

A műszerezett ütővizsgálat alkalmazási lehetőségei napjainkban

Lenkeyné dr. Biró Gyöngyvér*

Az ütővizsgálat több mint 100 éves múltra tekint vissza. Ezen idő alatt mind a vizsgálati technika, mind a vizsgálatból nyerhető információk és azok alkalmazása hatalmas fejlődésen ment keresztül. Írásomban nem kívánom bemutatni ezen fejlődés minden egyes állomását, hanem egyrészt fel szeretném villantani a műszerezett ütővizsgálat fejlődésének, hazai elterjedésének legfontosabb vonatkozásait, illetve a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén és a Bay Zoltán Intézetben folyó ilyen irányú kutatások legfrissebb eredményei alapján be szeretném mutatni ezen vizsgálati technika alkalmazási lehetőségeit a dinamikus törésmechanikai jellemzők meghatározása terén.

Egy kis történelmi visszatekintés

Az ütővizsgálat múlt század eleji gyors elterjedését követően a kutatókat viszonylag hamar kezdte foglalkoztatni az a kérdés, hogy hogyan lehetne megoldani az erő regisztrálását az ütővizsgálat közben. Az első műszerezett vizsgálatokat Körber és Arnold végezte 1925-ben, amelyről 1925-ban közlik az első tudományos publikációt a Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung kiadványában Düsseldorfban. A műszerezett ütővizsgálat igazán gyors fejlődése a második világháború után kezdődött, ami a mérőbéllyeges technika megjelenésével is összefüggésben van. Annak ellenére, hogy ezt a vizsgálati technikát már évtizedek óta alkalmazzák, a vonatkozó ISO szabványt csak 2000-ben fogadták el (ISO 14556). Jelenleg az ESIS (European Structural Integrity Society) dinamikus vizsgálatokkal foglalkozó TC5 munkabizottságának keretében folynak európai szinten koordinált szabvány-előkészítési munkálatok a műszerezett ütővizsgálat további alkalmazási területeire vonatkozóan.

Hazánkban a műszerezett ütővizsgálatok meghonosítása az 1960-as évek végén kezdődött. Az első kezdeményezés e téren a BME Mechanikai Technológiai Tanszékéhez kapcsolódik [1]. Ezt követően a Vaskut munkatársai végeztek szisztematikus és elemző munkát a vizsgálati feltételekkel és a mérés technikai problémákkal kapcsolatban. Tapasztalataik alapján építették meg a sorozatvizsgálatra alkalmas berendezésüket [2].

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéke az 1970-es évek elejétől kapcsolódott be intenzívebben a vizsgálati módszer meghonosításába [3-8], folytatva a Vízgyörgy és Sárvári József által korábban végzett, műszerezéssel összefüggő kísérleti munkákat. A tanszéknek úttörő szerepe volt a Brugger-féle ütővizsgálat magyarországi bevezetésében, majd a számítógépes mérésadatgyűjtő és kiértékelő rendszerrel rendelkező műszerezett ütőművek kifejlesztésében [9, 10]. Ilyen irányú fejlesztések, kutatások a KFKI-ban is folytak [11]. Az e területen végzett kutatások kezdetben a vizsgálati technikai problémákhoz, a vizsgálati információ tartalmának elemzéséhez kapcsolódtak, és elsősorban V bemetszésű próbatesteken végeztek kísérleteket [1-8]. Csak jóval később, a 70-es évek végén kezdődött el a műszerezett ütővizsgálat hazai alkalmazása dinamikus törésmechanikai vizsgálatokhoz [11-13]. Az eddigi kutatások elsősorban a vizsgálati technika és kiértékelési módszerek honosítására, gyakorlati alkalmazhatóságuk elemzésére vonatkoztak. A Vaskut-

ban a repedésterjedéssel szembeni ellenállást jellemző statikus és dinamikus törésmechanikai mérőszámok összehasonlítására folytattak vizsgálatokat reaktortartály-acélon és hegeszhető szerkezeti acélokon [12, 13]. A KFKI-ban és a Paksi Atomerőműben a műszerezett ütőművet a besugárzott próbatestek ridegedési folyamatának tanulmányozására alkalmazzák.

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén az 1970-es évek elején Tóth László vezetésével indult a műszerezett ütővizsgálat alkalmazásával kapcsolatos kutatómunka. Ez elsősorban a V bemetszésű próbatesteken végzett vizsgálatok információ tartalmának elemzésére [4, 6, 7], illetve hegeszhető szerkezeti acélok ridegedésének tanulmányozására irányult [3, 5, 8]. Később a tanszéknek úttörő szerepe volt a számítógépes mérésadatgyűjtő és kiértékelő rendszerrel rendelkező műszerezett ütőművek kifejlesztésében: az 1980-as években először Commodore 64 típusú számítógép alkalmazásával (a Metal-control-nál még ma is üzemel az általunk kiépített mérő- és kiértékelő rendszer), majd a 90-es években PC alapú rendszerek kifejlesztésével [9, 10]. Az első PC alapú rendszert a tanszéki saját berendezéssel valósítottuk meg, majd több vállalatnál is kiépítettünk hasonló rendszereket (Csepel AGMI, Erőkar, Kötuki).

A kezdetben meglévő 300 J-os műszerezett ütőmű mellett a későbbiekben kifejlesztettünk egy kisebb, műanyagok és kerámiák vizsgálatára is alkalmas műszerezett rendszert illetve egy ejtőmű felhasználásával nagyobb méretű próbatestek műszerezett ütővizsgálatára használható berendezést is. 1994 óta a különböző kutatások elsősorban a műszerezett ütővizsgálat alkalmazására irányulnak a dinamikus törésmechanikai jellemzők meghatározása terén, illetve a **mágneses- és elektro-emissziós mérés technika** ehhez kapcsolódó alkalmazási lehetőségeivel foglalkozunk.

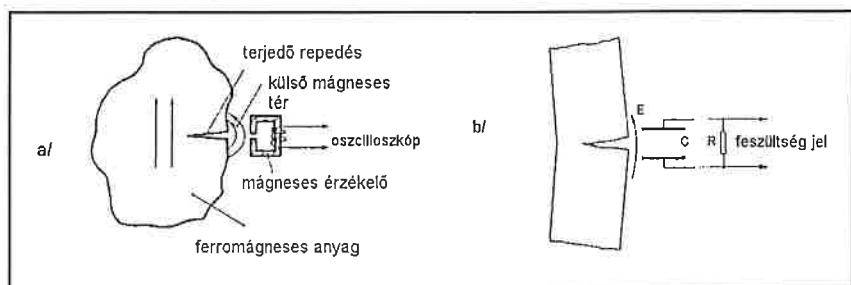
A mágneses és elektro-emissziós mérés technika alkalmazása műszerezett ütővizsgálatnál

Mindkét mérés technika kifejlesztése Winkler nevéhez fűződik [1, 2]. A mágneses emissziós jelek megjelenése két fizikai folyamattal magyarázható (1. ábra a része):

– A ferromágneses anyagok mechanikai terhelés hatására bekövetkező (elsősorban rugalmas) alakváltozását mechanikailag indukált Barkhausen-zaj megjelenése kíséri, amely az anyag belsejében bekövetkező mágneses tér erő változással függ össze.

– Repedésterjedés közben egyre több mágneses erővonal lép ki a ferromágneses anyag felszínén, ami a külső mágneses tér változását okozza.

A mágneses tér erő ezen változásait egy villamos tekercset tartalma-



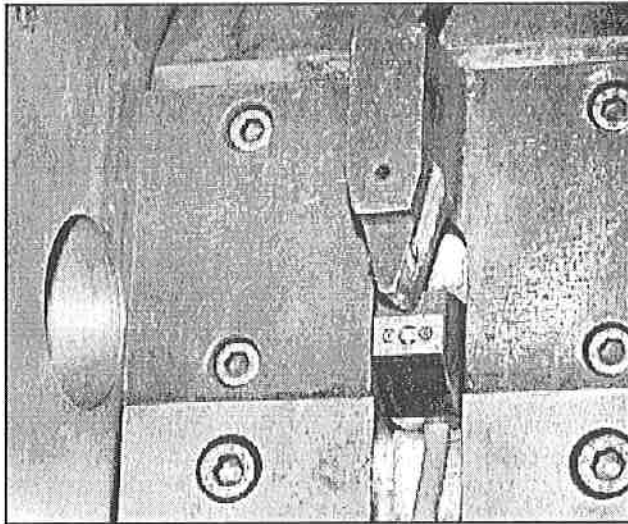
1. ábra. A mágneses (a) és az elektro-emissziós (b) mérés technika elve

* Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Alapítvány, Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet és Miskolci Egyetem, Mechanikai Technológiai Tanszék

zó mágneses érzékelővel detektálhatjuk, a mágneses indukció elve alapján. Az érzékelő kimeneti feszültsége az ún. *mágneses emissziós jel (ME)*, amely arányos a mágneses térerő (MF) változásával.

Az elektro-emissziós méréstechnika elvét az 1. ábra b része mutatja. Az érzékelő tulajdonképpen egy kisméretű kondenzátor, amelynek kimeneti feszültsége, az ún. *elektro-emissziós jel (EE)* az elektromos térerőben bekövetkező változással arányos. Az elektromos térerő változását kiváltó fizikai folyamat különféle anyagok esetén más és más lehet, pl. molekula-deformáció vagy töltés-szeparáció törés közben, de ez a terület még ma is kutatás tárgyát képezi.

A két érzékelő akár egy közös házban is elhelyezhető, melyet a 2. ábra szemléltet.



2. ábra. A PSD 300/150 ütőgép felműszerezett ütőfele a mágneses és az elektro-emissziós érzékelőkkel

A következőkben azt kívánom bemutatni, hogy a mágneses és az elektro-emissziós méréssel kiegészített műszerezett ütővizsgálat hogyan alkalmazható a dinamikus törésmechanikai jellemzők meghatározására ferromágneses fémek illetve műanyagok esetén.

A mágneses-emissziós méréstechnikai alkalmazása fémek dinamikus törésmechanikai vizsgálatainál

Attól függően, hogy az adott anyag hogyan viselkedik különféle terhelési körülmények között és hőmérsékleteken, a töréssel szembeni ellenállása különböző kritikus törésmechanikai paraméterekkel jellemezhető. Nagyobb terhelési sebességek esetén az alkalmazható mérési és értékelési eljárások még nem szabványosítottak, ezért is van nagy jelentősége a dinamikus törésmechanikai jellemzők meghatározási módszereinek alkalmazhatóságával kapcsolatos kutatásoknak [26, 27].

A vizsgálatsorozatnál alkalmazott E420-C acélanyag kémiai összetételét és mechanikai tulajdonságait mutatja az 1. táblázat. Műszerezett ütővizsgálatokat végeztünk előrepesztett próbatesteken mágneses emissziós méréssel kiegészítve egy 300 J-os ütőművön, két különböző ütési sebességgel: $v_0 = 2,75$ m/s és $v_0 = 5,5$ m/s. Az előfárasztást egy Amstler gyártmányú rezonancia fárasztóberendezésen végeztük, $a_0/W \approx 0,5$ relatív repedés-hosszig. A vizsgálatokat különböző hőmérsékleteken hajtottuk végre: 20, 0, -20, -40 és -60 °C-on. Az erő (F) és a mágneses emissziós jel (ME) időbeli változását regisztráltuk egy digitális oszcilloszkópon alapuló mérésadatgyűjtő rendszerrel.

A repedés-induláshoz tartozó dinamikus feszültségintenzitási tényező értékeit (K_{Id}) határoztuk meg a törés jellegétől függően különböző módszerekkel. A törés jellegének megállapításához kiegészítő törtévizsgálatokat is végeztünk elektronmikroszkópon.

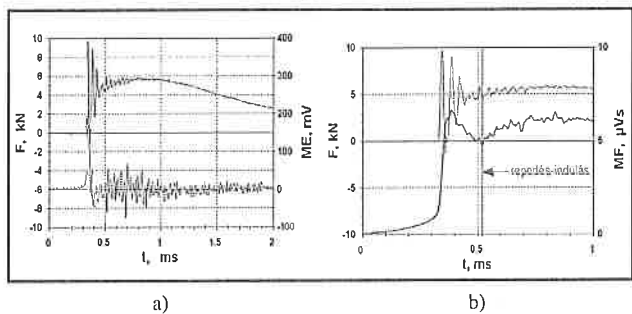
1. táblázat

E420-C acél kémiai összetétele és mechanikai tulajdonságai

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Nb, %	V, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %
0.18	0.46	1.44	0.027	0.03	0.035	0.045	0.06	0.03	0.08
Folyáshatár, MPa					Szakítószilárdság, MPa				
444					593				

A szívós törés tartományában a stabil repedésterjedés kezdetét a mágneses emissziós jelek alapján határoztuk meg, amely általában nem tehető meg közvetlenül a mágneses jelekből. Ezt szemlélteti a 3. ábra a részén bemutatott diagram, amely egy teljes mértékben szívósan viselkedő próbatestre vonatkozik. Ilyenkor a Lenkey és Winkler által kifejlesztett ún. térerő módszer (field method) alkalmazható, amely a mágneses emissziós jel integrál értékét, vagyis a mágneses térerő, MF(t), változását alkalmazza [16]:

$$MF(t) = \int_{\tau=0}^t ME(\tau) d\tau \quad (1)$$



3. ábra. Az erő, a mágneses emissziós jelek és a mágneses térerő időbeli változása ($v_0 = 5,5$ m/s, $T = 20$ °C)

Korábbi vizsgálatsorozatok alapján azt tapasztaltuk, hogy a repedésterjedéssel összefüggő mágneses jelek megkülönböztethetők a Barkhausen-zaj típusú jelektől a mágneses térerő görbe meredekségének változása alapján, ahogy azt a 3. ábra b része szemlélteti. Ezt a térerő módszert alkalmazva meghatározható a stabil repedésterjedés kezdete, majd az ehhez tartozó kritikus J-integrál érték a következő összefüggéssel számítható [17]:

$$J_{im}^d = \frac{2 \cdot U_i}{B \cdot (W - a_0)} \quad (2)$$

ahol U_i a repedés-indulásig a próbatest alakváltozására elnyelt energia, amely a mért erő-idő diagramból számított erő-behajlás (F-f) diagram integrálásával határozható meg:

$$U_i = \int_{f=0}^{f_i} F(f) df \quad (3)$$

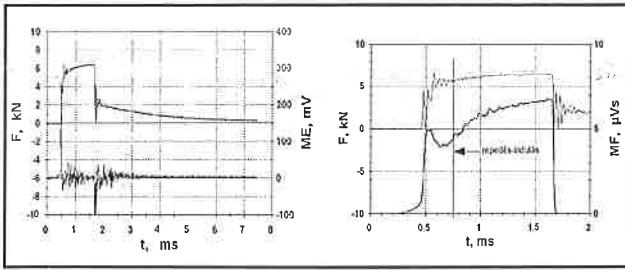
Majd az ehhez tartozó K_{Id} értéke sík feszültség állapot esetén a következő összefüggéssel számítható:

$$K_{Id} = \sqrt{E \cdot J_{id}} \quad (4)$$

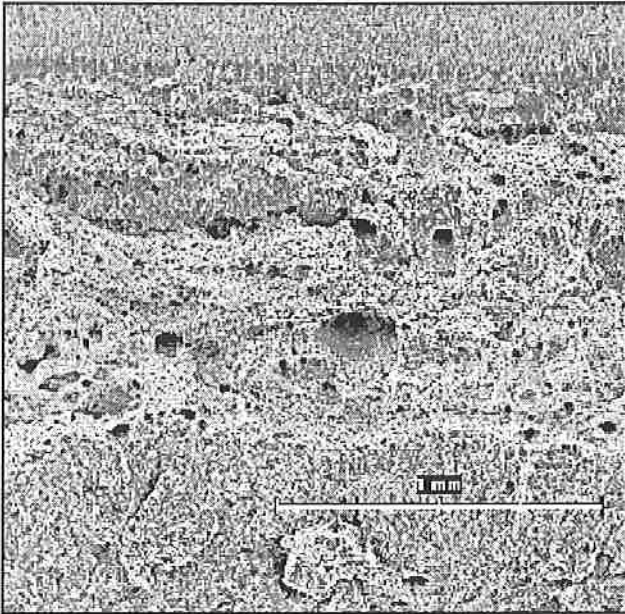
ahol $E = 210\,000$ MPa, a vizsgált acél rugalmassági modulusa.

Az átmeneti tartományban, amikor a rideg törést jelentősebb képlékeny alakváltozás előzi meg és a töretfelület jellemzően rideg és szívós részeket is tartalmaz, a kritikus – repedés-induláshoz tartozó J-integrál és K értékeket a (2)–(4) összefüggésekkel határoztuk meg. Néhány esetben az átmeneti tartományban a rideg törést kismértékű stabil repedésterjedés előzte meg (egy példát mutat erre a 4. ábra). Ezt a töretfelületről készült elektronmikroszkópos felvétel is igazolta (5. ábra). Ebben az esetben a stabil repedésinduláshoz tartozó J_{id} érték a (2)–(3) összefüggésekkel határozható meg.

A rideg törés tartományában és néhány esetben az átmeneti tartományban is a rideg törést nem előzte meg makroszkópikus képlékeny alakváltozás (6. ábra). Ilyenkor általában nem teljesül az Ireland által

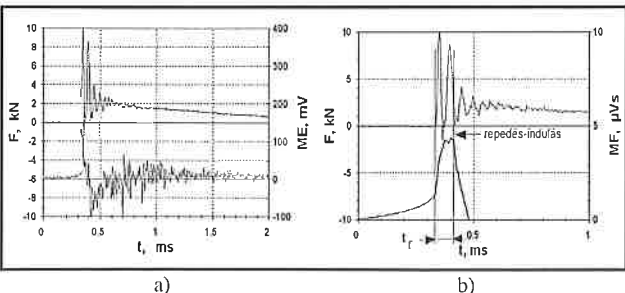


4. ábra. Az erő, a mágneses emissziós jelek és a mágneses térerő időbeli változása ($v_0 = 2,75$ m/s, $T = -40$ °C)



5. ábra. Az előreperesztett próbatest történeke pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) képe ($v_0 = 2,75$ m/s, $T = -40$ °C)

javasolt „ 3τ ” kritérium [18], vagyis a rideg törést megelőzően kevesebb mint 3 oszcilláció figyelhető meg az erő-Idiagramon, ezért a K_{Id} meghatározására nem érvényesek a kvázistatikus összefüggések. Ebben az esetben a *Kalthoff-Winkler-Böhme* által kidolgozott ütési válaszfüggvény (impact response curve) módszer [19, 20] alkalmazható. Ehhez a terhelés kezdetétől a törés kezdetéig eltelt törési időt (t_f) kell meghatározni, amely nagy erőoszcilláció esetén nem tehető meg közvetlenül az erő jel alapján. Ilyenkor a rideg törést kísérő nagy amplitúdójú ME jelből, és néha az MF görbe alapján lehetett a törési időt kellő pontossággal meghatározni (6. ábra).



6. ábra. Az erő, a mágneses emissziós jelek és a mágneses térerő időbeli változása ($v_0 = 5,5$ m/s, $T = -40$ °C)

A mért törési idő alapján a dinamikus törési szívósság a következő összefüggéssel határozható meg:

$$K_{Id} = R \cdot v_0 \cdot t^m \quad (5)$$

ahol $t^m = f(t^*)$ értékei a [19, 20] közleményekben táblázatos formában megtalálhatók, és

$$t^* = g(t) = t_f \cdot \left\{ 1 - 0.62 \left(\frac{\alpha_0}{W} - 0.5 \right) + 4.8 \left(\frac{\alpha_0}{W} - 0.5 \right)^2 \right\} \quad (6)$$

ahol $R = 301$ GN/m^{5/2} állandó $c_M = 8,1 \times 10^{-9}$ m/N rugómerevségű (compliance) ütőműre. Ha a gép rugómerevsége eltér, akkor egy korrekciós faktoral kell beszorozni R értékét, amely:

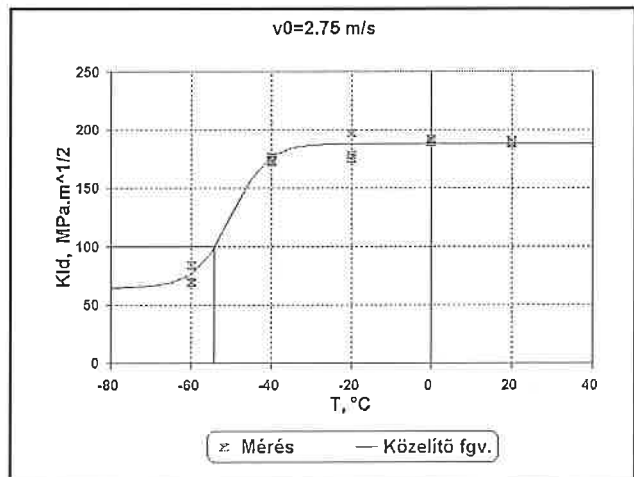
$1,276 / (1 + 0,276 \cdot c_M / 8,1 \times 10^{-9} \text{ m/N})$. A mi esetünkben a gép rugómerevsége $c_M = 2,335 \times 10^{-8}$ m/N volt.

A kiértékelt vizsgálati eredményeket a 7. és 8. ábra mutatja. A vizsgálat acélananyag rideg-szívós átmeneti viselkedésének jellemzése céljából a mérési pontokra egy közelítő függvényt fektettünk, melynek egyenlete:

$$K_{Id} = A_0 + A_1 \cdot \text{th} \left[\frac{1}{A_2} \cdot (T - A_3) \right] \quad (7)$$

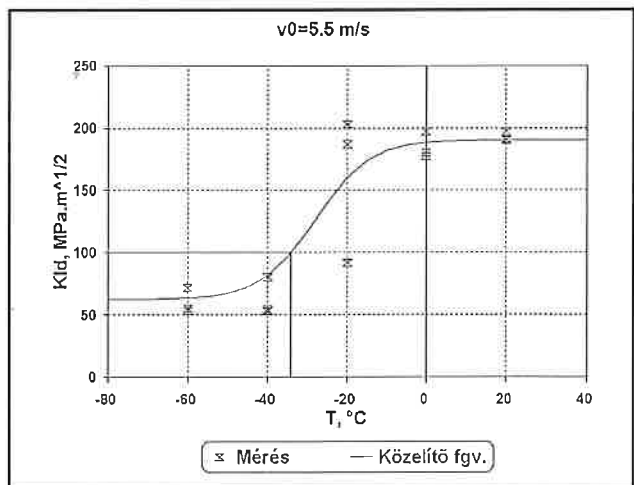
ahol A_0, A_1, A_2, A_3 konstansok. A regressziós görbék alapján meghatározható egy adott törési szívósság értékhez (ferrites acéloknál általában $K = 100$ MPa \sqrt{m} értékhez [21]) tartozó átmeneti hőmérséklet (TT), amely jól jellemezhető az acél rideg-szívós átmeneti tartományában. Az ennek megfelelően meghatározott átmeneti hőmérsékletek: $TT_{2,5} = -54,2$ °C a kisebb, és $TT_{5,5} = -34,1$ °C a nagyobb ütési sebességre.

$$K_{Id} = 126.5 + 61.8 \cdot \text{th} \left[\frac{1}{8.87} \cdot (T + 50) \right]$$



7. ábra. A dinamikus törési szívósság változása a hőmérséklet függvényében $v_0 = 2,75$ m/s ütési sebességnél

$$K_{Id} = 126.5 + 64 \cdot \text{th} \left[\frac{1}{13.7} \cdot (T + 27.95) \right]$$



8. ábra. A dinamikus törési szívósság változása a hőmérséklet függvényében $v_0 = 5,5$ m/s ütési sebességnél

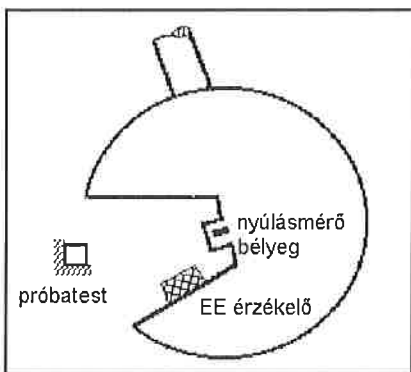
A 7. és 8. ábra alapján megállapítható, hogy a szívós és a rideg törés tartományában a két ütési sebesség esetén nem tapasztalható jelentős különbség a K_{Id} értékekben. Azonban a nagyobb ütési sebesség esetén a rideg törés nagyobb hőmérsékleten (-20 °C) jelenik meg, ekkor a rideg törés a törési folyamatnak egészen az elején indul meg, majd repedésmegállás történik, amit stabil repedésterjedés követ. A kisebb ütési sebesség esetén csak $T = -40\text{ °C}$ -on jelent meg először a rideg repedésindulás, amelyet jelentős mértékű képlékeny alakváltozás előzött meg, és a lineárisan rugalmas viselkedés (tökéletesen rideg állapot) csak $T = -60\text{ °C}$ -on következett be.

A bemutatott kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy az ütővizsgálat esetén a terhelési sebesség változásának kimutatható hatása van a vizsgált növelt szilárdságú, mikroötözött acél rideg-szívós átmeneti viselkedésére. A $K_{Id}(T)$ görbe helyzete $\Delta T = 20,1\text{ °C}$ -kal tolódott el a nagyobb hőmérsékletek irányában, amikor az ütési sebességet 2,5 m/s-ról 5,5 m/s-ra növeltük. A mágneses emissziós mérés technika alkalmazása sok esetben feltétlenül szükséges volt a repedésindulás pillanatának meghatározására.

Az elektro-emissziós mérés technika alkalmazás műanyagok dinamikus törésmechanikai vizsgálatánál

A műanyagok általában nagyon érzékenyek a terhelési sebesség változására a mérnöki gyakorlatban előforduló terhelési körülmények esetén. Amíg korábban a műanyagok ütésállóságát elsősorban bemetszett vagy bemetszés nélküli próbatesten mérte ütmunkával jellemezték, az utóbbi évtizedekben egyre elterjedtebb a különböző törésmechanikai módszerek és anyagjellemzők alkalmazása. Mivel a terhelési sebesség növekedésével a dinamikus hatások következtében fokozottan jelentkeznek vizsgálattechnikai és kiértékelési problémák műanyagok esetén, ezért a hagyományos erő alapú elemzések csak 1 m/s ütési sebességig alkalmazhatók. Efelőtt a dinamikus hatások gyakran elfedik a valós anyagi választ és a dinamikus törési szívósság meghatározásához kiegészítő mérés technikák, illetve különleges kiértékelési módszerek alkalmazása szükséges. Az elektro-emissziós mérés technika egy új lehetőség a törési idő mérésére, amely alapján a dinamikus értékelés elvégezhető [22, 28].

A különböző dinamikus mérési és kiértékelési módszerek elemzése és összehasonlítása céljából többféle műanyagon végeztünk műszerezett ütővizsgálatokat egy CEAST Resil 15/25 típusú ütőművön. A hagyományos erőmérésen kívül az ütőműre egy kisméretű elektro-emissziós érzékelőt is elhelyeztünk. A kalapács műszerezését vázlatosan a 9. ábra mutatja.

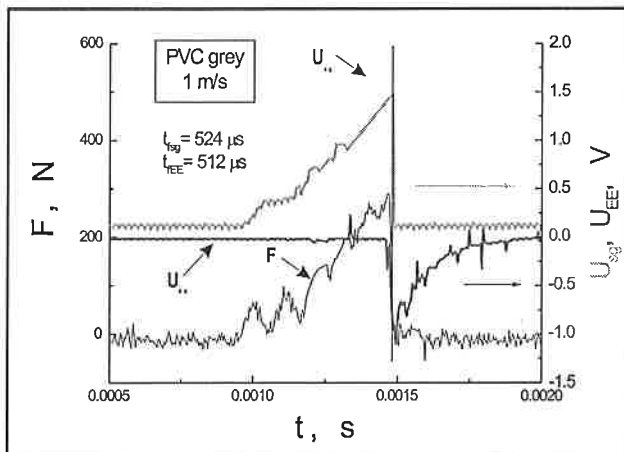


9. ábra. A CEAST Resil 15/25 ütőmű kalapácsának műszerezése

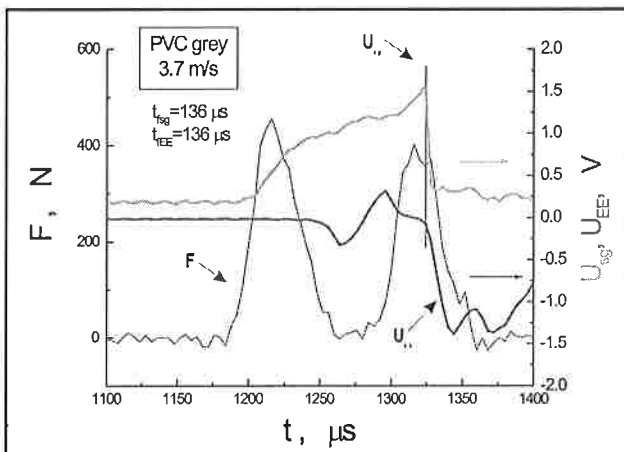
Különbőféle műszaki műanyagokat választottunk a vizsgálatokhoz: PE (PE-MD és PE-HD), POM, PVC, PMMA, ABS. Valamennyi alapanyag 10–12 mm vastag extrudált lemezek formájában állt rendelkezésünkre, amelyekből 10x10x55 mm-es ütőpróbatesteket munkáltattunk ki. A próbatesteken forgácsolással bemetszést, majd penge benyomásával repedés-szerű bevágást hoztunk létre az extrudálás irányával egyező irányban. A relatív repedés méret (a_0/W) 0,3 és 0,35 között változott. Az elektro-emissziós mérés technika alkalmazhatóságának és pontosságának ellenőrzése céljából néhány próbatesten kisméretű nyúlásmérő bélyegeket is elhelyeztünk (MM CEA-06-032UW-120) 2,5-3 mm távol-

ságban a repedéscsúcstól. A terhelési sebesség hatásának elemzéséhez többféle ütési sebességet alkalmaztunk: 1, 2, 3 és 3,7 m/s.

Valamennyi vizsgált műanyag minden terhelési sebességnél tökéletesen ridegen tört. A legtöbb esetben az EE jel hirtelen változást mutatott a rideg törés kezdetekor, kivéve a PE-HD anyagminőséget. A regisztrált diagramokra PVC esetén a 10. és a 11. ábra mutat példákat. Meghatároztuk a törési időket mind a mérőbélyegek jeleiből (t_{ISG}), mind az EE jelek alapján (t_{IEE}). A kétféle méréssel kapott törési idők jó egyezést mutattak (2. táblázat), a maximális eltérés 5–12 s között volt (3%-nál kisebb).



10. ábra. Az erő, a mérőbélyeg és az elektro-emissziós jelek $v_0 = 1\text{ m/s}$ ütési sebességnél (PVC)



11. ábra. Az erő, a mérőbélyeg és az elektro-emissziós jelek $v_0 = 3,7\text{ m/s}$ ütési sebességnél (PVC)

2. táblázat

Különböző módszerekkel mért törési idők

Anyag	v_0 , m/s	t_{ISG} , s	t_{IEE} , s	Különbség, %
POM	1	708	706	0.28
	3.7	203	201	0.01
PVC	1	524	512	2.29
	3.7	136	136	0

Az alkalmazott legkisebb ütési sebesség ($v_0 = 1\text{ m/s}$) esetén lehetséges volt a dinamikus törési szívósság kvázistatikus, erő alapú kiértékelése [23]:

$$K_{II} = \frac{Y(a_0/W) \cdot F_{max}}{B \cdot \sqrt{W}} \quad (8)$$

ahol F_{max} – maximális erő, N
 a_0 – kezdeti repedéshossz, mm
 W – próbatest magasság, mm

B – próbatest vastagság, mm
 $Y(a_0/W)$ – geometriai függvény TPB próbatestre:

$$Y\left(\frac{a_0}{W}\right) = 6\sqrt{\frac{a_0}{W} \frac{1.99 - \frac{a_0}{W} \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a_0}{W} + 2.7 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2\right)}{\left(1 + 2 \frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}}} \quad (9)$$

Az 1 m/s-nál nagyobb ütési sebességek esetén az erőjel jelentős oszcillációja miatt a kvázistatikus értékelés nem volt alkalmazható. Ezekben az esetekben a *Böhme* által kidolgozott dinamikus kulcs-függvény (dynamic key-curve – DKC) módszerrel [24, 25] határozható meg a dinamikus törési szívósság a következő összefüggés szerint:

$$K_{Id} = \frac{E \cdot Y\left(\frac{a_0}{W}\right)}{\sqrt{W} C_s \left(1 + \frac{C_m}{C_s}\right)} v_0 t_f k^{dyn}(t = t_f) \quad (10)$$

ahol $E(t)$ – a próbatest idő-függő rugalmassági modulusa, MPa
 v_0 – ütési sebesség, m/s
 $k^{dyn}(t_f)$ – dinamikus kulcs-függvény
 t_f – törési idő, s
 C_s – próbatest compliance, m/N
 C_m – gép compliance, m/N
 $C_s^* = EBC_s$ – dimenzió nélküli próbatest compliance
 $Y(a_0/W)$ – geometriai függvény TPB próbatestre.

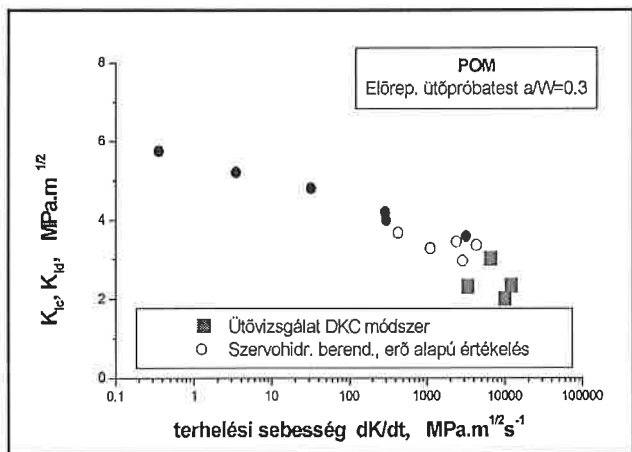
A DKC módszer szerint a dinamikus kulcs-függvény értéke $k_{dyn} = 1$, amennyiben a törési idő $t_f > 9,2W/c_1$, ahol c_1 a longitudinális hullám terjedési sebessége a próbatestben:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (11)$$

Ez a feltétel valamennyi vizsgálat esetén teljesült. A gép compliance értékét bemetszellen próbatestek low-blow vizsgálata alapján határoztuk meg a [24] közleményben ismertetett módon: $C_m = 0,33$ mm/MN. A kiértékeléshez szükséges időfüggő anyagi paramétereket (E, ν), 0,01 Hz és 300 Hz frekvenciatartományban végzett kísérletekkel határoztuk meg (a Leobeni Műszaki Egyetem Műanyag-technológiai Intézetében, egy nagy sebességű MTS típusú szervo-hidraulikus berendezésen).

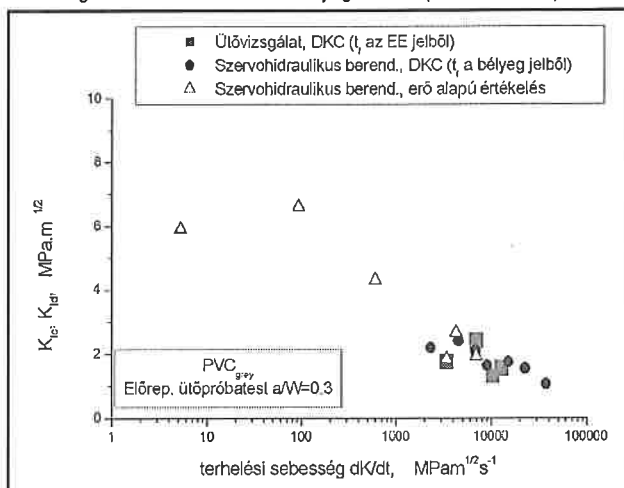
A kiértékelés eredményeit POM és PVC esetén a 12. és 13. ábra mutatja, ahol összehasonlítás céljából azok a K_{Ic} és K_{Id} értékek is szerepelnek, amelyeket a leobeni egyetemen nagy sebességű szervo-hidraulikus berendezésen különböző terhelési sebességgel végzett kísérletek alapján határoztak meg. Ahogy az ábrákból látható, mindkét anyag jelentős terhelési sebesség érzékenységet mutat, és a különböző mérési és kiértékelési módszerekkel meghatározott K_{Id} értékek jó egyezést mutatnak.

A bemutatott vizsgálati eredmények igazolták az elektro-emissziós



12. ábra. A POM törési szívósságának függése a terhelési sebességtől

méréstechnika alkalmazhatóságát és pontosságát a ridegtörés kezdetének regisztrálására többféle műanyag esetén (kivéve PE-HD).



13. ábra. A PVC törési szívósságának függése a terhelési sebességtől

Összegzés

Cikkemben megpróbáltam bemutatni a műszerezett ütővizsgálat legújabb alkalmazási lehetőségeit a fémek és műanyagok dinamikus törésmechanikai vizsgálata terén. A bemutatott vizsgálati és kiértékelési módszerek ma még nem szabványosítottak, de a világban számos ipari és kutatóintézeti laboratóriumban alkalmazzák őket. Elsősorban Európában folyik intenzív munka ezen eljárások szabványosítása terén az ESIS keretében, amelyhez részben kapcsolódik a cikkben bemutatott kutatómunka. Mindezek arra is ráirányítják a figyelmet, hogy a Charpy által 1901-ben javasolt vizsgálati módszernek nemcsak múltja és jelene, hanem jövője is van.

Köszönetnyilvánítás

Szerző ezúton fejezi ki köszönetét az OTKA-nak a kutatáshoz nyújtott támogatásáért (OTKA T 030057 projekt).

Irodalomjegyzék

- [1] Konkoly T.: Erő-idő diagramok felvétele egyszerű Charpy ütőművön az ingára szerelt nyúlásmérő bélyegekkel, Gép, XX., 1968/10., pp. 401-405.
- [2] Riittinger J., Fehérvári A.: A törés folyamatának megismerése az erő változásának regisztrálásával ütő-hajlító vizsgálat során, BKL Kohászat, 273/1971., pp. 245-249.
- [3] Tóth L.: Hegeszthető szerkezeti acélok ridegedésének vizsgálata, Egyetemi doktori értekezés, Miskolc, 1974.
- [4] Tóth L., Romvári P.: Az ütővizsgálat információtartalmának elemzése, Gép, 27, 1975/7., pp. 245-252.
- [5] Tóth L., Romvári P.: The Analysis of the Instrumented Impact Test Diagrams 7th Conference on Welding, Budapest, 1976., pp. 163-169.
- [6] Tóth L., Romvári P.: Műszerezett ütővizsgálattal felvett erő-idő diagramok értékelése – Gép, 1976/12., pp. 442-445.
- [7] Tóth L., Romvári P.: Relationship between the Time to Brittle Fracture and the Yielding Stress in Instrumented Charpy-Impact Test, 7th Congr. on Material Testing, Budapest, 1978., Vol. 1., p. 285-289.
- [8] L. Tóth: Ribildungs- und Ausbreitungsarbeit hinsichtlich der Kerbgeometrie von Kerbschlagbiegeversuchen, Publications of the Technical University for Heavy Industry, Series C., Machinery, Vol. 34, 1978, pp. 31-47.
- [9] Lenkeyné Bíró Gy., Major Z., Tóth L.: Műszerezett ütőmű a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszékén, Anyagvizsgálók Lapja, 1. évf. 2. szám, 1991., pp.64-66.
- [10] Lenkeyné Bíró Gy., Major Z., Bodnár K.: Műszerezett ütőmű kifejlesztése és alkalmazásának kezdeti tapasztalatai, Micro CAD-SYSTEM'91 Nemzetközi Számítástechnikai Találkozó, Miskolc, 1991. február 26. – március 2., pp. IV/48-53.

- [11] Gillemot F., Szabó L.: Dinamikus törésmechanikai vizsgálatok továbbfejlesztése – Beszámoló jelentés, KFKI, Budapest, 1983.
- [12] Módszerek a statikus és dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározásához – Kutatási jelentés, VASKUT Hegesztési Főosztály, 1981.
- [13] Rittinger J., Tóth K., Macsári K.: Dinamikus törésmechanikai anyagjellemzők meghatározása ütővizsgálattal, Gép, 34, 1982/5., pp. 191-199.
- [14] Winkler, S. R.: Magnetic Emission Detection of Crack Initiation, ASTM STP 1074, Philadelphia, pp. 178-192. (1990)
- [15] Winkler, S.: Brucherkennung mit Elektrischer Emission, IWM Bericht, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik T 10/90 (1990)
- [16] Lenkey, Gy. B., Winkler, S.: On the applicability of the magnetic emission technique for determining ductile crack initiation in impact tests, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 20., No. 2., 1997, p. 143-150.
- [17] Blumenauer, H., Push, G.: Technische Bruchmechanik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982.
- [18] Ireland, D. R.: Critical review of instrumented impact testing, Int. Conf. On Dynamic Fracture Toughness, London, 1976, p. 47-57.
- [19] J. F. Kalthoff, S. Winkler, W. Böhme: A novel procedure for measuring the impact fracture toughness K_{Id} with precracked Charpy specimens, Journal de Physique, 1985/No. 8, pp. C5-179-186.
- [20] J. F. Kalthoff: Concept of Impact Response Curves, ASM Handbook, Volume 8, ASM, 1995, p. 269-271.
- [21] Neale, B. K.: The development of an instrumented Charpy impact machine, Evaluating Material Properties by Dynamic Testing,ESIS Publication 20, Mechanical Engineering Publications (MEP), Bury St-Edmunds, 1996, p. 197-206.
- [22] Lenkey, Gy. B.; Winkler, S.; Major, Z.; Lévy, I.: Applicability of magnetic and electro-emission techniques for detecting crack initiation in impact tests, 11th European Conference on Fracture, Poitiers, 3-6. September 1996., Vol. III. p. 1989-1994.
- [23] Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, ASTM D 5045-93, December 1993.
- [24] W. Böhme: Application of Dynamic Key Curves for the Determination of the Impact Fracture Toughness of Polymers at High Rates of Loading,ESIS Publication 19, ed. J.G. Williams, A.Pavan, MEP, London, 1995.
- [25] W. Böhme: Dynamic Key-Curves for Brittle Fracture Impact Tests and Establishment of a Transition Time, Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074, Philadelphia, 1990., pp. 144-156.
- [26] Gy. B. Lenkey: On the Determination of Dynamic Fracture Toughness Properties by Instrumented Impact Testing, Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, ASTM STP 1380, T. Siewert and M. P. Manahan, Sr., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999., Symposium on Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, May 19-20, 1999., Seattle, pp. 366-381.
- [27] Lenkeyné Bíró Gyöngyvér: A terhelési sebesség hatása növelt szilárdságú acél rideg-szívós átmeneti viselkedésére, MicroCAD'99, 1999. Február 23-25., Miskolc, Anyagtudományi szekció, pp. 111-116.
- [28] Gy. B. Lenkey, Z. Major: Applicability of electric emission technique for determining dynamic fracture toughness of polymeric materials, MicroCAD 2000., Miskolc, pp. 57-62.

Az ütővizsgálat fejlődése egy PhD-hallgató szemével*

Göblyös Béla**

Bevezetés

A szerkezetek, gépek üzemeltetése során a károsodásokat legtöbbször a váratlan meghibásodások okozzák. A legjelentősebb gazdasági hatású meghibásodás a törés. A szerkezet igénybevétele lehet statikus és dinamikus. Ez utóbbi a kritikusabb, mivel az anyagok töréssel szembeni ellenállása csökken a terhelési sebesség növekedésével.

A dinamikus terhelés hatásának vizsgálatára alkalmas ejtőművet 1857-ben Rodman használt először bemetszés nélküli próbatesteken. A bemetszett próbatestek vizsgálatával először LeChatelier foglalkozott 1892-ben, ingás ütőművet pedig 1896-ban az amerikai Russel és munkatársai alkották meg [1].

Európában a francia G. Charpy javasolta a vizsgálatot az anyagok ütőmunkájának a meghatározására mégpedig a *Megjegyzések bemetszett fém próbatestek ütve hajlító vizsgálatához* című előadásában az Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetének budapesti konferenciáján 1901-ben [2]. A dinamikus mechanikai jellemzők mérésére (egyszerűsége és gazdaságossága miatt) azóta is e módszer a leggyakrabban használatos.

Hagyományos ütővizsgálat

A Charpy által javasolt vizsgálat akkori állapotában lehetőség volt az ütőmunka mérésére az inga ejtés előtti és ejtés utáni holtponthelyzetének összehasonlításával:

$$KV \text{ (vagy } KU) = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

* tudományos vezető: dr. Tóth László egyetemi tanár, Bay Zoltán Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet, Miskolci Egyetem.

** Dunaferr Rt.

ahol,

KV – ütőmunka (J) a V bemetszésű próbatesten (2.a ábra),

KU – ütőmunka (J) az U bemetszésű próbatesten (1. és 2.b ábra),

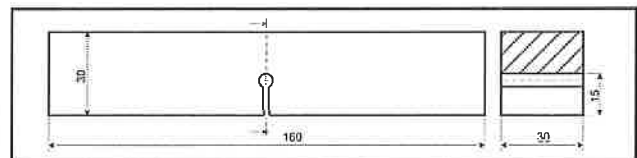
m – az inga redukált tömege (kg),

g – nehézségi gyorsulás $\approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

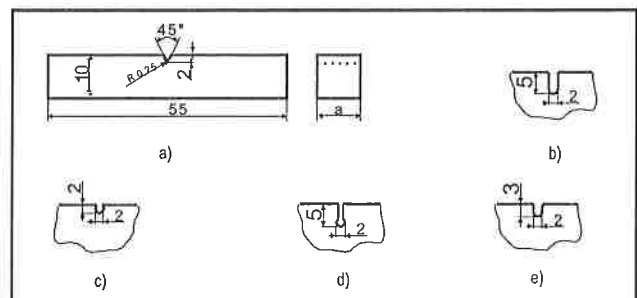
h_1 – az inga ejtés előtti helyzetének magassága (m),

h_2 – az inga ejtés utáni holtponthelyzetének magassága (m).

Mivel az inga magassága arányos a szögelfordulással, ezért a műszer skálája közvetlenül az ütőmunka értéket mutatja.



1. ábra. A Charpy által javasolt próbatest



2. ábra. A próbatest bemetszésének főbb típusai: a) Charpy-V, b) Charpy-U, c) Mesnager, d) Charpy-kulcslyuk és e) DVM

Mínél szívósabb az anyag, az ütőmunka annál nagyobb értékű (azaz h_2 annál kisebb), egyre kisebb ütőmunkához az anyag egyre ridegebb állapota tartozik (azaz egyre nagyobb h_2).