

## Hagyományos és műszerezett ingás ütőgépek hitelesítése és kalibrálása

Lenkeyné Dr. Biró Gyöngyvér

Az ingás ütőgépek alkalmazása több mint 100 éves múltra tekint vissza. Ingás ütőművel már a múlt század végén végeztek törési vizsgálatokat Amerikában, de a jelenleg elterjedten alkalmazott ütőgépek elődje a G. Charpy által javasolt berendezés (Budapesten 1901-ben az anyagvizsgáló konferencián terjesztette elő javaslatát). Az ütővizsgálat fejlődésében újabb mérőföldkövet jelentett a műszerezett ütővizsgálat megjelenése, amelynek alkalmazása a nyúlásmérő bélyegek megjelenését követően terjedt el igazán az 1950-es évektől kezdődően. A hagyományos ingás ütőgépek hitelesítésére vonatkozó európai szabvány jelenlegi formáját 1992-ben adták ki, amelyet 1994-ben honosítottak. A műszerezett ütőművek erőmérő rendszerére és annak kalibrálására vonatkozó szabványjavaslatot az 1990-es években dolgozták ki, és a műszerezett ütővizsgálatról szóló nemzetközi ISO szabvány ebben az évben lépett hatályba.

### Hagyományos ütőművek

A hagyományos ingás ütőgépek hitelesítési eljárásait és követelményeit az 1994-ben kiadott MSZ EN szabvány [1] tartalmazza. E szerint kétféle módszert: a közvetlen, illetve a közvetett hitelesítést lehet alkalmazni.

**A közvetlen hitelesítés** kiterjed az ütőmű valamennyi fontos geometriai jellemzőjének (mint pl. az alap, a gépállvány és az inga helyzete, az inga és az ülékek geometriája, az ütési középpont helyzete) ellenőrzésére. Ezen kívül ellenőrizendő az ütőgép kijelző szerkezetének pontossága, a gép tényleges kezdeti helyzeti energiája, a súrlódási veszteségek és az ütési sebesség. Ezekhez a mérésekhez általában valamilyen beállítósablont, illetve speciális mérőeszközöket (szögmérő, erőmérő) kell használni.

**A közvetett hitelesítés** ismert törési energiájú referencia-próbatestek eltörésével végzik. Ezt megelőzően azonban néhány egyéb paraméter ellenőrzését is el kell végezni (ülékek geometriája, súrlódási veszteségek). A referencia-próbatestekre az a jellemző, hogy a lehető legazonosabb körülmények között előállított próbatestek, amelyeknek a törési energiája nagyon kis tartományon belül szór. A közvetett hitelesítést legalább két törési energiaszintű próbatest-sorozattal kell elvégezni, lehetőleg az ütőgép mérési tartományának két szélső értékéhez közeli energia értékeken. Az elvégzett mérések alapján megadható az ütőgépre jellemző ismétlődőképesség és hibaérték, amelyeknek adott határértéken belül kell lenniük.

A gyakorló anyagvizsgáló számára még egy fontos kérdés van: milyen gyakran kell elvégezni a hitelesítést, és melyik módszerrel? A szabvány előírásai szerint közvetlen hitelesítést csak akkor kell végezni, ha a közvetett hitelesítés nem ad megfelelő eredményt, illetve az ütőgép felállításakor, a méretpontosságot befolyásoló javítás vagy áttelepítés után, vagy ha a hitelesítés érvényessége lejár. A közvetett hitelesítés gyakorisága függ az ütőgép igénybevételétől is, de célszerű legalább 12 havonta elvégezni.

### Műszerezett ütőművek

A műszerezett ütőművek hitelesítése a nem műszerezett berendezésekhez hasonlóan történik. Többlet követelményt és feladatot jelent a felműszerezett ütőműnek mint erőmérő cellának a kalibrálása, illetve a mérőrendszerrel szemben támasztott mérés technikai követelmények kielégítése és ellenőrzése.

A műszerezett ütővizsgálat elvégzése során az anyagvizsgáló néhány, a többi vizsgálati módszernél nem jelentkező és a vizsgálatok

eredményeinek értékelése szempontjából fontos problémával találkozhat. Az ütési folyamat egy gyors tranzienst jelent, amit megfelelő gyorsasággal, pontossággal kell tudni mérni és tárolni. A mérőeszközök hitelesítése, kalibrálása általában etalonműszerral való összehasonlító méréssel, statikusan történik. Itt viszont egy rendkívül gyorsan változó, dinamikus erőjelre kell a mérőrendszer kalibrálását elvégezni.

### A mérőrendszerrel szemben támasztott követelmények

A műszerezett ütővizsgálat mérés technikai szempontból gyors tranzienst jelek mérését és ezek valamilyen elektronikus adatgyűjtő eszközzel való gyűjtését, tárolását jelenti. A mérés szempontjából a legfontosabb vizsgálat-technikai feltételek az alábbiakban foglalhatók össze:

A nyúlásmérő bélyegekkel felműszerezett ütőműről kapott jeleket erősíteni kell. Erre a feladatra ma leginkább a nagy sávzélességű egyenáramú erősítők alkalmasak. Az erősítők frekvencia-átvitelében azonban a bennük lévő elektronikus elemek tehetetlensége miatt korlátozott. Az új ISO szabvány [2] szerint a teljes mérési lánc (műszerezett ütőmű, erősítő és adattároló eszköz) határfrekvenciájának legalább 100 kHz-nek kell lenni, ami legfeljebb 3,5  $\mu$ s jelfelfutási időt jelent. A mérőrendszer gyorsasága legegyszerűbben az inercia csúcs mérésével ellenőrizhető. Akkor lehet megfelelően gyorsnak tekinteni a mérőrendszert, ha 5–5,5 m/s ütési sebesség esetén legalább 8 kN nagyságú inercia csúcs jelenik meg a felvett erő-idő diagramon. (Ez a feltétel akkor érvényes, ha az ütőművel lévő nyúlásmérő bélyegek 11–15 mm távol vannak az ütközési ponttól.)

A mérési lánc másik eleme az erősítő mellett a jelrögzítő eszköz, ami ma már valamilyen korszerű, digitális tárolóeszközt jelent (pl. digitális tárolós oszcilloszkóp, számítógépes, gyors digitalizáló kártya). A megfelelő pontosságú erőmérés érdekében ennek legalább 8 bit felontásúnak kell lennie (de 12 bit javasolt), és legalább 2000 adatpontot kell tudni tárolnia 8 ms-nál hosszabb idejű törési folyamat esetén.

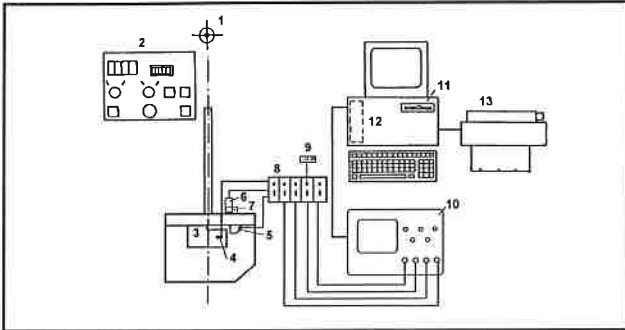
### A műszerezett ütőmű kalibrálása

A műszerezett ütővizsgálat egyik fontos problémája a felműszerezett ütőműnek mint erőmérő cellának a kalibrálása. Az új ISO szabvány [2] ezzel kapcsolatban azt tartalmazza, hogy a mérőrendszer kalibrációja a gyakorlatban statikusan végezhető, vagyis tulajdonképpen nincs kötelező előírás. A gyakorlatban és a szakirodalomban is többféle kalibrálási módszer található. A kalibrálási módszer alapvetően statikus vagy dinamikus lehet. Mivel az erőmérő cella rugalmasan viselkedik és a rugalmas tulajdonságok elvileg függetlenek az igénybevétel sebességétől, ezért a statikus és a dinamikus hitelesítés eredményének meg kellene egyeznie. Ezzel szemben a gyakorlatban a statikus és a dinamikus hitelesítés eredménye jelentősen eltérhet egymástól. Az eltérés oka lehet a bélyegragasztó dinamikus hatásokkal szembeni érzékenysége, továbbá a jelátadó rendszer jellemzőinek a jelátadás sebességétől való függése, valamint befolyásolhatja az ütőmű dinamikus viselkedése, az ütőmű kialakítása, a kalapács merevsége is.

A műszerezett ütőmű hitelesítésére vonatkozóan a szakirodalom és a létező szabványajánlások több lehetséges módszert tartalmaznak. Az ASTM szabványajánlás [3] dinamikus kalibrálást javasol egy terhelési sebességre érzéketlen anyagból készült Charpy-V próbatesttel. A DVM-001 előírás [4], az ESIS TC-5 Sub-Committee által készített szabványajánlás-tervezet [8] – ami tulajdonképpen az új ISO szabvány alapját szolgáltat sok tekintetben – a beépített ütőművel elvégzett statikus kalibrálást tartalmazza. A gyakorlatban elterjedten használt egy másik dinamikus kalibrálási módszer is, amely az erő-út diagram alatti terület és a

mért ütmunka egyenlőségének feltételezésén alapul [5, 6, 7, 9]. Az [5]-ben egy lehetséges dinamikus kalibrálási módszerként említik a különböző energiákkal végrehajtott „low-blow” vizsgálatot.

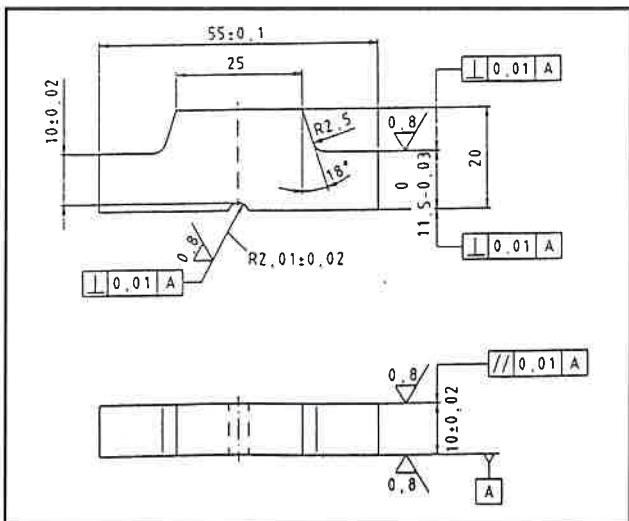
Ezen kalibrálási módszerek összehasonlítására több vizsgálatosorozatot is végeztünk a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában lévő PSD 300/150 típusú műszerezett ütművön. Az ütgép feje U alakú, kiszerezhető ütőlélek oldalfelületein 2 db nyúlásmérő bélyeg van elhelyezve. A berendezés és a mérőrendszer sematikus rajzát az 1. ábra mutatja.



1. ábra. Műszerezett ütmű és a mérésadatgyűjtő rendszere  
 1 Szög mérés; 2 PSD 300 /150 ütmű; 3 Műszerezett ütőél;  
 4 Mérőbélyegek; 5 Mágneses- és elektro-emissziós érzékelők;  
 6 Optikai trigger egység; 7 Triggerelő zászló; 8 Tápegység és erősítők;  
 9 Idő kijelző; 10 Digitális tárolás oszcilloszkóp; 11 PC;  
 12 GPIB kártya; 13 Printer

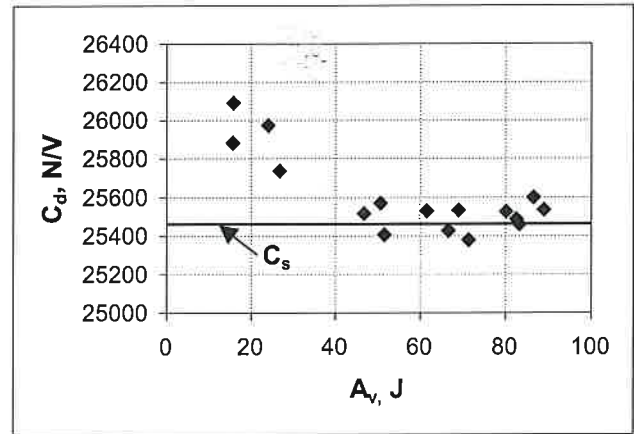
**Statikus kalibrálás**

Az új ISO szabvány [2] szerint a mérőrendszer kalibrációja a gyakorlatban statikusan végezhető, és a kalibrálást a kalapácsba beépített ütőlélek (in-situ) ajánlott elvégezni. Ezt pl. úgy lehet végrehajtani, hogy az ütműhöz egy speciális terhelőkeretet rögzítünk, amin egy kalibrált erőmérő cella van. Ennek segítségével az ütőélet egy, a szabvány által javasolt kialakítású, edzett acélból készített támaszhoz (2. ábra) nyomjuk folyamatosan növekvő erővel. (A támaszban kialakított bemélyedés az ütvizsgálat közbeni Brinell-deformáció miatt kialakuló kontakt feltételeket próbálja modellezni.) A műszerezett ütőél jelét ezek után összevetve a hiteles mérőcella jelével, meghatározható a műszerezett ütőél jellemző statikus kalibrációs tényező ( $C_s$ ) (3. ábra).



2. ábra. A műszerezett ütőél (2 mm-es sugarú) kalibrálásához javasolt támasz

Ahogy az a 3. ábrán látható, a  $C_s$  értéke nem állandó, függ az erő értékétől. A gyakorlatban elfogadható kalibrációs tényező értéket kaphatunk, ha az állandósult szakaszban szereplő értékek átlagát képezzük.



3. ábra. Beépített ütőlélekkel végzett kalibrálással meghatározott statikus kalibrációs tényező függése a terhelő erőtől

A statikus kalibrálás elvileg kiszerezelt ütőlélen is végezhető úgy, hogy pl. az ütőélet egy szervohidraulikus szakítógépen folyamatosan növekvő erővel terheljük. Közben mérjük egyrészt a szakítógép erőmérő cellájának a jelét ( $F_s$ ), valamint az ütőlélen lévő mérőbélyegekről a hozzájuk tartozó erősítőn keresztül érkező feszültségeket ( $U_i$ ). Az ütőél műszerezése akkor jó, ha a kapott diagram egyenes. Ebből az egyenesből egy tetszőleges pontban számítható a statikus kalibrációs tényező:

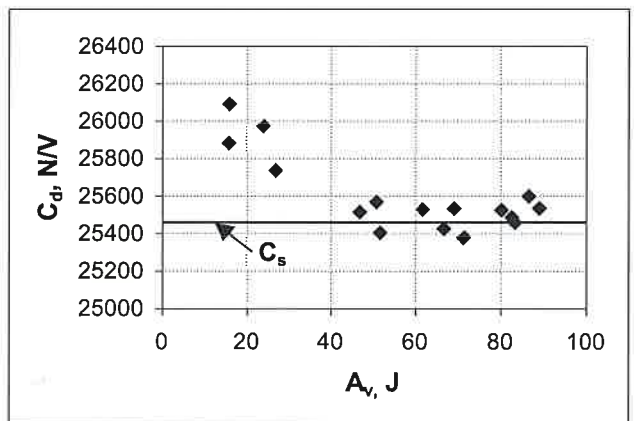
$$C_s = \frac{F_s}{U_i} \quad , \quad N/V \quad (1)$$

**Dinamikus kalibrálás az erő-idő diagram alapján**

Ennél a kalibrálási módszernél feltételezzük, hogy az erő-idő diagram alatti területből számított energia ( $A_{sz}$ ) megegyezik az ütműről leolvasott energiával ( $A_v$ ). Az elkövetett hiba annak az energiahányadnak a nagyságától függ, ami az ütgépben nyelődik el a rezgéseken keresztül. (Ez az energia nem jelenik meg az erő-idő diagramban.) Ez az energiahányad pedig annál kisebb, minél nagyobb a próbatest ütmunkája. Figyelembe véve az inga sebességének a változását az ütés közben a dinamikus kalibrációs tényező számítható [7]:

$$C_d = \frac{mv_0}{T_f} \left\langle 1 - \sqrt{1 - \frac{E_d}{\frac{1}{2}mv_0^2}} \right\rangle \quad , \quad N/V \quad (2)$$

ahol:  $v_0$  – a kalapács sebessége az ütés előtt, m/s;  
 $m$  – a kalapács redukált tömege, kg;  
 $T_f$  – a feszültség-idő diagram alatti terület, V.s, azaz:



4. ábra. A dinamikus kalibrációs tényező változása a törési energia függvényében

$$T_f = \int_{t=0}^{t_f} U(t) dt \quad (3)$$

A dinamikus kalibrációs tényező valamennyi elvégzett műszerezett ütővizsgálatnál meghatározható, de a megbízható vizsgálati eredmények érdekében célszerű a kiértékelési számításoknál több mérés átlagából számított kalibrációs értéket használni, és ehhez a nagyobb ütőmunka tartományban végezni a kísérleteket. Ahogy azt a 4. ábra is mutatja, a nagyobb ütőmunka tartományban végzett kísérletekből kapott kalibrációs tényezők jó egyezést mutatnak a statikus értékkel, míg az alacsonyabb ütőmunka értékeknél jelentős eltérés mutatkozik.

**Dinamikus kalibrálás terhelési sebességre nem érzékeny ötvözetből készült próbatesttel**

A dinamikus kalibrálás történhet terhelési sebességre nem érzékeny, előzetesen pontosan megvizsgált, ismert tulajdonságú modellanyagból készült V-bemetszésű próbatestek segítségével. Az ASTM E24.03.03. [3] szabványajánlás kétféle modellanyagot javasol: az ASTM 6061-T651 jelű Al-ötvözetet és az ASTM 4340 jelű acélt. A kalibrálás történhet maximális erő illetve ütőmunka alapján.

Mi a hitelesítést az Al-ötvözetből készült próbatesteken végeztük el maximális erőre:

Először Charpy-V próbatesteken statikus hajlítóvizsgálatokkal meghatároztunk egy átlagos maximális erőt:  $F_{max} = 6086 \pm 50 N$ .

Ez után ütővizsgálatokat végeztünk, és a felvett feszültség-idő diagramok maximális feszültségeinek átlagát határoztuk meg:

$$J_m = 0,625 \pm 0,03 V$$

Ezek után a dinamikus kalibrációs tényező:

$$C_{d2} = \frac{F_{max}}{U_m} = 9746 N/V. \quad (4)$$

**Dinamikus kalibrálás „low-blow” vizsgálattal**

A „low-blow” vizsgálat tulajdonképpen egy kis energiával (néhány J) végrehajtott ütés. Ez a technika úgy használható fel a műszerezett ütőel dinamikus kalibrálására, hogy egy nagy szilárdságú acélból készült, bemetszés nélküli ütőpróbatestet olyan kis magasságból elengedett ütőkossal ütünk meg, hogy a próbatestben csak rugalmas alakváltozás következzen be. Ha a próbatestben csak rugalmas deformáció történt, és elhanyagoljuk az ütőműben elnyelt energiát, akkor a kalapács sebessége az ütközés előtti  $v_0$  értékről az erő-idő diagram maximális pontjához tartozó időpillanatig ( $t_m$ )  $v=0$  értékre csökken. Feltételezhetjük továbbá, hogy a kalapács sebessége egyenletesen lassul, ezért az átlagsebessége  $v=v_0/2$ -nek tekinthető. Így a kos ütközés előtti kinetikus energiája egyenlő az erő-idő diagram alatti területből számolt energiával ( $E_m$ ), ami a maximális erő értékig felemésztett energia. Ez alapján a dinamikus kalibrációs tényező:

$$C_{d3} = \frac{mv_0}{T_m}, N/V \quad (5)$$

ahol  $T_m = \int_0^{t_m} U(t) dt, V.s.$

Két, különböző műszerezett ütőélre vonatkozó kalibrálási eredményeket tartalmaz az 1. táblázat.

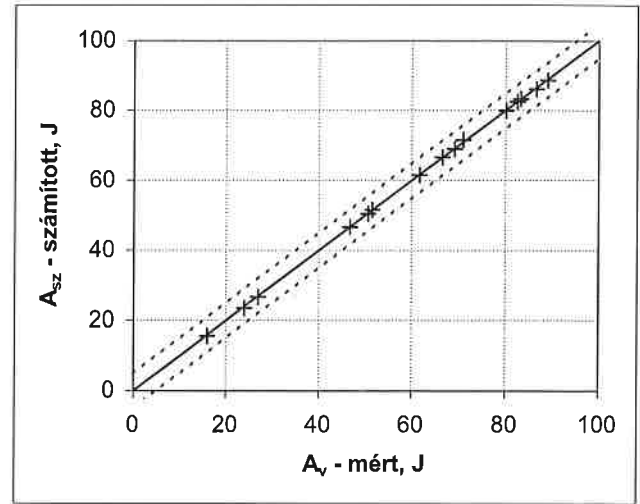
Az eredmények összehasonlítása azt mutatja, hogy a statikus és a dinamikus kalibrációs tényezők között 0,1–17% eltérés is lehet a mérési módszertől függően. A statikus kalibrációs tényezőtől a legkisebb eltérés a sebesség-érzékenlen modellanyaggal végzett vizsgálatnál, illetve az in situ statikus kalibrálás alkalmazásakor a dinamikus kalibrálással adódott.

**A műszerezett ütőél kalibrálásának jósága**

A kalibrálás jóságát egyszerűen lehet ellenőrizni az ISO szabványban szereplő javaslat alapján, mely szerint a mért és számított energia eltérése nem lehet  $\pm 5 J$ -nál nagyobb. Egy jól műszerezett és kalibrált ütőművel végzett mérések eredményeit mutatja az 5. ábra.

1. táblázat  
Különböző módszerrel meghatározott kalibrációs tényezők

Statikus kalibrációs tényező	Dinamikus kalibrációs tényezők		
	Erő-idő diagram alapján	Al-próbával	Low-blow vizsgálattal
$C_s$ , N/V	$C_{d1}$ , N/V	$C_{d2}$ , N/V	$C_{d3}$ , N/V
1. ütőél: Kiszerezett ütőéllel	9480	10880	9746
2. ütőél: Beépített ütőéllel	25462	25488	29826



5. ábra. A mért és számított törési energia értékek összehasonlítása

**Összefoglalás**

A hagyományos és műszerezett ütőművek hitelesítési és kalibrálási módszereinek elemzése azt mutatja, hogy:

1. A hagyományos ütőgépek hitelesítése elsősorban a berendezés geometriai pontosságának illetve a törési energia mérési pontosságának ellenőrzésére terjed ki. Az erre vonatkozó előírások és módszerek teljes körűen szabványosítottak.
2. A műszerezett ütőgépek hitelesítése a hagyományoshoz hasonlóan végzendő. Többet követelményt és feladatot jelent a felműszerezett ütőélnek mint erőmérő cellának a kalibrálása, illetve a mérőrendszerrel szemben támasztott mérés technikai követelmények kielégítése és ellenőrzése.
3. A műszerezett ütővizsgálat mérés technikai követelményeire vonatkozóan az új ISO szabvány tartalmaz előírásokat. A műszerezett ütőél kalibrálási módszerére azonban nincs kötelező érvényű előírás.
4. A műszerezett ütőél erőmérő cella kalibrálására a gyakorlatban több módszer is elterjedt, amelyek közül leginkább a beépített ütőéllel végzett statikus kalibrálást alkalmazzák. Ennek pontossága megfelelő műszerezés és mérőrendszer esetén általában megfelel az ISO szabvány által támasztott követelményeknek.

**Irodalomjegyzék**

[1] MSZ EN 10045-2: Az ingás ütőgépek hitelesítése, 1994.  
 [2] ISO 14556: Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method, 1999.  
 [3] Recommendation ASTM E 24.03.03., Proposed Standard Method of Test for Instrumented Impact Testing of Pre-cracked Charpy Specimens of Metallic Materials, 1980.  
 [4] DVM 001 Merkblätter, Meßtechnische Anforderungen beim instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch, DVM September 1986.  
 [5] Ireland, D.R.: Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Testing, (ASTM STP 563, American Society for Testing and Materials, 1974. p. 3-29.)  
 [6] Gillemot F., Szabó L.: Dinamikus törésmechanikai vizsgálatok továbbfejlesztése, MTA Központi Fizikai Kutató Intézet OKKFT 11/A. 4.2.6. jelentés, 1983.  
 [7] S. Winkler: Dynamische Kraftkalibrierung von Pendelschlagwerken, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg T 2/88, 1988.  
 [8] Proposed standard method for instrumented Charpy-V impact test on metallic materials, Draft 10, ESIS Technical Sub-Committee on Dynamic Testing at Intermediate Strain Rate, 1994.  
 [9] Tóth L., Romvári P.: Műszerezett ütővizsgálattal felvett erő-idő diagramok értékelése, Gép, (18) 1976/12. p. 442-445.