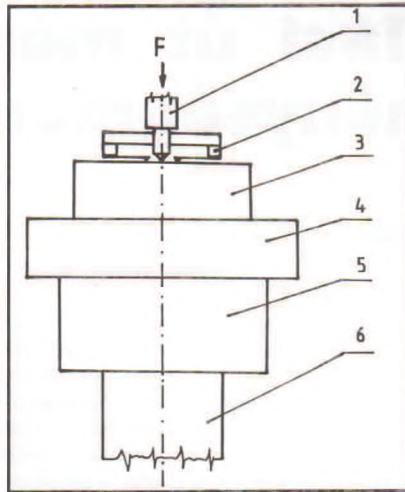
$$H^{RC} = 100 - \frac{s}{0,002} \quad (9)$$

alakot vesz fel. A képletben s a maximális terheléshez tartozó teljes benyomódás, és az $F_0 = 98,1$ N előterheléshez tartozó benyomódás különbsége. Az erők ismeretében a két benyomódási mélység és azok különbsége egyszerűen meghatározható.

A vázolt gondolatmenet röviden bemutatta a digitálisan felvett erő – út diagramok értékeléséhez felhasználható összefüggéseket. A mérési adatok felvétele, valamint a lineáris és a parabolikus közelítő függvények illesztése a legkisebb négyzetek módszerével számítógéppel oldható meg a jelenlegi igények és lehetőségek szintjén.

Mérő- és jelfeldolgozó rendszer

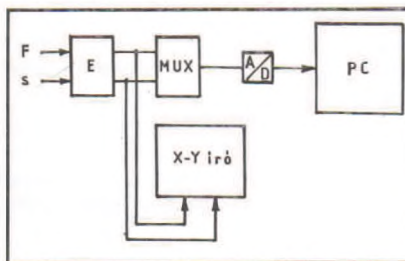
A vázolt alapelvek ismeretében a Főiskola a Paksi Atomerőmű Rt. jogelődje, a PAE megbízásából két mérőrendszert dolgozott ki atomerőművi berendezések, illetve a reaktorban besugárzott próbatetek vizsgálatára. A kísérleti mérőegység elvi felépítését az 1. ábra mutatja. Az eddigi megoldásoktól alapvetően eltérő módon az 1. mérőtestre közvetlenül van felerősítve a 2. nyúlásmérő bélyeges elmozdulásérzékelő, melynek tapintói a szűrőszerszám közelében a mérendő felületre támaszkodnak. A kétoldali elrendezés a hajlításból eredő hibák kiküszöbölésére szolgál. A 3 próbatet a gép 4 asztalán nyugszik. Az asztal és a 6 terhelő orsó között van elhelyezve az 5 villamos erőmérő cella, így lényegében bármely univerzális keménységmérőgépre felszerelhető a teljes mérőrendszer a gép összes eredeti funkciójának változtatlanul hagyása mellett. Ezáltal az erő – út mérésen



1. ábra Erő-út mérésen alapuló keménységmérés elvi vázolata

alapuló értékelés eredményei közvetlenül összehasonlíthatók a hagyományos vizsgálatokkal.

A villamos mérő- és jelfeldolgozó rendszer blokkvázlatát a 2. ábra mutatja. A mért F erő és s elmozdulás nyúlásmérő bélyeges jeladói az E jelű erősítő bemenetére csatlakoznak, a két mérőcsatorna az 5 V-os kimenő jelét az A/D konverterrel egybeépített multiplexer (MUX) fogadja. Az eredményeket ipari szabványú számítógép (PC) dolgozza fel. Fizikailag mind az erősítő, mind az analóg-digitál átalakító a számítógépbe van beépítve. Az erősítő kártya saját fejlesztésű, a PCL 812 jelű univerzális kártya ADVANTECH gyártmányú. Járulékosan a mérőrendszerhez csatlakoztatható egy analóg plotter is hagyományos regisztrumok készítése céljából. A vázolt rendszerrel ugyanúgy lehet mérni, mint hagyományos eljárással, a számítógépes program az útjel adott szintjéről indítja a mintavételezést, az erő maximumának elérése után parancsot ad a letérhelésre, majd ennek megtörténte után elvégzi a kiértékelést.



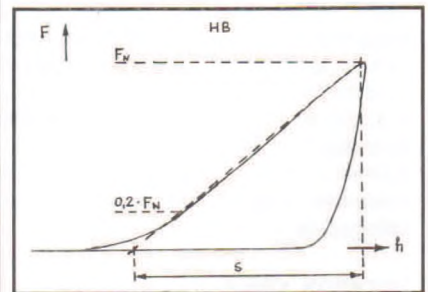
2. ábra Villamos mérőrendszer az erő- és útjel feldolgozásához

Az erő- és útmérő egység az ismert módon hitelesíthető. A 2000 N méréshatárú cella megfelelő a 2,5 mm átmérőjű Brinell golyóval acél próbatetekeken végzett méréshez, valamint a HV30 Vickers keménységméréshez is. Az útmérő méréshatára Brinell mérésnél 0,5 mm, Vickers mérésnél 0,2 mm. Ez utóbbi esetben a 12 bites A/D konverter felbontóképességét figyelembe véve egy digit tizedes mm-nek felel meg.

Megjegyzendő, hogy az ismertetett berendezés az előzetes méréshez és előkísérletekhez szolgáltatott adatokat, a tényleges mérőrendszer saját terhelő egységgel ellátva készült, az atomerőművi igényeknek megfelelően, teljesen távvezérelt kivitelben.

A kísérleti eredmények értékelése

Egy Brinell keménységmérés során felvett regisztrumot, valamint az értékeléshez szükséges mennyiségek jelölését a 3. ábra mutatja. Az ábrán a h benyomódási mélység a vízszintes tengelyen, F a függőleges tengelyen van feltüntetve. A regressziós egyenes illesztését a számítógép a felterhelés bizonytalanságai miatt az állandósult lineáris szakaszon, $0,2 F_N$ és F_N között végzi el. Az egyenes egyenletének ismeretében az 0 és F_N erőkhöz tartozó h útértékek számíthatók, ezek különbsége adja a névleges erőhöz tartozó s benyomódást, mely a (8) képletben szerepel. Ezzel az értékelési móddal a felterheléskor



3. ábra Brinell keménységmérés során felvett erő-út diagram és az értékeléshez használt jellemzők

mért erő-út diagram mérési pontjainak 80 %-a figyelembe van véve, tehát a mérési bizonytalanságok minimálisak. Megjegyzendő viszont, hogy ez a számítási modell mind a rugalmas, mind a maradó alakváltozást figyelembe veszi. Elvileg a visszaterhelési szakasz ismerete módot nyújtana a rugalmas alakváltozás elkülönítésére, de ez az elemzés még nem készült el.

Hasonló értékelés készült a Vickers és Rockwell eljárásra is, természetesen az egyes módszerek eltérő sajátosságainak figyelembevételével. A teljes mérési ciklus vezérlésére kidolgozott számítógépi program főmenüje a következő választásokat kínálja:

BEÁLLÍTÓ ÜZEM
ALAPADATOK
MÉRÉS
ÉRTÉKELÉS
ADATTÁROLÁS
KILÉPÉS A PROGRAMBÓL

Beállító üzemen történhet az erő- és útjel hitelesítése, valamint az egyes mennyiségek nullpontjának beállítása. Az Alapadatok menüje választást kínál az egyes keménységmérési eljárások között (HB, HV, HRB, HRC), és módot ad a méréshatárok, léptéktényezők változtatására. Mérés üzemmódban a számítógép elmozdulás jelről indítja a mintavételezést, folyamatosan rajzolja a mérési

pontokat, majd a névleges erő elérések hangjelzést ad. Ezután hagyományos gépen a kezelő, automata berendezésen a beavatkozó szerv elvégzi a leterhelést, szintén folyamatos adatgyűjtés közben. Az *Értékelés* menüpontban a számítógép meghatározza a mért adatokból a keménységet, majd az *Adattárolás* funkcióban mód van az összes mérési eredmény és a számított értékek eltárolására. Teljesen automatikus üzemmódban ezek a feladatok emberi beavatkozás nélkül végrehajthatók.

Az ismertetett berendezéssel és értékelési módszerrel kapott eredményeket a hagyományos keménységmérések eredményeivel összehasonlítva lehetőség nyílt a kétféle mérés közötti regressziós kapcsolatok kiszámítására. Ezek eredményeit összefoglalóan az *1. táblázat* mutatja.

1. táblázat

Benyomódásból számított és mért keménységek összehasonlítása

HX	Tartomány	N	m	b	r ²
HB	135-285	27	0,8271	47,1969	0,9769
HV	142-484	21	0,9452	46,9025	0,9781
HRC	21-64	22	1,0114	-9,1528	0,9898

A táblázatban például Brinell mérésre a következő egyenlettel definiált regressziós együtthatók találhatók:

$$H^B = m \cdot HB + b \quad (10)$$

Fel van tüntetve továbbá a táblázatban a mérések száma (N), a regressziós együttható négyzete (r²), valamint a mért értékek tartománya.

Az eredményekből látható, hogy a regressziós egyenes iránytangense HRC mérés esetén van legközelebb az 1-hez, ezt követi a HV, majd a HB mérés. A nullpont eltolódás (b) a Brinell és Vickers mérésnél közel azonos

és pozitív irányú (a benyomódási mélységből számított értékek magasabbak), ugyanez Rockwell mérésre negatív. A regressziós együttható értéke mindegyik esetben 1-hez közel van, ami a kapcsolat szorosságát jelzi. Ez a tény lehetőséget ad az új eljárással kapott eredmények hagyományos mérőszámokká való átszámítására.

Összefoglalás

Az erő – benyomódási mélység folyamatos mérésén alapuló új mérő- és értékelő-rendszer valós idejű mérésre ad lehetőséget, a keménység meghatározása objektív kritériumokon alapul. A mérés és értékelés automatizálható, és a berendezés megfelelő terhelő egységgel kiegészítve távirányítottan is működtethető. Az új módszerrel kapott eredmények jól korrelálnak a hagyományosan mért keménységekkel, tehát az új eljárás minden olyan helyen eredményesen használható, ahol nagyszámú mérésre van szükség, vagy környezeti ártalmak miatt kezelő személyzet jelenléte nem oldható meg. A kifejlesztett berendezés alkalmas az erő – benyomódási mélység függvénykapcsolat mélyebb tanulmányozására, és új szemléletű mérőszámok kidolgozására is.

Irodalom

[1] Brunner, R.G., Schimmer, L.: Ein Neues Härteprüfsystem, ein neues Härteprüfgerät, VDI-Berichte, Nr. 308. (1978)
 [2] Baden, M., Dengel, D.: Vickershärteprüfung im Kleinlast und Mikrobereich mittels Eindringtiefmessung, HTM 40 1985 107-114.
 [3] Dengel, D., Kroeske, E.: Vorlastfreie digital Härtemessung mit dem Vickers Eindringkörper zur Ermittlung der Härtekenzahl unter Last, VDI-Berichte, Nr. 308 (1978) 63-69.

[4] Dengel, D., Kroeske, E.: Über Ursache und Unterdrückung der Prüfkraftabhängigkeit der Vickershärte, HTM 39 (1984) 194-198.
 [5] Gale, K.: Rockwell-Härteprüfung mit verschiedenen Variationen, Materialprüf. 26 (1984) Nr. 3. 69-70.
 [6] Meincke, H.: Neue Erkenntnisse zur Kugeldruck-Härteprüfung, Materialprüf. 24 (1982) Nr. 1. 21-24.
 [7] Meincke, H.: Härteprüfgerät mit Tiefenmessung für stofflich und geometrisch ausgezeichnete Materialwerte, Materialprüf. 24 (1982) Nr. 5. 173-176
 [8] Meyer, R.: Ein Universal-Härteprüfautomat nach Vickers mit Tiefenmessung, VDI-Berichte 583, Härteprüfung in Theorie und Praxis, VDI Verlag (1986) 63-86.
 [9] Munk, D.: Die Prüfung der Brinellhärte nach dem Eindringtiefmessverfahren, VDI-Berichte, Nr. 308. (1978) 129-134
 [10] Rupp, D.M.: Verfahren zur Messung von inhomogenen Härteverteilung an metallischen Bauteilen, VDI-Berichte 583, Härteprüfung in Theorie und Praxis, VDI Verlag (1986) 491-512.
 [11] Sack, W., Schirra, D.: Elektronisches Härteprüfgerät zur automatischen Kontrolle in der Serienfertigung, Materialprüf. 25 (1983) Nr. 1/2. 13-15
 [12] Schmidt, W., Schaffrath, W.: Die Austauschbarkeit von Härte- und Festigkeitswerten und ihre Beeinflussung durch Anlassen bei Vergütungs- und Kaltarbeitsstählen, Materialprüf. 26 (1984) Nr. 3. 57-61
 [13] Weiler, W.: Zur Definition einer neuen Härteskala bei Ermittlung des Härtewertes unter Prüfung, Materialprüf. 28 (1986a) Nr.7/8. 217-220
 [14] Weiler, W.: Ein optimales Härteprüfgerät mit neuartiger Skala zur Ermittlung des Härtewertes unter Prüfkraft, Materialprüf. 28 (1986b) Nr. 10. 311-315
 [15] Wiertelwski, G.: Elektronische Datenverarbeitung in der Härteprüfung, Materialprüf. 26 (1984) Nr. 3. 67-69
 [16] Zillmann, L.: Zeitgemasse Härteprüfung, 26 (1984) Nr. 3. 70-73.

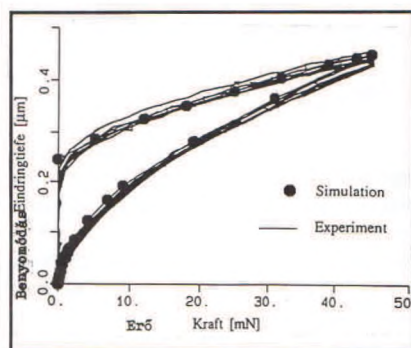
923 073 068-070

A regisztrációs keménységmérés modellezése

A felületek és rétegek mechanikai tulajdonságait gyakran regisztrációs keménységméréssel jellemzik. Ennél az eljárásnál a gyémánt szűrőszerszámot folyamatosan növekvő terhelő erővel nyomják a vizsgát tárgy felületébe és közben regisztrálják a behatolás mélységét a terhelő erő függvényében. A terhelés és a tehermentesítés jellegzetes menetét szemlélteti az ábra.

A Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik – IWM végelemes modelljével vizsgálható e keménységmérési módszert befolyásoló tényezők, amelyek a következő két csoportba sorolhatók:

- A vizsgálókészülék jellemzői, mint
 - a szűrőszerszám geometriája,
 - a mérés pontossága és
 - a terhelési irány eltérései.
- A bevonattal ellátott próbatest jellemzői, mint.
 - a rugalmas alakíthatósága (rugalmassági modulusz, Poisson-tényező),



Szilícium hordozóra felvitt nio bium-szénhidrogén rétegen több mérésel regisztrált benyomódás – erő görbe és a modellel számított eredmények (•) összehasonlítása

- a képlékeny alakíthatósága (folyáshatár, keményedés),
- a felületi réteg vastagsága,

- a réteg és a hordozóanyag közötti átmeneti zóna tulajdonságai és
- a szűrőszerszám és a próbatest közötti surlódás.

A kísérleti és a numerikus vizsgálat kombinálásával lehetőség van a két csoport jellemző hatásainak elkülönített meghatározására. Ezáltal a próbatest anyagának a terhelő erőre adott jellemző válasza meghatározható. A referencia próbára – például szilíciumra – vonatkozó modellszámítással a vizsgálókészülék kalibrálható, azaz jellemzői kideríthetők. Ezzel a különböző vizsgálókészülékek eredményei összehasonlíthatóvá válnak. A modellezés és a kísérlet kombinálásával kiderített próbajellemzők, mint bemenő paraméterek, felhasználhatók a feszültségeloszlás számításához. Ennek alapján a rétegrendszerrel mondhatunk véleményt. (L.K.)

(A Fraunhofer-Gesellschaft tájékoztatója)