

# Akusztikus emissziós vizsgálat

## II. rész: Alkalmazási területek

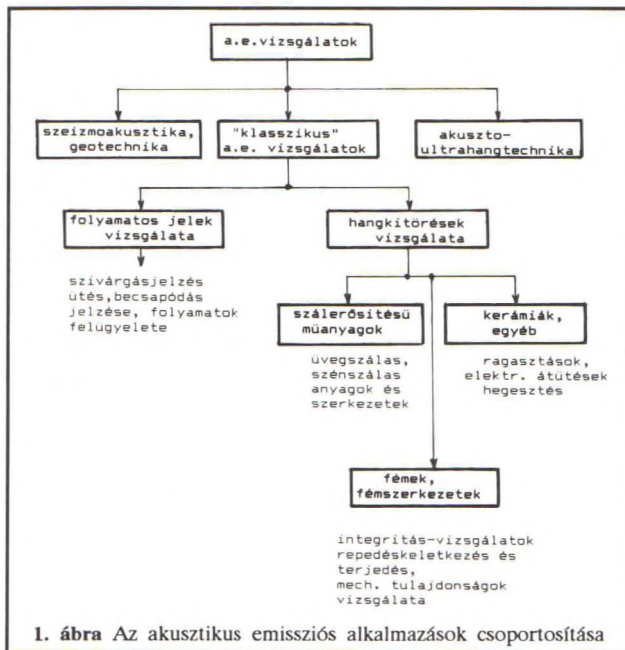
Pellionisz Péter\*

### Bevezetés

Háromrészes sorozatunk első részében ennek a viszonylag új vizsgálati módszernek alapvető jellegzetességeit mutattuk be és megismertedtünk az érzékelés, jelfeldolgozás és értékelés technikájával. Az alábbiakban a legfontosabb alkalmazási területeket ismertetjük, bemutatunk néhány gyakorlati mérést és foglalkozunk az a.e. szabványokkal. A következő számban képet adunk az akusztikus emissziós műszerek piacáról és bemutatjuk a hazai piacon beszerezhető eszközöket.

### Az alkalmazási területek áttekintése

Emlékeztetjük az olvasót arra, hogy az akusztikus emissziós jelenség mechanikai igénybevétel hatására léphet fel a szilárd anyagban. A szilárd közeg lehet geológiai anyag (pl. kőzet, építőanyag, beton), geológiai, ill. épített szerkezet (pl. bányá, alagút, partfal, gát, út), vagy másjellegű anyag ill. szerkezet. Ezek alapján – mint ahogy azt az 1. ábra mutatja – rögtön elkülöníthetők az ún. szeizmoakusztikai, mikro szeizmikus, más szóval geotechnikai alkalmazások [1]. (Megjegyezzük, hogy ezekben az alkalmazásokban a magas frekvenciájú hangok erős csillapodása miatt alacsonyfrekvenciás érzékelőket alkalmaznak.)

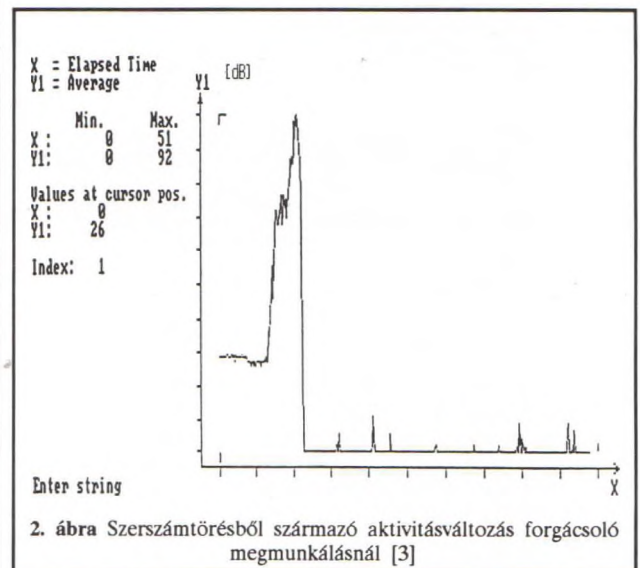


1. ábra Az akusztikus emissziós alkalmazások csoportosítása

A továbbiakban sem ezekkel, sem az ún. akusztó-ultrahangtechnikával [2] nem foglalkozunk. Az utóbbi azokra az újkeletű vizsgáló eljárásokra vonatkozó elnevezés, ahol a szokásos ultrahang-sugárzók jeleinek az anyagtulajdonságok miatti változásait akusztikus emissziós módszerekkel vizsgálják (pl. faforgácslapok gyártásori ellenőrzése).

A „klasszikus” a.e. vizsgálatok két nagy csoportra oszthatók: folyamatos jelek, illetve hangkitörések vizsgálatára. Az első csoportnál többnyire nem is szorosan vett akusztikus emisszióról van szó, hanem valamely folyamat nagyfrekvenciás akusztikus zajának figyeléséről, amely zaj pl. a kiáramló nagynyomású víz turbulenciájából, egyenletes gépzajból stb. származik. Ezeknél a vizsgálatoknál, illetve az ezek végrehajtására létrehozott *diagnosztikai rendszereknél* a zajszint pillanatnyi, ismétlődő vagy tartós megemelkedése jelzi a rendellenességet. Különböző paraméterek figyelésével, ill. több érzékelő alkalmazásával gyakran nemcsak a rendellenesség megjelenését, hanem annak kiváltó okát, természetét, helyét is azonosítják e rendszerek. Példaképpen álljon itt néhány folyamatellenőrzési alkalmazás: szívárgásjelzés nagynyomású folyadék- ill. gőz-, gázrendszerekben, kavitáció, felütődés, gépi megmunkálásoknál szerszámelhasználódás vagy törés jelzése. Példaként a 2. ábrán [3] alapján mutatjuk be forgácsoló megmunkálásnál a szer-

venciás akusztikus zajának figyeléséről, amely zaj pl. a kiáramló nagynyomású víz turbulenciájából, egyenletes gépzajból stb. származik. Ezeknél a vizsgálatoknál, illetve az ezek végrehajtására létrehozott *diagnosztikai rendszereknél* a zajszint pillanatnyi, ismétlődő vagy tartós megemelkedése jelzi a rendellenességet. Különböző paraméterek figyelésével, ill. több érzékelő alkalmazásával gyakran nemcsak a rendellenesség megjelenését, hanem annak kiváltó okát, természetét, helyét is azonosítják e rendszerek. Példaképpen álljon itt néhány folyamatellenőrzési alkalmazás: szívárgásjelzés nagynyomású folyadék- ill. gőz-, gázrendszerekben, kavitáció, felütődés, gépi megmunkálásoknál szerszámelhasználódás vagy törés jelzése. Példaként a 2. ábrán [3] alapján mutatjuk be forgácsoló megmunkálásnál a szer-



számítórészből származó aktivitásváltozást. (A Dunegan D 9202A tip. akusztikus emissziós érzékelő a késtartóra volt felerősítve, a forgácsolást 200 m/min sebességgel, C45N anyagnál, keményfém-lapkával végezték.)

A szorosan értelmezett akusztikus emissziós technikát a szilárd anyagban a terhelés hatására bekövetkező *hangkitörések* vizsgálata jelenti. Az 1. ábrán három nagy csoportra osztottuk az így vizsgált anyagokat ill. szerkezeteket. Egy-egy igen jelentős csoportot alkotnak a szálerősítésű műanyagok l. pl. [4], ahol az elemi szálak törése ill. szakadása általában igen aktív akusztikus emissziós forrást jelent, illetve a fémek és fémszerkezetek, ahol az esetek többségében a repedéseketkezelést, illetve repedésterjedést kívánjuk ilyen módszerrel felderíteni [5]. Talán kevésbé jelentős, de igen változatos a harmadik csoport, ahol kerámiákat, különleges anyagokat, elektronikai alkatrészeket, ragasztások kötését stb. vizsgálnak. Mindezekről az alkalmazásokról részletes eligazítást nyújt [6], illetve a témakört összegező első magyar nyelvű könyv [7], amelyet e területen dolgozó szakemberek szerzői kollektívája hozott létre.

Az akusztikus emissziós technika vitathatatlanul legkiforrottabb és legszélesebb körben folyó alkalmazása nyomás-tartó edények és csővezetékek integritásvizsgálata. Ez indokolja, hogy ezzel a területtel a következőkben valamivel részletesebben foglalkozunk.

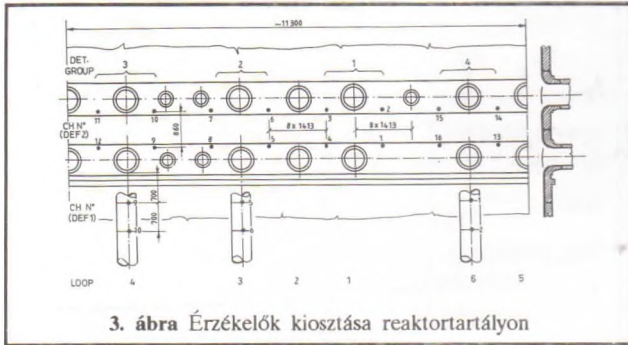
\* MTA KFKI Atomenergia Kutató Intézet



**Nyomáspróbák akusztikus emissziós megfigyelése**

A nyomáspróba célja annak bizonyítása, hogy a nyomástartó edény fala és hegesztési varratai, oldható kötési tömör zárast biztosítanak, hogy megfelelő biztonsági tartalék van a megkívánt szilárdság felett, illetve a helyi feszültségcsúcscok képlekeny alakváltozással leépülnek vagy legalábbis csökkennek. A nyomáspróba a vizsgált szerkezetre potenciálisan veszélyes igénybevételt jelent, nagy jelentőségű ezért olyan ellenőrző módszer alkalmazása, amely azonnal jelzi repedések keletkezését, terjedését, szivárgás megindulását vagy egyéb rendelkezést.

Az akusztikus emissziós technika egyszerű, viszonylag olcsó, a rendellenesség bekövetkeztét nagy megbízhatósággal jelző módszer e feladat ellátására. Még nagyméretű szerkezetek esetén is elegendő legfeljebb néhány tucat, a felületen elosztott érzékelő, hogy bármely pontból kiinduló hangeseményeket biztonságosan érzékelhessünk. Az érzékelők telepítéséhez sok szempontot tekintetbe kell venni, mint pl. a tartály anyaga, falvastagsága, a geometria jellege (pl. csőcsomók), a felülethez való hozzáférés, felületi hőmérséklet, külső zajok elhárítása stb. A 3. ábrában példaképp bemutatjuk, hogy a Paksi Atomerőmű egyik reaktortartályának 1990. évi ellenőrzésekor a tartály csőcsatlakozásainak övezetében hogyan helyeztük el az akusztikus emissziós érzékelőket.



3. ábra Érzékelők kiosztása reaktortartályon

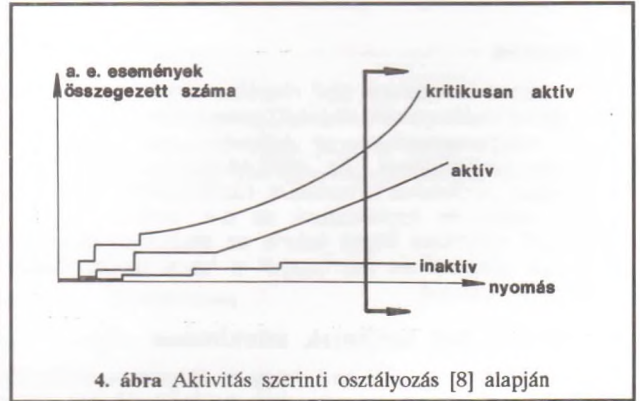
A felületen az érzékelőket általában csoportokban (ún. array-ekben) helyeztük el. A többnyire négy érzékelőből álló csoportok jelei, erősítőkön keresztül a sokcsatornás akusztikus emissziós műszer összetartozó bemeneteire kerülnek. A műszer, vagy az erre csatlakoztatott számítógép az egyes érzékelők észlelési időpontjaiból és az előzetes mérések révén ismert terjedési sebességből, valamint a geometriai adatokból azonnal kiszámítja az akusztikus forráshely koordinátáit.

Nyilvánvaló, hogy tömítetlenség, törés vagy egyéb, hirtelen bekövetkező súlyos rendellenesség olyan nagymértékű akusztikus aktivitást (nagyszámú hangeseményt) és akusztikus intenzitást (nagy eseményamplitudókat ill. energiákat) eredményez, hogy a hiba és a hibahely azonnal, egyértelműen azonosítható. Más a helyzet a terhelés során időben és térben elszórtan jelentkező, kisebb-nagyobb hangeseményekkel, amelyeknek számos kiváltó oka lehet és veszélyességük megítélése nagy tapasztalatot és szakértelmet igényel. Az amplitudók sok nagyságrendet foghatnak át, veszélyességük megítélésénél azonban az észlelési távolságot és a közeg csillapítását is tekintetbe kell venni. Nagyságrendi tájékoztatásul adjuk meg acélanyagok esetére a különböző fizikai effektusok keltette körülbelüli amplitudókat 1 µV-ra vonatkoztatva. (1. táblázat).

Fizikai effektus	dB
diszlokációs változások	10- 20
zárvány-leválás	30- 50
zárvány törése	50- 70
szemcsesatári repedések	60- 80
repedésterjedés	80-100
törés	100-120

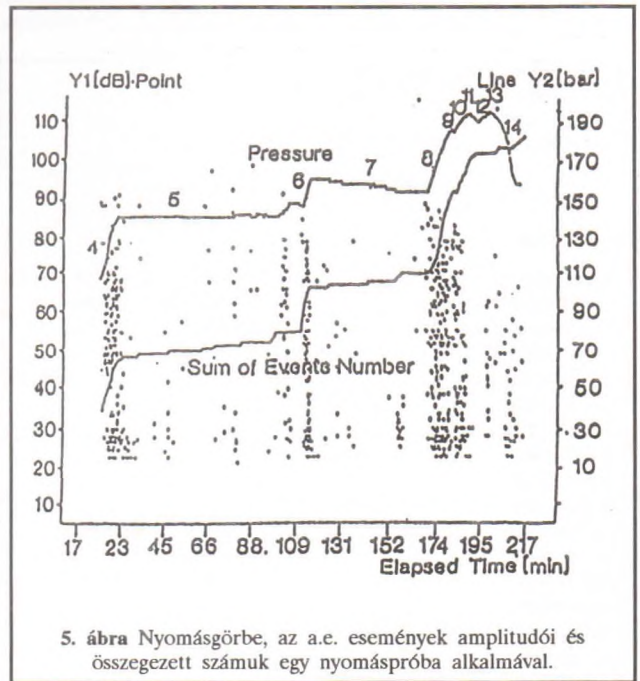
1. táblázat A.e. jelek nagyságrendje

A vizsgált objektum hibamentességének legfontosabb kritériuma az, hogy a nyomástartási szakaszokban az akusztikus forráshely aktivitása megszűnjön, illetve, hogy a nyomás növelésekor az akusztikus forráshely ne legyen kritikusan aktív, illetve kritikusan intenzív, azaz a növekedés mértéke a nyomásemeléssel ne fokozódjon (4. ábra).



4. ábra Aktivitás szerinti osztályozás [8] alapján

A hangforrások lokalizálási térképeit, a nyomás a.e. aktivitás összefüggés ábrázolását különböző paraméterek gyakoriság-diagramjai, paraméterek egymással való kapcsolatát ábrázoló diagramok egészítik ki, amint az pl. az 5. ábrán látható.



5. ábra Nyomásgörbe, az a.e. események amplitudói és összegezt számuk egy nyomáspróba alkalmával.

**Akusztikus emissziós ajánlások**

Magyarországon jelenleg még nincs érvényes akusztikus emissziós szabvány. Nagyobb csatornaszámú akusztikus emissziós mérőberendezésekkel mindössze néhány intézmény rendelkezik: ezek közül a Központi Fizikai Kutató Intézet és az Erőmű Karbantartó Vállalat rendszeresen vállal akusztikus emissziós méréseket. Értékeléseiket az amerikai anyagvizsgálati egyesület (ASTM) akusztikus emissziós szabványai szerint végzik, amelyekről áttekintést a 2. táblázat nyújt.



ASTM szabvány	Témakör
E 569-85	Terhelt szerkezetek a.e. ellenőrzése
E 610-82	A.e. fogalom meghatározások
E 650-85	A.e. érzékelők felszerelése
E 749-80	Hegesztés közbeni a.e. vizsgálat
E 750-80	A.e. műszerek üzemi paramétereinek mérése
E 751-80	Ellenállás ponthegeztés a.e. ellenőrzése
E 976-84	A.e. érzékelők jeleinek reprodukálhatósága
E 1067-85	Üvegszál erősítésű műanyag tartályok és edények
E 1106-86	A.e. érzékelők abszolút hitelesítése
E 1118-86	Hőre keményedő műanyag csövek
E 1139-87	Nyomáshatároló fémfelületek megfigyelése

2. táblázat Az a.e. technika ASTM szabványai

Megjegyezzük, hogy az ASTM-en kívül számos más amerikai, nemzeti és nemzetközi ajánlás ismeretes, ill. van kidolgozás alatt. Vannak szélesebb körben használt, pl. együttműködő vállalatok által kidolgozott, többé-kevésbé egységesített módszereket és értékelési eljárásokat alkal-

mazó a.e. rendszerek is. A részletek tekintetében [7]-re utalunk.

913 079 020

## IRODALOM

- [1] HARDY, H. R., Jr.: Review of international research relative to the geotechnical field application of acoustic emission. *J. of Acoustic Emission*, Vol. 8., No. 4 (1989), pp.65-91.
- [2] KIERNAN, M. T., DUKE, J. C.: Acousto-ultrasonics as a monitor of material anisotropy. *Materials Evaluation*, Vol. 46., No. 8. (July 1988.), p. 1105
- [3] BERKES O.: Forgácsolási folyamatok akusztioemissziós vizsgálata. Kand. disszertáció, Budapest, 1989.
- [4] BAR-COHEN, Y.: NDE of fiber reinforced composite materials – a review. *Materials Evaluation*, Vol. 44., March 1986 pp. 446-454.
- [5] NIELSEN, A.: Acoustic emission from steel structures. – World Meeting on AE, 1989., Charlotte, USA, in *J. of Acoustic Emission*, Vol. 8., No. 1-2. (Jan-Jun. 1989), pp. S57-S61.
- [6] MILLER, R. K., INTIRE, P. Mc. (Eds): *Nondestructive testing handbook*, Vol. 5. Acoustic emission testing, American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [7] PELLIONISZ, P. (Szerk.): *Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálatok*. KFKI-ERŐKAR, 1991.
- [8] Standard practice for acoustic emission monitoring of structures during controlled stimulation. ASTM Standard. E-569-85, American Society for Testing Materials.

# A feszültségintenzitási tényező tartomány küszöbértéke vizsgálatának és meghatározásának néhány problémája

Dr. Lukács János\* dr. Lovas Jenő\*\*

## Bevezetés

Repedéseket, repedésszerű hibákat tartalmazó, ismétlődő igénybevételű szerkezetek, szerkezeti elemek üzemeltethetőségének megítélése összetett feladat. Az ilyenkor felvetődő kérdések megválaszolása megbízható anyagi mérőszámokat követel, amelyek egyike a feszültségintenzitási tényező tartomány küszöbértéke ( $\Delta K_{th}$ ).

A  $\Delta K_{th}$  meghatározása, a szükséges vizsgálat elvégzése és értékelése, több bizonytalanságot, konvenciót hordoz, s rendkívül időigényes. Előbbiek átgondolt és reprodukálható vizsgálati technikát követelnek. Utóbbi pedig – különösen elektrohidraulikus anyagvizsgáló berendezést alkalmazva – felveti a vizsgálati idő korrekt rövidítése iránti igényt. Ezek mellett fokozott szerep jut a számítógépnek, egyfelől a vizsgálatok vezérlése, a mérési adatgyűjtés, másfelől az eredmények értékelése szempontjából.

Mindezeket figyelembe véve, e közleményben, vizsgálati tapasztalatainkról kívánunk beszélni, s kitérünk a feszültségintenzitási tényező tartomány küszöbértéke meghatározásánál alkalmazható konvenciókra, valamint a vizsgálatok rövidíthetőségére.

## Vizsgálati körülmények

A vizsgálatokat hegesztett szerkezetek gyártásához használatos acél alapanyagokon (37C, illetve E420C), szobahőmérsékleten, levegőn, két helyen végeztük. Mindkét helyen – a Budapesti Műszaki Egyetem Mechanikai Technológia és Anyagszerkezet-tani Intézetében, valamint a Miskolci Egyetem

Mechanikai Technológiai Tanszékén – MTS elektrohidraulikus anyagvizsgáló berendezésen dolgoztunk. Az alkalmazott CT próbatestek névleges vastagsága  $B = 11$  mm, illetve  $B = 20$  mm, névleges szélessége pedig  $W = 49$  mm, illetve  $W = 80$  mm volt.

Az [1] szabvány szerint, számítógéppel vezérelt terheléscsökkentés vizsgálatokat végeztünk, az MTS TestLink-TestWare rendszerre fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgáló szoftverének [2] célszerű alkalmazásával.

Ez nem jelentett más, mint azt, hogy minden terhelési szintet egy-egy előrepszett próbatest önálló repedésterjedési sebesség vizsgálatának tekintettük, majd a kapott eredményeket egyesítve értékeltük. Megemlítjük, hogy egy korábbi vizsgálatosorozat tapasztalatai igazolták, hogy a két helyen elvégzett repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei, mint halmazok, statisztikailag azonosnak tekinthetők [3].

A terheléscsökkentés vizsgálatok során a fáradási függvény szinusz alakú, a terhelés aszimmetria tényezője  $R = 0,1$  értékű volt. A vizsgálat kezdetén a maximális erő  $F_{max} = 9000$  N és  $14000$  N, illetve  $F_{max} = 24300$  N és  $45600$  N volt, az ehhez tartozó frekvenciák pedig  $f_s = 20$  Hz, illetve  $f_s = 15$  Hz. A vizsgálat során minden 1 mm-es, illetve 1,5 mm-es repedénovekedés után a terhelés nagyságát 10 %-kal csökkentettük, a frekvenciát pedig ezzel párhuzamosan, a rendszer adta lehetőségeknek megfelelően, növeltük. A vizsgálatok befejezésekor a maximális erő  $F_{maxf} = 1570$  N, illetve  $F_{maxf} = 2950$  N, az ehhez tartozó frekvencia pedig mindkét anyagminőség esetében  $f_f = 50$  Hz, a szoftver felső határfrekvenciája volt. A repedés méretét compliance módszerrel mértük, a szétnyílásmérőt, amelynek határfrekvenciája szintén 50 Hz, a próbatestek homlokfelületén helyeztük el.

\* Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszék

\*\* Budapesti Műszaki Egyetem MTAI Mechanikai Technológiai Tanszék

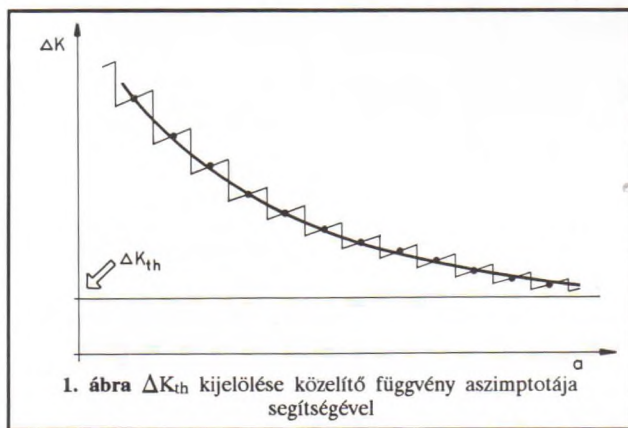


Vizsgálati tapasztalatok

A mérések során azt tapasztaltuk, hogy célszerű az egymást követő terhelési szintek arányát azonosnak választani (százalékosan azonos csökkentés), illetve minden szinten egyező hosszban terjeszteni a repedést. Ezek a vizsgálat követése, az eredmények számítógépes feldolgozása és értékelése szempontjából egyaránt kedvezőek. Emellett a repedés csúcspontjában lévő képlékeny zóna repedésterjesztési hosszhoz viszonyított relatív mérete is csökken, ami – figyelembevételével annak repedésfelező hatását – a végeredmény ( $\Delta K_{th}$ ) megbízhatóságát növeli.

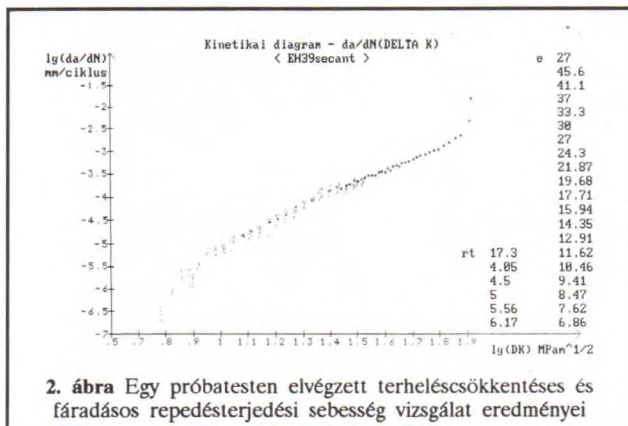
Vizsgálati tapasztalat az is, hogy a próbatest forgácsolt bemetszésének méretei, a szintenkénti repedésterjesztési hossz, valamint a terhelésváltoztatás mértékének együttes figyelemmel kísérése szükséges. A kezdő terhelési spektrum megválasztása döntő a vizsgálat egésze szempontjából. Ennek oka egyrészt a repedés csúcspontja előtt kialakuló képlékeny zóna méretét befolyásoló hatása, másrészt az a tény, hogy két terhelési szint között maximálisan 10 % terheléscsökkenés lehetséges. Túl nagy induló terhelési spektrum esetén nem jutunk eredményhez, túl kis spektrum választások pedig nehezen keletkezik repedés, illetve a mérésekor keletkező relatív hiba nő.

Vizsgálataink során minden terhelési szinten teljesült a normalizált K gradiensre előírt feltétel ( $C^2 > -0,08$  1/mm). Ezen értékek meghatározása, pontosabban a számításukhoz szükséges  $\Delta K$  értékek repedésmérettől (a) függő változása adhat egy konvenciót  $\Delta K_{th}$  megadására és a vizsgálat rövidítésére. Ennek elvét mutatja az 1. ábra.



1. ábra  $\Delta K_{th}$  kijelölése közelítő függvény aszimptotája segítségével

Mivel az egymást követő terhelési szinteken – egy-egy szinten azonos nagyságú repedésterjesztést feltételezve –  $\Delta K$  lépcsőinek változása fokozatosan csökken, a középértékek aszimptotikusan tartanak egy feszültségintenzitási tényező tartomány értékhez. Ez az érték határesetben –  $\Delta K$  értékében nincs lépcső – lehet  $\Delta K_{th}$ . A vizsgálat azért rövidülhet, mert megfelelő közelítő függvény alkalmazása esetén a befejező terhelési szintek száma csökkenhet.



2. ábra Egy próbatesten elvégzett terheléscsökkenés és fáradásos repedésterjesztési sebesség vizsgálat eredményei

A terheléscsökkenés vizsgálat ellenőrzésének egy lehetősége, ha az utolsó terhelési szint után egy repedésterjesztési sebesség vizsgálatot is végzünk. E vizsgálati szakasz adatait úgy célszerű megválasztani, hogy az eredmények részben átfedjék egymást, amint az a 2. ábrán látható.

Ezzel egy próbatestből a Paris-Erdogan modell szerinti kinetikai diagram mind a négy anyagi paramétere ( $\Delta K_{th}$ , C, n és  $\Delta K_{fc}$ ) meghatározható.

Vizsgálati eredmények

A  $\Delta K_{th}$  értékének meghatározását [1] szerint úgy kell elvégezni, hogy a  $10^{-6}$  –  $10^{-7}$  mm/ciklus repedésterjesztési sebesség tartományba eső, minimálisan öt mérési pontra, a legkisebb négyzetek módszerével egyenest kell fektetni, majd annak  $10^{-7}$  mm/ciklus-hoz tartozó helyettesítési értékét kell számítani.

A mérési eredményeket – egy erre a célra kifejlesztett szoftver segítségével – grafikusan differenciálással dolgoztuk fel, majd a  $\Delta K_{th}$  értékeket a fentiek szerint határoztuk meg. Az eredményeket a Táblázat ASTM előírás oszlopa tartalmazza.

A mérési eredmények ilyen feldolgozása ismét megerősítette azt a korábbi tapasztalatunkat [3], hogy ennek módja és az alkalmazott konvenció hatással lehet  $\Delta K_{th}$  értékére. Előbbi kapcsán elegendő arra hivatkozni, hogy grafikus differenciálás (secant method) a mérési pontok számánál eggyel, míg a hét ponton átmenő polinomos módszer (polynomial method) a mérési pontok számánál hattal kevesebb pontban szolgáltat eredményt. Ez akkor is fontos, ha utóbbi pontossága a nagyobb, hiszen 1-1 mm-es repedésterjesztést és 0,1 mm-enkénti adatgyűjtést feltételezve a mérési pontok fele is elveszhet.

Táblázat

$\Delta K_{th}$  különböző módon meghatározott értékei MPa.m<sup>1/2</sup>

Anyagminőség (jel)	ASTM előírás	Közeliítő függvény helyettesítési értéke	
	log (da/dN)		
	-7	-7	-7,5
37C (H21) (H40)	7,7	7,3	7,1
	11,0	11,5	11,4
E420C (EH18) (EH27) (EH39)	4,8	5,3	5,2
	8,1	7,5	7,4
	6,0	6,3	6,3

A  $\Delta K_{th}$  meghatározására alkalmazott konvenció kapcsán említésre érdemes, hogy az összes szükséges feltétel teljesülése esetén is lehet kedvezőtlen, egyenlőtlen a számításba veendő pontok elhelyezkedése. Ez nem jelent más, mint azt, hogy a nagyobb repedésterjesztési sebesség tartományban több a felhasználható adat, s így – ha mind-egyiket figyelembe vennénk – a lineáris regresszió eredménye torzítana. Erre mutat példát a 3. ábra.

Ilyen esetekben  $\Delta K_{th}$  értékének meghatározásához az egy csoportban elhelyezkedő mérési pontoknak csak egy részét célszerű figyelembe venni.

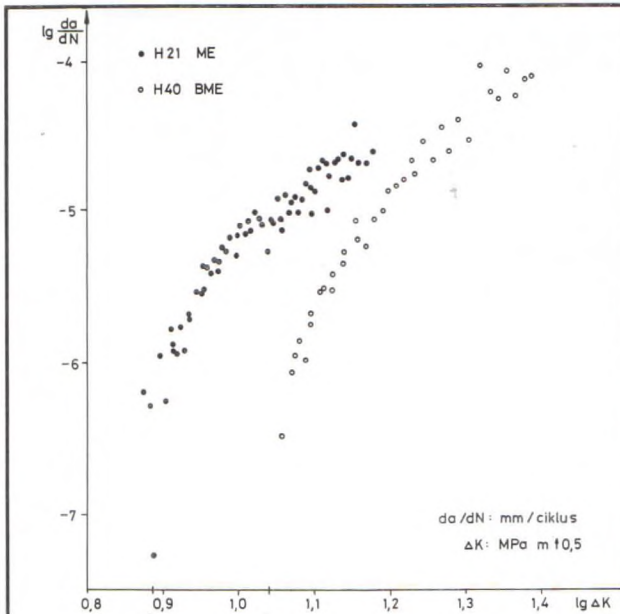
A fenti probléma kiküszöbölését is segíti a mérési pontok nagyobb tartományának számításba vétele  $\Delta K_{th}$  értékének meghatározására. Ennek elvét mutatja a 4. ábra.

A mérési pontok célszerűen megválasztott tartományát nemlineáris függvénnyel közelítve,  $\Delta K_{th}$  értéke adott repedésterjesztési sebességhez kötve kihjelölhető. Ez egyúttal a vizsgálati idő rövidülését is eredményezheti akkor, ha a repedésterjesztési sebesség értékek tendenciája egyértelmű.

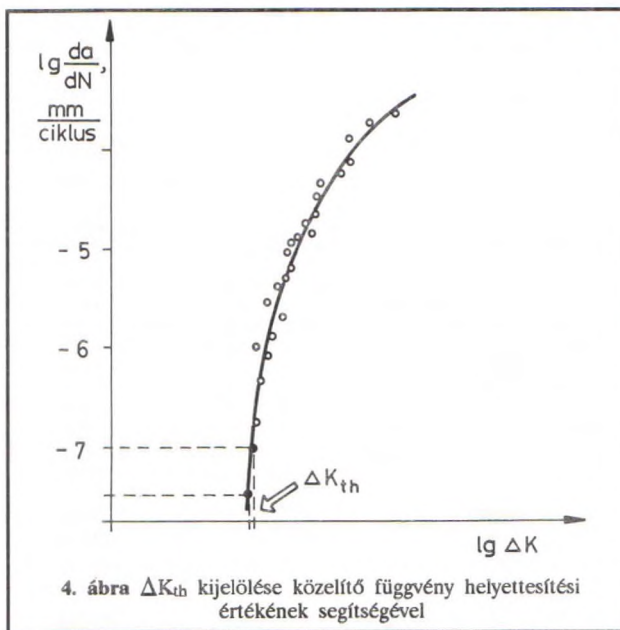
Az elvégzett vizsgálatok eredményeit – egy erre a célra kidolgozott szoftverrel – az alábbi, három paramétert (A, B és K) tartalmazó közelítő összefüggéssel is feldolgoztuk:

$$\log (da/dN) = A \cdot [\log(\Delta K) - \log(K)]^B$$





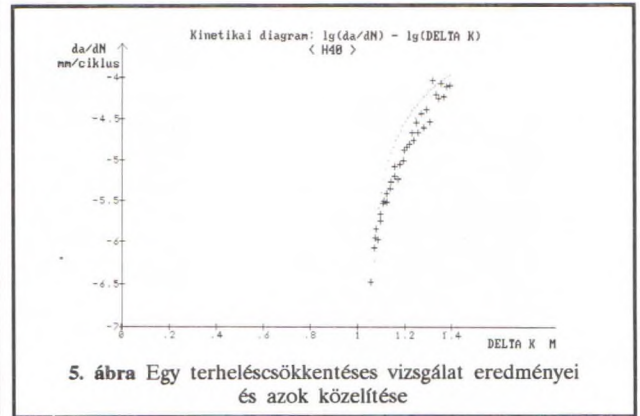
3. ábra Kedvezőtlenül elhelyezkedő  $\Delta K_{th}$  számításához figyelembe veendő pontok



4. ábra  $\Delta K_{th}$  kijelölése közelítő függvény helyettesítési értékének segítségével

Az 5. ábrán egy próbatestre bemutatjuk a mérési eredményekből származó pontokat és a közelítő függvényt.

A paraméterek ismeretében meghatároztuk a függvény  $\log(da/dN) = -7,5$  pontjaihoz tartozó helyettesítési értékeit, amelyeket a Táblázatban, két oszlopban, összefoglaltunk. Az adatokat szemlélve megállapítható, hogy a két helyettesítési érték különbsége minimális, valamint azt, hogy az ASTM előírásban rögzített és az általunk alkalmazott módszer eredményeit jó egyezést mutatnak.



5. ábra Egy terheléscsökkentéses vizsgálat eredményei és azok közelítése

Említésre érdemesnek ítéljük, hogy a Táblázatban közölt  $\Delta K_{th}$  eredmények összhangban vannak a [4] gyűjteményben található adatokkal.

### Megállapítások

A feszültségintenzitási tényező tartomány küszöbértéke ( $\Delta K_{th}$ ) az MTS TestLink-TestWare rendszerében rendelkezésre álló, fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálat végzésére kifejlesztett szoftver (Version 1.028) célszerű alkalmazásával meghatározható.

Az ASTM E 647-88 előírásban rögzített módszer mellett  $\Delta K_{th}$  értéke más konvencióval is kijelölhető.  $\Delta K_{th}$  lehet a kinetikai diagram első tartományába eső pontokat leíró nem lineáris függvény  $10^{-7}$  mm/ciklus-hoz vagy annál kisebb repedésterjedési sebességhez tartozó helyettesítési értéke.

A vizsgálat, pontosabban annak utolsó, nagy időigényű szakaszának rövidítésére, a mérési eredmények fent említett, szélesebb tartományának felhasználása lehetőséget ad.

A 37C és az E420C minőségű alapanyagokon elvégzett vizsgálataink eredményei összhangban vannak az irodalomban, a hasonló anyagokra található eredményekkel.

913 981 001/013

### Irodalomjegyzék

- [1] Standard Test Method for Measurement on Fatigue Crack Growth Rates. ASTM E 647-88
- [2] 759.40 Crack Growth Test. MTS System Co., Minneapolis, Minnesota, 1988. MTS Document Number: 115725-028. Software version: 1.028
- [3] Lukács, J.; Lovas, J.: A fáradásos repedés terjedésével kapcsolatos vizsgálatok és az azokból meghatározható anyagjellemzők és mérőszámok megbízhatósága. Gép., (42) 1990/10. p. 361-366
- [4] Taylor, D.: A Compendium of Fatigue Threshold and Growth Rates. Engineering Materials Advisory Services Ltd., Warley, 1985.

### Témavezető managert

keresünk, japán mérő- és vizsgálo műszerek értékesítésére.

Ha Ön 30-45 éves, műszaki végzettségű és van német vagy angol nyelvismerete, írjon rövid szakmai önéletrajzot.

„Országos hálózat”

TESTOR Bt.

1538 Budapest, Pf. 528.

### HŐKEZELŐ ÉS IZZÍTÓ KEMENCÉK

rövid szállítási határidővel kedvező áron megrendelhetők 1050 °C és 1250 °C véghőmérséklettel, vákuum és védőgáz, kocsifenekű, harang stb. kivételben. Megező kemencék felújítása!

VILLAMOSTECHNIKA  
KEMENCEFEJLESZTŐ IRODA  
Miskolc, 3523 Pf. 23. • Tel.: 46-66-374



## KORSZERŰSÍTSE ANYAGVIZSGÁLÓGÉPEIT!

Az MTS árkedvezményes lehetőséget kínál a mechanikus, az elektromechanikus és a hidraulikus vizsgológépek korszerűsítéséhez, például:

- Precíziós erő-, út- és nyúlásmérők, a hozzájuk csatlakozó mérőerősítő és A/D átalakító digitális adatrögzítést tesz lehetővé.
- Az MTS MicroConsole megkönnyíti a régi gépekkel is a vizsgálatok elvégzését és növeli a mérési és vizsgálati eredmények pontosságát és reprodukálhatóságát.
- A TestLink alkalmazásával vizsgálati feladatait automatizáltan végezheti el.
- A szabályozott vizsgáló rendszer (nemcsak az MTS-é) digitális elektronikával teljes automatizálást tesz lehetővé.

**Készséggel  
adunk tanácsot,  
kérjen  
tájékoztatókat!**



MTS SYSTEMS GMBH  
Potsdamer Str. 23/24  
W - 1000 Berlin 37  
Tel.: 30-81002-0 • Fax: 30-81002-100 • Telex: 185 639 mtsq d

MTA-MMSZ  
Szakasits A. u. 59-61.  
H - 1119 Budapest  
Tel.: 36-1-1869760 • Fax: 36-11611021 • Telex: 225114 mtamm h

## Használt anyagvizsgáló berendezéseket kínálunk eladásra

### EDZ 20 típusú anyagvizsgáló berendezés

Hálózati csatlakozás: 380 V 50 Hz  
Teljesítmény igény: 5 kVA  
Befoglaló méretek: 2000x700x2300 mm  
Tömeg: 1700 kg

### MOHR-FEDERHAFF UDP 40 típusú szakítóberendezés

Hálózati csatlakozás: 380 V 50 Hz  
Befoglaló méretek: 2200x1000x2800 mm  
Tömeg: 2300 kg

### SCHOPPER FM 1000 típusú szakítóberendezés

Hálózati csatlakozás: 380 V 50 Hz  
Befoglaló méretek: 1050x600x1750 mm  
Tömeg: 650 kg

### SCHOPPER FM 500 típusú szakítóberendezés

Hálózati csatlakozás: 360 V 50 Hz  
Befoglaló méretek: 900x600x1750 mm  
Tömeg: 350 kg

### MOHR-FEDERHAFF UDP 6 típusú szakítóberendezés

Hálózati csatlakozás: 380 V 50 Hz  
Befoglaló méretek: 100x800x2500 mm  
Tömeg: 560 kg

### Erőmérési fokozatok

0-10 kN	1 osztás értéke 50 N
0-20 kN	1 osztás értéke 100 N
0-40 kN	1 osztás értéke 200 N
0-100 kN	1 osztás értéke 500 N
0-200 kN	1 osztás értéke 1000 N

### Erőmérési fokozatok

0-20 kN	1 osztás értéke 50 N
0-40 kN	1 osztás értéke 100 N
0-80 kN	1 osztás értéke 200 N
0-200 kN	1 osztás értéke 500 N
0-400 kN	1 osztás értéke 1000 N

### Erőmérési fokozatok

0-2 kN	1 osztás értéke 5 N
0-5 kN	1 osztás értéke 10 N
0-5 kN	1 osztás értéke 20 N

### Erőmérési fokozatok

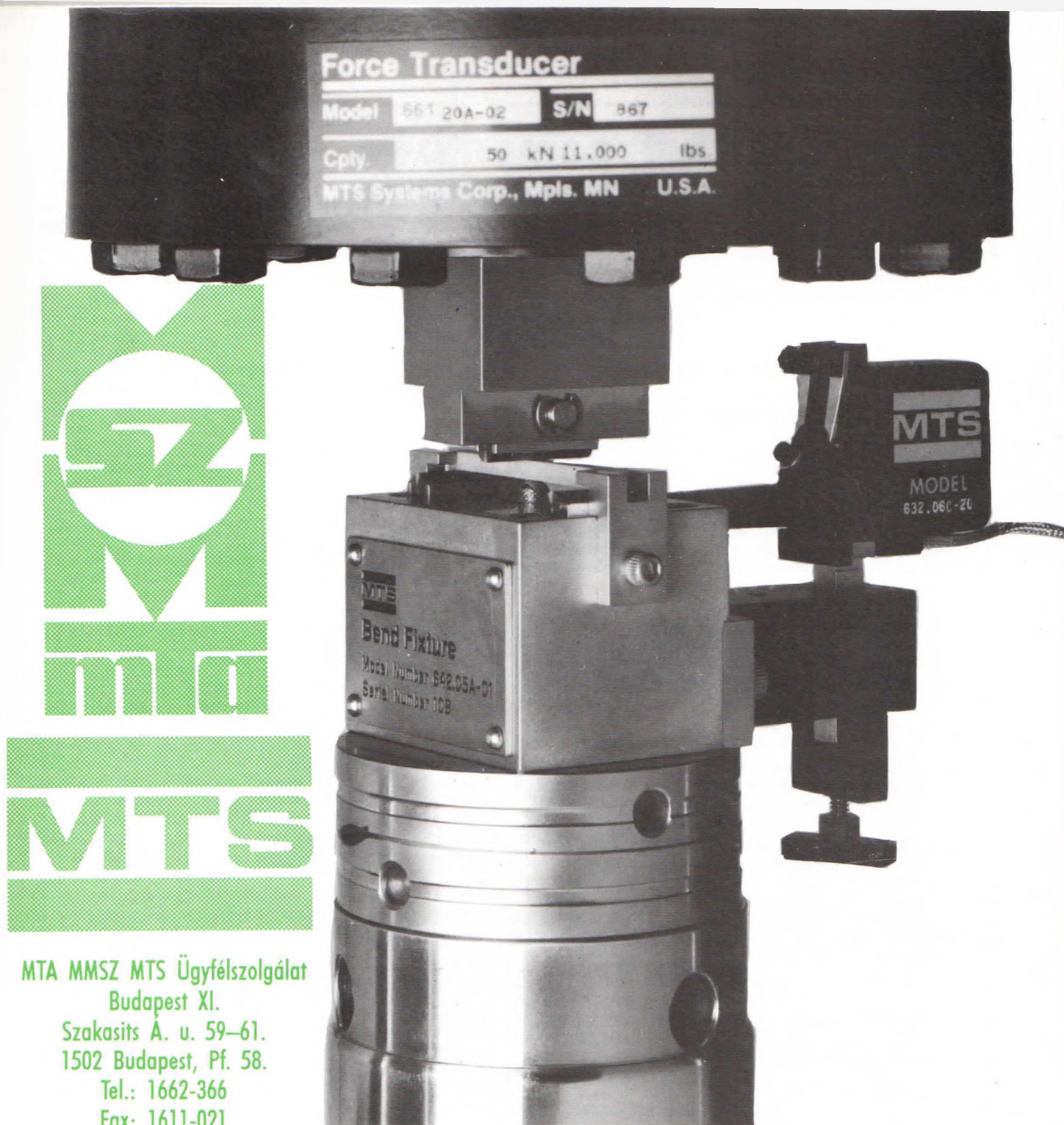
0-1 kN	1 osztás értéke 2,5 N
0-2,5 kN	1 osztás értéke 6 N
0-5 kN	1 osztás értéke 10 N

### Erőmérési fokozatok

0-12 kN	1 osztás értéke 50 N
0-30 kN	1 osztás értéke 100 N
0-60 kN	1 osztás értéke 200 N

**Berendezések után érdeklődni lehet a Kladóban,  
felvilágosítást ad: Kecskés Péter üzletkötő**





MTA MMSZ MTS Ügyfélszolgálat  
Budapest XI.  
Szakasits A. u. 59-61.  
1502 Budapest, Pf. 58.  
Tel.: 1662-366  
Fax: 1611-021  
Tx.: 22-51-14

MTS gyártmányú anyagvizsgáló berendezések javítása, karbantartása.  
Szaktanácsadás, berendezések és tartozékok beszerzésének lebonyolítása kedvező forint áron.

## Új szolgáltatásunk:

Erőmérő, Induktív elmozdulásmérő,  
Finomnyúlásmérő körök (érzékelő + elektronika)  
kalibrálása OMH által hitelesített mérőeszközökkel.



# A megszilárdult cementpép porozitásvizsgálati módszereinek kritikája\*

Prof. Dr. Popovics Sándor\*\*

## A pórusméret-eloszlás és mérése

A megszilárdult cementpép lényeges jellemzője a pórustartalom mellett a pórusméret-eloszlás.

A megszilárdult cementpép pórusméret-eloszlásának a közvetlen mérésére leggyakrabban két módszert alkalmaznak: a higanyos porozimetriát és az adszorpciós méréseket. E két módszer eredményei között sajnos ellentmondások vannak: a higanyos porozimetriával mért teljes pórustartalom közelebb van a vízzel telített pépből elpárologtatható víz térfogatához, mint a szorpciós izotermákból megállapított pórustérfogat [1]. Továbbmenőleg mindkét módszernek vannak közös hibái, amelyek az eredmények bizonytalanságát okozzák. Először: a cementpépnek teljesen száraznak kell lennie a vizsgálat végrehajtásakor és a szárítás lényeges változást okozhat a pórusstruktúrában. Másodszor: a pórusméretek meghatározása a mért adatokból a pórusalak hengeres formájának a feltételezésére támaszkodik, ami nem igaz. Így a számított pórusméret-eloszlás csak közelítés.

## Higanyos porozimetria

A higanyos porozimetria azon a tényen alapul, hogy a higany a legtöbb közegben nem nedvesítő folyadékként viselkedik. Következésképpen e közegek repedéseibe és nyílásaiba nem hatol be spontán módon, hanem ehhez nyomásra van szükség. Ha a porózus szilárd anyag mintáját kúposan kialakított kapilláris csőbe szigetelik, légtelenítik, higannyal feltöltik és nyomás alá helyezik, akkor a higany kitölti a pórusokat egy bizonyos minimális pórusméretig. A kisebb pórusok kitöltéséhez növelni kell a nyomást. A nyomás és a pórusméret közötti összefüggést a Washburn-egyenlet írja le [2]:

$$r = \frac{2\gamma |\cos\varphi|}{P}$$

ahol  $r$  = a pórus sugara,  $P$  = a pórusra ható nyomás,  $\gamma$  = a higany felületi feszültsége,  $\varphi$  = a higany és a pórusfal illeszkedési szöge.

A  $\gamma = 0,480 \text{ N/m}$  és  $\varphi = 140^\circ$  jellemző értékekre az egyenlet

$$r = \frac{7,5 \cdot 10^{-6}}{P}$$

alakban írható, ahol  $r$  = a pórus sugár,  $m$  és  $P$  = a nyomás,  $Pa$ .

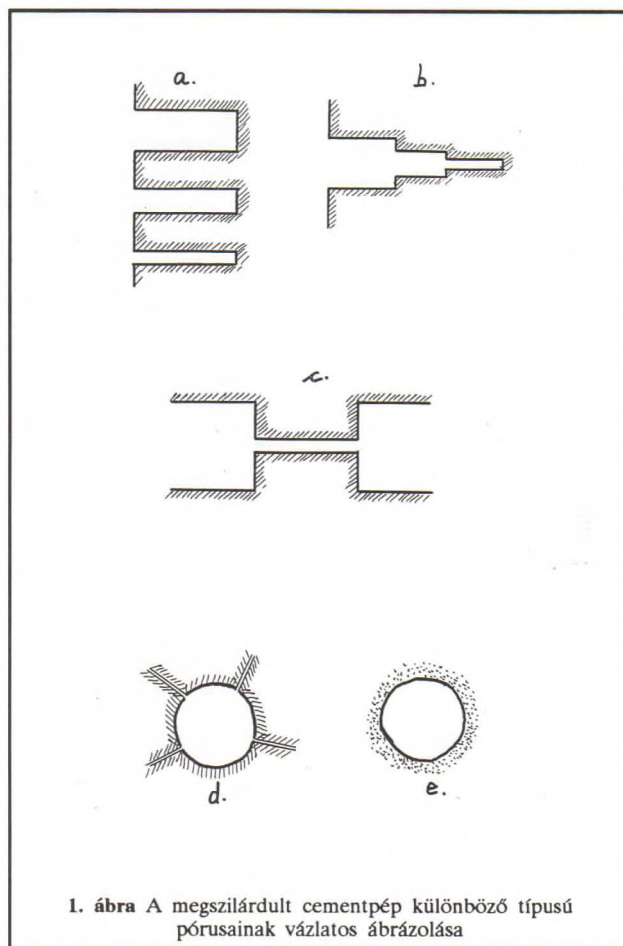
A higanyos poroziméternek két fajtája van: az alacsony és a nagy nyomású készülék. Az alacsony nyomású 0-tól az atmoszférikus nyomásig működik, a nagy nyomású az atmoszférikus nyomás fölött. A kereskedelemben elérhető nagy nyomású készülék 200 MPa nyomású, bár 400 MPa nyomású is kapható. A legkisebb mérhető pórusméret kb. 2 nm, a legnagyobb kb. 1 mm, speciális eljárással. A higanyos poroziméter 4 nm és 15  $\mu m$  közötti pórusméretek mérésére a legalkalmasabb, ahogy azt pl. scanning elektronmikroszkóppal bizonyították [3].

A pórusokba behatoló higany térfogatát mérik és a nyomás függvényében automatikusan feljegyzik. E meny-

\* A betonstruktúra-tartósság c. konferencián 1991. X. 18-án elhangzott előadás

\*\* Samuel Drexel University, USA

nyiségekből a különböző pórusméretek számíthatók. Ezekben a számításokban bizonyos egyszerűsítő feltételeket használnak, mint pl. a felületi energia értékét, az illeszkedési szög változatlanosságát.



1. ábra A megszilárdult cementpép különböző típusú pórusainak vázlatos ábrázolása

Az eljárásból következik, hogy a kapott pórusméret-eloszlás csak akkor pontos, ha a nagyobb pórusok tökéletesen össze vannak kötve elég tág csatornákkal, vagy ha a póruscsatornák fokozatosan szűkülnek, azaz a higannyal elsőként kitöltött pórusok a legnagyobbak és a következők fokozatosan kisebbednek. Az 1/a és 1/b ábrák mutatják azt a rendszert, ahol a higanyporoziméter megfelelő eredményeket adhat. Sajnos úgy tűnik, hogy a cementpépben nem sok ilyen pórus van, hanem a leggyakrabban az 1/c, d és e ábra szerinti, ahol a porozimetria többé-kevésbé hibás eredményeket szolgáltat. Ez a hiba két módon mutatkozik meg:

- a higanyporoziméterrel kapott pórusméretek inkább a pórusszáj méretei, mintsem a valóságos pórusoké, és
- vannak igen nagy légbuborékok, amelyek a higanybehatolás számára hozzáférhetetlenek, mert teljesen kör-



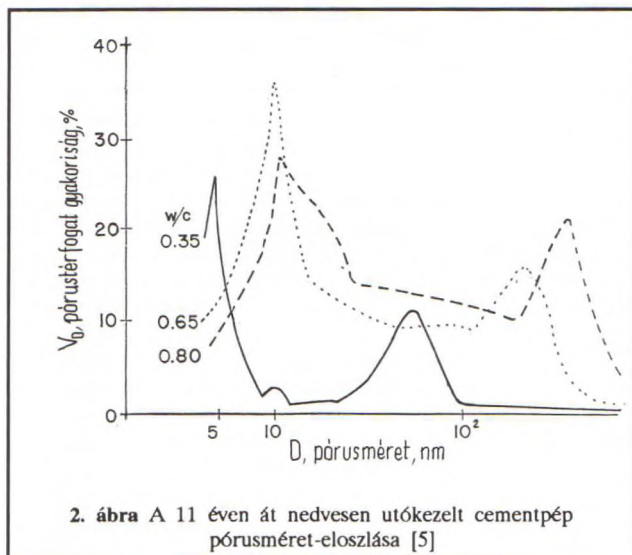
beveszik olyan túl finom pórusok, amelyeket nem tud mérni a higanyos módszer.

Például az 1/c ábra esetében a higanyos poroziméter az első nagy üreget méri. A második nagy üreget viszont úgy értékelné, mint az összekötő csatorna átmérőjét, azaz a pórusnyílást adja meg. Az 1/d ábra esetén a nagy üreg olyan finom póruscsatornákkal van összekapcsolva, amelyek túl finomak a higany számára a rendelkezésre álló nyomás alatt, ezért ez teljesen kimarad a teljes porozitásból. Az 1/e ábra az 1/d ábra speciális esete, amelyben a nagy üreget a higany behatolásához túl finoman struktúrált hidráttermékek veszik körül.

Ezért felmerül az a kérdés; vajon milyen típusú és mennyi pórus marad felderítetlen a higanyos porozitásméréskor? Erre az a felelet, hogy a finom pórusok és a nagy üregek meglepően nagy mennyisége elvész. Például Winslow és Diamond ismertet egy esetet [4], ahol a  $w/c = 0,4$  víz-cement tényezőjű, 28 napos cementpép teljes porozitásának 35 %-a higany nélkül maradt, azaz a higanyporoziméter nem derítette fel. Először ezt az „elkallódott” porozitást teljes mértékben a higany részére elérhetetlen túl finom pórusoknak tulajdonították, de később további „bűnösként” kezelték az áthatolhatatlan módon bezárt nagy üregeket is [3]. Alford és Rahman legújabb vizsgálatukban a higanypenetrációs porozimétert kiegészítették adszorpciós mérésekkel és optikai mikroszkópiával. Azt találták, hogy 0,8 víz-cement tényezőjű, megszilárdult cementpép esetén a higany a 15  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű pórusokba csak a teljes pórustérfogat 1,43 %-ába hatolt be, míg a teljes elkallódott porozitás 18,27 %. Arra következtettek, hogy a nagy víz-cement tényezőjű cementpépeknek egymással összekötött pórusokból álló porozitása van és az uralkodó pórusfajta az 1/c és 1/d ábráknak megfelelőek. A pórusok összekapcsoltsága  $w/c = 0,3$  mellett messze kisebb, az uralkodó pórusfajta valószínűleg az 1/d és 1/e ábrák szerinti volt és az elkallódott porozitás 37,03 % volt. Ezekből arra következtettek, hogy a higanyporozimetria során elveszett pórusok többsége túlnyomó részben 15  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb és nem ultrafinom pórusok, mint ahogy ezt korábban feltételezték.

A sok bizonytalanság ellenére a higanyos porozimetria a legnépszerűbb módszer a hasonló tájékoztatást nyújtó módszerek között. Ennek oka viszonylagos egyszerűsége és meghatározási gyorsasága.

Verbeck és Helmuth [5] adatokat közöltek három különböző  $w/c$  víz-cement tényezővel készített, 11 évig nedvesen utókezelt cementpép pórusméret-eloszlásairól (2. ábra). A pórusméret-eloszlási görbék mutatják, hogy valamelyest önkényesen két pórusrendszert lehet elkülöníteni úgy értékelve, hogy a görbék két világosan meghatározható



maximumot mutatnak, rendre a gélpórusoknak és a kapilláris pórusoknak megfelelően. A görbéken az is látható, hogy a gélpórusok méretei, de főleg a kapilláris pórusok méretei növekszenek a víz-cement tényező növekedésével. Meg kell jegyezni azonban, hogy a legújabb mérések nem jeleznek sem kapilláris, sem gél-tereket, hanem kizárólag a cement hidráttermékeinek finom, egyedi szemcséi közötti teret [4]. Ennek az ellentmondásnak az oka nem világos. Mindenesetre a kapilláris pórusok méreteloszlását befolyásolhatja a felhasznált cement szemeloszlása, a hőmérséklet, az adalékszerek stb.

### Adszorpciós mérések

A porozitás meghatározására adszorpciós méréseket is lehet alkalmazni, különösen a 30 nm-nél kisebb méretű pórusokra, mint amilyenek a gélpórusok [6]. Például a gélpórusok mennyisége 0,45-nél kisebb viszonylagos víznyomás alatt végrehajtott adszorpciós mérésekkel meghatározható, míg a gélpórusok és a kapilláris pórusok összege 1,0 értékű viszonylagos víznyomás alatt, azaz telítéssel. Ennek az az alapja, hogy minél kisebb a pórus átmérője, annál kisebb benne a víznyomás. Következésképpen alacsony nyomás mellett a kisebb pórusokat tölti ki a víz, míg a nagyobbak üresek maradnak. Megjegyzendő, hogy a nagyon kicsiny pórusok mérése ritkán szükséges, mint hogy e pórusok hozzájárulása nagyon csekély.

A légtartalom mennyiségének a meghatározására rendelkezésre álló módszerek még az optikai gáz-kromatográfia és az adszorpció.

A 18 és 100 nm tartományon belül a higanypenetráció által mért pórustartalom többszöröse annak, amit nitrogén adszorpcióval lehet megkapni [6]. Megjegyzendő az is, hogy lényeges különbségek észlelhetők a nitrogén és a vízgőz adszorpciós vizsgálatok eredményei között. Ezért nem ésszerű a különböző vizsgálati módszerekkel kapott pórusméret-eloszlások összehasonlítása egymással.

### Következtetések

Úgy tűnik, hogy jelenleg a megszilárdult cementpép pórusméret-eloszlását akkor lehet a legjobban megkapni, ha a következő vizsgálati módszereket kombináljuk:

1. A porozitás teljes térfogatát például adszorpcióval határozzák meg.
2. A 15  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb pórusokhoz optikai pontszámoló mikroszkópot használnak.
3. A 15  $\mu\text{m}$  és a 4 nm közötti pórusátmérőket higanyporozimetriával vizsgálják meg.
4. A 4 nm-nél kisebb pórusátmérőkhöz adszorpciós módszereket lehet használni.

### Hivatkozások

1. Copeland, L. E. and Verbeck, G. J., „Structure and Properties of Hardened Cement Pastes”, VI. Intern. Congr. on the Chemistry of Cement, Moscow, September 1974.
2. Van Brakel, L., Modry, S., and Svata, M., „Mercury Porosimetry: State of the Art,” Powder Technology, Vol. 29, 1981.
3. Diamond, S., „A Critical Comparison of Mercury Porosimetry and Capillary Condensation Pore Size Distribution of Portland Cement Pastes,” Cement and Concrete Research, Vol. 1, No. 5., September, 1971, pp. 531-545
4. Winslow, D. N. and Diamond, S., „A Mercury Porosimetry Study of the Evolution of Porosity in Portland Cement,” Journal of Materials JMLSA, Vol. 5, No. 3., Sept. 1970.
5. Verbeck, G. J. and Helmuth, R. H., „Structures and Physical Properties of Cement Pastes,” Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III., Properties of Cement Past and Concrete, Tokyo, December 1969.
6. Sneek, T., and Oinonen, H., „Measurement of Pore Size Distribution of Porous Materials,” Julkaisu 155, The State Inst. for Technical Research, Helsinki, 1970.