

VASBETON SZERKEZETEK VIZSGÁLATA AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓ MÓDSZERÉVEL

*Varga László**

RÖVID KIVONAT

Az akusztikus emisszió, mint roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer új lehetőségeket jelent a vasbeton szerkezetek vizsgálatában. E módszer segítségével lehetséges nyílik a vasbeton szerkezetekben bármilyen okból keletkező repedések keletkezésének előrejelzésére, a kialakult repedések helyének meghatározására, valamint a repedések terjedésének követésére. Kísérleti kutatás eredményei alapján megállapítottuk, hogy a Kaiser-hatás vasbeton szerkezetek esetén is fellép, ezáltal lehetőség van egy szerkezeten már korábban alkalmazott teher értékének utólagos megállapítására. E vizsgálati módszer statikus terhelési folyamatban történt alkalmazásával sikerült meghatározni a fázasztóvizsgálat során alkalmazandó azon fázasztó teher nagyságát, melynek hatására a szerkezet megreped.

1. BEVEZETÉS

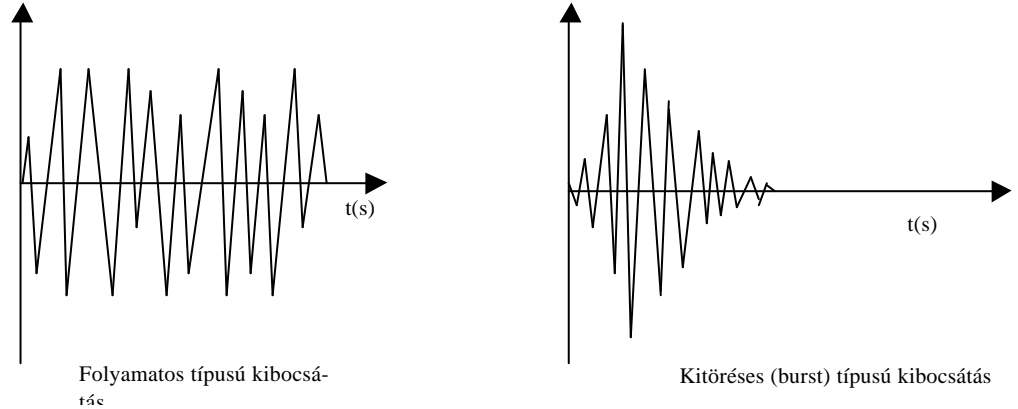
Az akusztikus emisszió jelenségének felhasználása fémszerkezetek és szálerősítésű műanyagok vizsgálatára napjainkban már meglehetősen elterjedt eljárás. E jelenséget felhasználó módszer segítségével behatárolható a szerkezetben mechanikai vagy egyéb igénybevétel miatt keletkezett repedések keletkezésének ideje, helye és a repedések terjedése. A vasbeton szerkezetek egyik alapvető sajátossága, hogy bizonyos igénybevételi szint felett megrepednek. A szabályzati előírások általában csak a legnagyobb repedéstágasság értékének ismeretét követelik meg. Bizonyos esetekben azonban szükség lehet a repedések keletkezésének és terjedésének alapos ismeretére is. Egyik ilyen eset az üzemszerűen fázasztó igénybevételnek alávetett vasbeton szerkezetet repesztő igénybevételének meghatározása, és e jellemző egyenértékű statikus megfelelőjének meghatározása a későbbiekben alkalmazott termékellenőrzés céljára.

2. AZ AKUSZTIKUS EMISSZIÓ

A szilárd anyagban a terhelés hatására a makro-, illetve a mikroszerkezet hirtelen megváltozhat, például krisztallit deformációk, kristályszerkezeti diszlokációk, mikrorepedések jöhetnek létre. Az anyagban tárolt energia egy-egy részének felszabadulása rugalmas hullámokat kelt, azaz akusztikus emisszió jön létre (röviden AE vagy a.e.). Az a.e. jellegét tekintve lehet

* okl. építőmérnök, dr. techn., tudományos munkatárs, MTA-BME Vasbeton Kutatócsoport

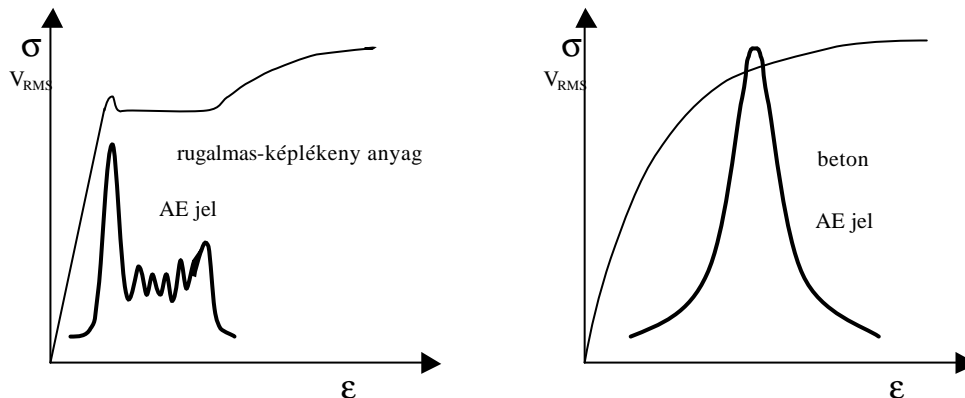
folyamatos és kitöréses (burst) (1. ábra). A kitöréses a.e. egyedi hullámcsomag és lecsengo. A keletkezett hullámok a szerkezetben szétterjednek és arra alkalmas érzékelőkkel felfoghatóak. A rezgés frekvencia tartománya 100-2000 kHz közé esik. A különböző ismert terjedési módok, reflexiók, interferenciák miatt a felfogható hullámforma meglehetősen szabálytalan.



1. ábra. Az akusztikus emissziós hullámfajták.

A jelenségről tudományos alaposítással először Schockley számolt be [1] 1948-ban, bár a jelenség már korábban is széles körben ismert volt (pl. ónlemez sajátságos hangkibocsátása mechanikai igénybevétel hatására). Az első jelentősebb kutatást Kaiser, J. végezte a müncheni muszaki egyetemen. Kutatásait az ultrahang tartományokban folytatta elektronikus berendezés segítségével. Felfedezte a róla elnevezett és számos kristályos anyagnál fellépő jelenséget, a Kaiser-hatást, mely szerint az előzetesen már mechanikailag feszültség alá került anyag a későbbiekben csak e feszültség szintet meghaladó újabb feszültség fellépése esetén bocsát ki számottevő akusztikai jelet [2].

A kutatások eredményei alapján megállapították azt is, hogy a különböző anyagok a.e. tulajdonságai eltérőek (2. ábra). Az a.e. kutatásában a 60-as évek hozták átörözt, melyek végén az első kereskedelmi a.e. berendezések is megjelentek. A következő három évtizedben az elektrotechnika rohamos fejlődésével párhuzamosan fejlődött e terület kutatása és ipari felhasználása elsősorban a gépészetben, különösen a nyomástartó edények (atomeromui csövezetékek és tartályok) alkalmazásának területén beleértve a minőségellenőrzést és az üzem folyamatos ellenőrzését.



2. ábra. Különböző anyagfajták akusztikus emissziós aktivitása.

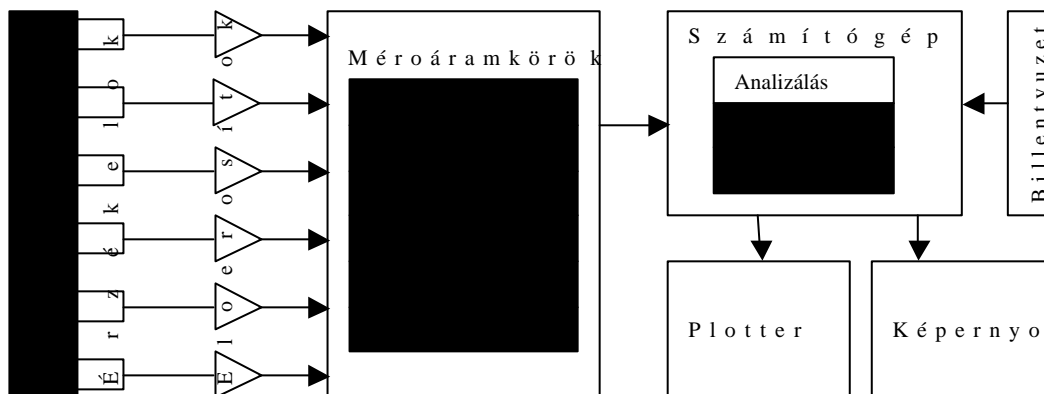
A kutatások eredményei alapján nyilvánvalóvá vált, hogy két területen lehet az elért eredményeket hasznosítani. Az egyik terület az anyagok esetleges üzem közbeni megrepedésének elojelzése volt, hiszen már a repedés tényleges megjelenése előtt jelentősen megnőtt az a.e. aktivitás. Ez módot adott arra, hogy azokon a területeken, ahol repedés fellépte nagy kockázatot jelentett volna az üzembiztonságra (pl. nukleáris technikában a csövezetékek és tartályok, vagy repülésben, urrepülésben alapvető teherhordó szerkezeti elemek és csövezetékek) időben megtegyék a szükséges műszaki lépéseket. E feladathoz kevés számú érzékelő és viszonylag egyszerű felépítésű a.e. műszer megfelelő volt. A másik terület a keletkezett repedések helyének és terjedésének meghatározása. E feladat jellege, valamint a bonyolult és sok esetben majdnem kezelhetetlen eredő hullámalak miatt (különbözőfajta hullámterjedések, többszörös visszaverődések), már több érzékelő (általában hat, nyolc) és hallatlanul bonyolult felépítésű célműszer alkalmazását követelte. Ugyanakkor az a.e. analízison túl a térben elhelyezkedő érzékelőkből az a.e. események kipattanása után kapott jelekből bonyolult számítással lehetett csak meghatározni (lokalizálni) a hangforrás helyét, ami komoly számítástechnikai támogatást igényelt. Mindezek mellett az a.e. események helyes értelmezése nagyfokú jártasságot, tapasztalatot, azaz nagyszámú kísérlet elvégzésében való részvételt feltételez a kutatók és alkalmazók részéről. Az elozók talán magyarázatot adnak arra, hogy hazánkban az építőmérnöki kutatási és alkalmazási területen miért nem terjedt eddig el e mérés technikai módszer és miért mondható még napjainkban is újdonságnak. Az elozók ellenére számos külföldi példa bizonyította a módszer eredményes alkalmazhatóságát, például a biomechanikai kutatásokkal kapcsolatban az emberi csontváz teherviselő elemei működésének megértésében, a csontpótlások helyes mérnöki megtervezésében, a medencecsonti, térdizületi vagy szájüregi protézisek erotanilag megfelelő kialakításában. További fontos alkalmazási területet jelent a szerkezetek (főként hidak) öregedésének vizsgálata vagy a vasbetétek betonban történő lehorgonyozódásának, illetve kompozittal erősített vasbetonszerkezetek repedésekkel kapcsolatos viselkedésének tanulmányozása [3].

A módszer hazai alkalmazása más területen azonban már több mint egy évtizedes múltat tekint vissza. A KFKI-ban a hetvenes évek közepétől megindultak a kutatási és műszerfejlesztési munkák. A módszer ipari alkalmazásai az eroműtechnikában és az atomenergia iparban valósultak meg [4].

3. A MÉROBERENDEZÉS

A kísérleti próbatételben a felszabaduló rugalmas alakváltozási munka által keltett rezgések érzékeléséhez, a kialakult repedés helyének és a repedés terjedésének meghatározásához (lokalizálás) a mért adatok, valamint azok real-time feldolgozásához bonyolult méro és feldolgozó rendszer szükséges. Egy lehetséges rendszer egyszerűsített blokkdiagramját mutatja a 3. ábra. A vizsgált szerkezeten kell elhelyezni a rezgésérzékelőket olyan elrendezésben, hogy lokalizálás esetén a keletkező repedések lehetőleg az érzékelők által meghatározott térbeli

alakzaton belül legyenek. Az érzékelők különböző fizikai elven működhetnek (piezoelektromos, elektromágneses, kapacitív,...stb.), de olcsóságuk, egyszerűségük és alacsony zaj/jel viszonyuk miatt legjobban a piezoelektromos elven működő detektorok terjedtek el, melyek frekvencia menete 100-1000 kHz között van. Az érzékelőt akusztikus csatolóanyag alkalmazása mellett (ami közönséges kenőzsír lehet, mint az ultrahangos vizsgálatoknál) a szerkezet felületére kell szorítani. Az érzékelőhöz közvetlenül (sokszor egybeépítve) csatlakozik az előerősítő a zaj csökkentése érdekében, majd a mért jel a jelfeldolgozó egységbe kerül, ahol szűrjük és a mérőáramköröknek megfelelő szintre erősítjük. A következő egység, egyben a berendezés lelke a mérőáramkörök magában foglaló rész. Ez a rész már mérnöki szempontból is értékelhető jellemzőket szolgáltat, mint például az események (az a.e. kitérések) száma, ennek időegységre eső átlaga, az abszolút átlag, az RMS érték (a felszabadult teljesítménnyel arányos érték),...stb. A feldolgozó lánc végén az utolsó, a nem minden esetben létező, de a korszerű berendezések feltétlen részét



3. ábra. Egy mérőberendezés blokkvázlata.

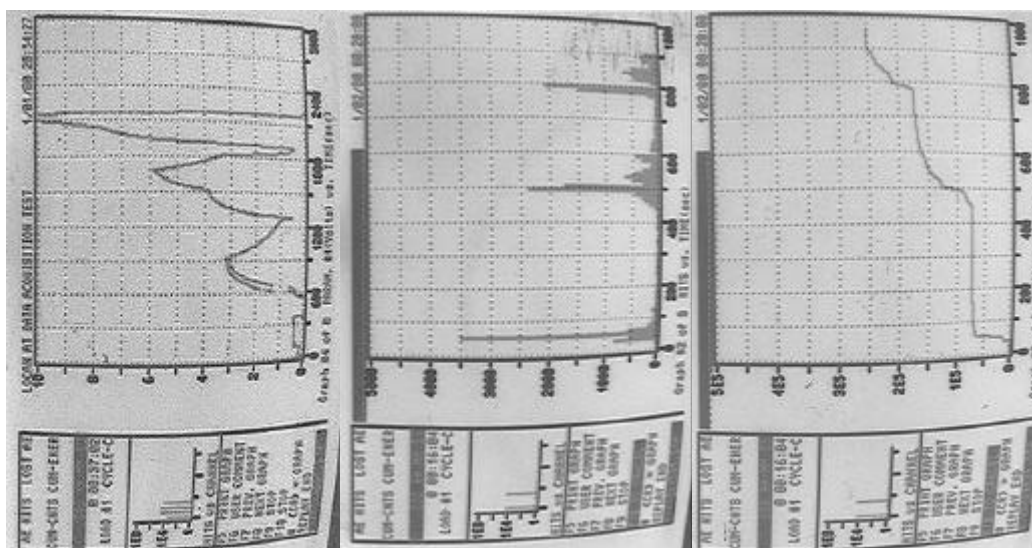
képezi a személyi számítógép. Ennek képernyője egyben a fő kijelző egység is. A számítógép valójában részlegesen integrálódik a mérőáramkörökkel, mert a jelfeldolgozás már nemcsak hardveres, hanem szoftveres úton is megvalósítható. Ezt a napjainkban már széles körben elterjedt mikroprocesszoros technikával (programozott muszerek) valósítják meg. A számítógép egyben adatgyűjtő is, ahol a mért és feldolgozott adatokat digitalizált formában tárolják. Számos összeállítás több, különbözőfajta mérőmagnetofont is tartalmazhat.

4. A KÍSÉRLETEK ÉS EREDMÉNYEI

A módszer kipróbálására, valamint határozott célú felhasználására egy kísérletet, illetve egyfajta vasbeton elem vizsgálatát végeztünk el. A kísérletben beton kockák és vasalatlan betoncsövek terhelés közbeni akusztikus emisszióját elemeztük. A vasbeton elemek vizsgálata során elfeszített vasbeton keresztaljak repeszto erejét határoztuk meg, illetve tanulmányoztuk a repedés előtti állapot hangemissziós jellemzőit.

4.1. Betonkockák nyomóvizsgálata

A kísérlet során azonos betonból készült 200x200x200 mm élhosszúságú kockák terhelés alatti hangkibocsátását vizsgáltuk. Eloszor a terhet folyamatosan, az idő függvényében növeltük a törésig, s közben regisztráltuk az események (a.e. kitörések) bekövetkezését, és a számítógép kijelzőjén szintén az idő függvényében megjelenítettük az időegység alatt bekövetkezett eseményszámot. Ez a függvény a várakozásnak megfelelően monoton növekvő volt, és a törés bekövetkezése előtt az időegység alatt bekövetkezett eseményszám rohamosan növekedett. Mint tapasztalatot meg kell jegyezni, hogy az összegzett eseményszám bár minőségileg jól mutatta a hamarosan bekövetkező törést, de a terhelési folyamat végén megkapott törési szilárdsággal túlságosan gyenge korrelációt – mérnöki szempontból használhatatlan kis értéket – adott. A későbbi kockaterhelések során visszaterhelést is alkalmaztunk, azaz egy-egy elért feszültség szintre egy alacsonyabb értékre visszatereltünk, számos esetben gyakorlatilag tehermentesítettünk.



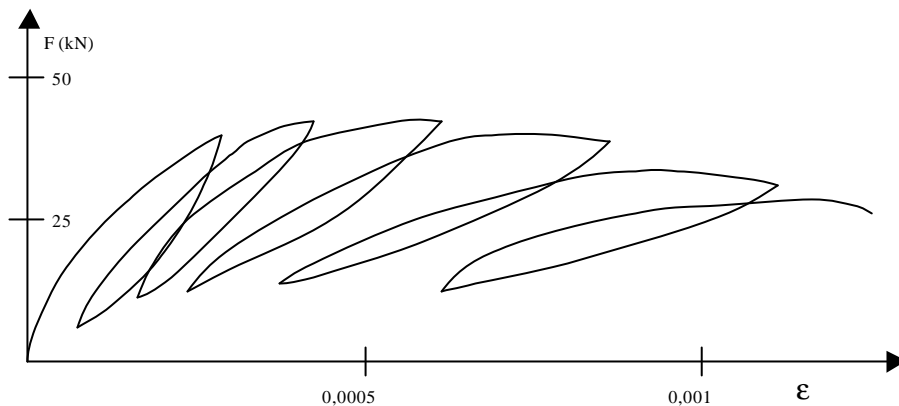
4. ábra. A Kaiser-hatás regisztrátuma.

Az ismételt le- és felterhelés során tapasztaltuk a Kaiser-hatás felléptét, azaz míg a terhelés által a próbatestben felléptetett feszültség kisebb volt a már korábban alkalmazottnál, addig a.e. esemény gyakorlatilag nem következett be, vagyis a próbatest néma volt. A kísérlet többször megismételtük, így megállapíthattuk, hogy a Kaiser-hatás beton ismételt terhelése esetén is fellép. Ezen jelenséget három, a számítógép képernyőjéről készült és összevágott fényképfelvétellel szemléltetjük a 4. ábrán. A képeket 90°-al balra elforgattuk, hogy az időtengelyek egymás mellé kerüljenek. Mind a terhelést, mind az időegység alatt bekövetkezett eseményszámot, mind az a.e. kitörések nyomán felszabadult energiaösszeget az idő függvényében ábrázoltuk. A bal oldali képen jól látható a terhelés időbeli változása, azaz a fel-, a le- és az ismételt felterhelés három lépcsőben. Ezen ábrának megfelelően szemléletesen mutatja a közép-

so és a jobb oldali fénykép, hogy új események – azaz az a.e. kitörések -, csak a még el nem ért teher szint meghaladása után keletkeznek. Az ábra jobb oldali fényképe mutatja, hogy a felszabadult energia összege nem nőtt addig, amíg a leterhelés után az ismét megnövelt teher el nem érte a leterhelés előtti értéket (meg kell jegyezni, hogy a jobb oldali terhelési ábra időlép-technikai ok miatt nem teljesen egyezik meg a két másikkal.)

4.2. Vasalatlan betoncső vizsgálata

A vasalatlan betoncső vizsgálata valójában az éltő teher meghatározása volt, melyet már a megelőzőkben is számos alkalommal (oktatási céllal) elvégeztünk. Az addigi vizsgálatok során is a cső külső, húzott oldalán, a legnagyobb nyomóteák környezetében nyúlásmérő bélyeget helyeztünk el azért, hogy a terhelési folyamat alatt x-y rajzolóval erő-nyúlás diagramot rajzoltathassunk. E próbálkozások utólag a legtöbb esetben értelmetlennek tunk, mert a diagramok csak nyúlfarknyira sikeredtek a beton ismert húzási tulajdonságai miatt. A terhelőberendezés korszerűtlen volta miatt annak alakváltozással való vezérlésére ugyanis nem volt mód. Így amennyiben a szélsőszál feszültség elérte a törési értéket a húzott szál jelentősebb alakváltozás nélkül elszakadt, mivel a törés fenyegető bekövetkeztére figyelmeztető jel hiányában a terhelés folytatódott. Ez a hiány az a.e. módszer alkalmazásával megszűnt, így a terhelési folyamat során kijelzett időegység alatti összegzett eseményszám rohamos növekedése már mutatta a hamarosan bekövetkező törést. Ekkor a terhelési sebesség csökkentésével, sőt esetenként a teher értékének csökkentésével, tehermentesítéssel, majd ismételt felterheléssel sikerül a cső teherbírási tartományának csökkenő részét is megrajzolni, azaz a diagramon láthatóvá vált a beton húzási folyása.



5. ábra. A beton húzási $F(\sigma) - \epsilon$ diagramja.

Visszaterhelés utáni újbóli felterheléskor természetesen már nem lehetett a már korábban alkalmazott legnagyobb teherértéket elérni, sőt a folyáskor fellépett maradó alakváltozás miatt az utolsó terhelési ciklus alatt fellépett nyúlás csak töredéke volt a beton húzási határnyúlásának (5. ábra).

Ily módon még közvetlenül a tényleges törés előtt az az első pillanatban meglepő és paradox helyzet állt elő, hogy a mérnöki szempontból tönkrement (tudniillik a már korábban elértnél csak kisebb terhet hordani képes), valamint alakváltozásra is alig képes cső szemmel láthatólag teljesen ép és akár beépítési célokra is megfelelő.

4.3. Feszített vasúti keresztalj vizsgálata

A vasúti keresztaljak teherbírási minosítése az alj különböző helyzeteiben végzett terheléses vizsgálat alapján kapott statikus repesztő erőkkel történik. Alapvető követelmény azonban az, hogy keresztaljak a vasútüzem sajátosságai miatt fellépő fárasztó hatás mellett is 7 000 000 teherismétlődést repedés fellépte nélkül kibírjanak. Az előzőekből következik, hogy új alj fejlesztésekor a statikus vizsgálat alapján meghatározott repesztő erőknel kisebb erővel célszerű az új tervezésű aljak fárasztó vizsgálatát elvégezni a Wöhler-görbe meghatározásához, mely görbe valójában fárasztó-repesztő erőt jelent az ismétlődési szám függvényében. Ugyanakkor az is ismert, hogy a beton húzószilárdság és a hatásos feszítési feszültség (e két mennyiség alapvetően meghatározza a repesztő erőt adott geometria esetén) szórásának repesztő erőre gyakorolt hatása összevethető a fáradásával. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy majdnem lehetetlen, de legalábbis csak majdnem elviselhetetlenül hosszú idő alatt lehetséges meghatározni adott alj statikus repesztő ereje alapján egy elvileg azonos, de a két első paraméter szórása miatt mégiscsak más, nem ismert statikus repesztő erejű aljak fárasztóterhének olyan értékeit, melyeknek alkalmazása esetén remény van a végül is repedést okozó terhek ismétlődési számának kísérleti meghatározására. Ezen túlmenően alapvető problémaként jelentkezik e tárgykörben a repedés fogalmának megfelelő meghatározása is. Ha a terhelési folyamat során ugyanis azt észleljük, s ezt a vizsgálatok során ténylegesen észleltük, hogy a keresztmetszet a legnagyobb nyomoték környezetében 0,002 mm tágassággal és csak 10 mm magassággal bereped, akkor ez a „klasszikus” értelmezés szerint aligha minosülhet repedésnek. Viszont ha megszakítva a statikus terhelést és e „kvázi repesztő erőnel” akár 10 %-kal kisebb erővel pulzálni kezdjük az aljat, akkor pár tízezer teherismétlődés után a repedés a „szokott módon” felszalad és tízedmilliméter tágasságúra megnyílik. Ez viszont már igenis valóságos repedés és az alj a követelmények szempontjából valóban tönkrementnek tekintendő.

E probléma megoldhatóságát az a.e. módszer alkalmazása jelentette. A megoldás valójában így már viszonylag egyszerű, s menete a következő volt. Első lépcsőben figyeltük, hogy hogyan változik a tehernövelés hatására a felszabadult energia összege. E függvény monoton, nem lineárisan növekvő alakú, amint az a 4. ábrán is látható. A függvény alakját a repedés - az előzőekben említett repedéske - megjelenéséig rögzítettük, majd a további terhelést megszakítottuk. Ezt követően – támaszkodva a repesztő erő számítás és a fáradási határállapot vizsgálatának eredményeire (a két repesztő erő aránya a fontos), a repesztő erő százalékában (75-95 % között) meghatároztuk a pulzátoron beállítandó fárasztó erőt. Az így meghatározott fárasztóerőkkel végeztük el az aljak Wöhler-görbéjének meghatározását. Az előzetesen óvatos (nem pesszimista) becsléssel meghatározott majd egyéves (és munka elején a klasszikus vizsgálat alkalmazásával reménytelenül eredménytelen pár vizsgálat után már éven

túli hosszúságúra jósolt) fűrésztógépi idő az ae. módszer alkalmazásával lecsökkent hat hónapra.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben ismertettük az akusztikus emisszió jelenségét vizsgálatának módszerét és a módszer felhasználásának lehetőségeit. Laboratóriumi kísérletekkel igazoltuk, hogy a Kaiser-hatás ismételt terhelés esetén a betonanyagú szerkezetekben is fellép. Szintén kísérletek segítségével mutattuk meg hogyan lehet repedések keletkezésének előrejelzésére használni. Egy gyakorlati alkalmazás példáján mutattuk meg a módszer használhatóságát és rendkívüli hasznosságát.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dolgozat alapját képező kutatás része az MTA Támogatott Kutatóhelyek Irodája által támogatott Vasbeton Kutatócsoport kutatási programjának. A kísérleti munka anyagi és mérés-technikai feltételeit a támogatás biztosította, amelyért a szerző köszönetét fejezi ki. Ugyancsak köszönetét fejezi ki a szerző Dr. Fáy Péter okleveles villamosmérnöknek a kutatásban kifejtett mérés- és számítástechnikai fáradozásaiért.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Mason, W. P., McSkimin, H. J., Shokly, W.: *Ultrasonic Observations of Twinning in Tin*. Phys. Rev., Vol. 73, No.10. May, 1948.
- [2] Kaiser, J.: *Untersuchungen über das auftreten Geräuschen beim Zugversuch*. Ph.D. thesis, Technische Hochschule, München 1950.
- [3] Yamaguchi, K., Kimpala, I., Higo, Y. szerkesztésében: *Progress in Acoustic Emission IV*. Proceedings of The 9th International Acoustic Emission Symposium Kobe 1988
- [4] Dr. Pellionisz Péter szerk.: *Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálók* GTE Budapest 1992.