

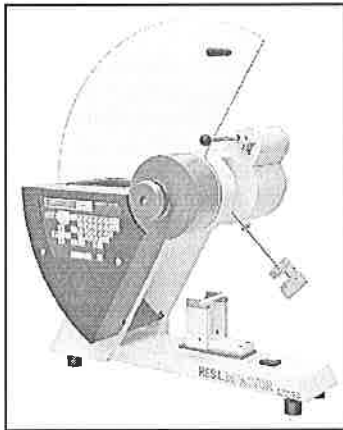
# Műanyagok dinamikus törésmechanikai vizsgálata

Francesco Baldi\*

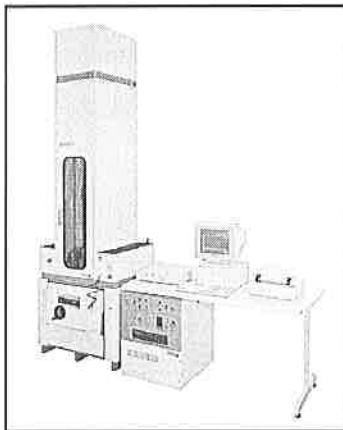
## Bevezetés

A műanyagok valamely nagy terhelési sebességhez tartozó jellegzője különböző vizsgálattal írható le. Ezeket a módszerek azért fejlesztették ki, hogy a tervezéshez megfelelő adatokat kapjanak. Szerepük a folyamatok tanulmányozásában igen jelentős és a kvalitatív elemzéstől a legkorszerűbb törésmechanikai vizsgálatokig terjed.

Az ingás ütőmű bizonyára a világon a legelterjedtebb eszköz az ütővizsgálatokhoz. A Ceast ingás ütőművekkel (1. ábra) Charpy- és Izod-féle ütve hajlító és ütve szakító vizsgálatok is végezhetőek műszerezetten vagy a nélkül széles hőmérséklet-tartományban.



1. ábra. A Ceast Resil Impactor ingás ütőmű



2. ábra. A Ceast Fractovis ejtősúlyos ütőmű

Felfogásunk szerint az ütőgép energiasebessége mindenkor elegendő kell legyen a próbatest (az alkatrész) töréséhez. Ezért az ingás ütőműveknél nagyobb sebességű műszerezett ütővizsgálatokra is szükség van, melyekhez ejtősúlyos berendezéseket kell használnunk, például a késztermékek vizsgálatához. A Ceast ejtősúlyos berendezésekkel (2. ábra) – amely műszerezetten, kéttengelyű ütő-igénybevételre is alkalmas – az ingás ütőművön elvégezhetőekkel azonos vizsgálatok is elvégezhetőek.

A tervezéshez szükséges adatokat szolgáltató vizsgálatok közül azok a legjelentősebbek, amelyek kisméretű próbatestek laboratóriumi vizsgálatával a végfelhasználási állapotra engednek következtetni. Ugyanis számos szerkezeti elem van üzemszerűen ütésnek kitéve. Műanyagból készítik például az autók lökhárítóját, keréktárcsa-védőjét, hátsó ajtaját. Az ilyen alkatrészek tervezésekor, mivel az alakja már meghatározott (pl. a formatervező által), a kérdés az: milyen anyagot válasszunk, amely az ütésnek a legjobban ellenáll? Műanyagok impulzív terhelésviselő képessége is függ – a vizsgálati módszereken kívül – az igénybevétel hőmérsékletétől, sebességétől és a feszültségi állapottól, azaz a próbatest vagy az alkatrész alakjától, méreteitől és az ún. bemetszésektől. És mivel a próbatest (alkatrész) rugalmassága nem az anyag belső tulajdonsága, ezért a vizsgálati adatok összehasonlíthatósága miatt az ütővizsgálatokat szabványok (pl.: ISO 179, ISO 180) szerint kell elvégezni.

Számos minőségi eljárás szolgáltat a tervezéshez információkat az ütővizsgálattal nyert adatok feldolgozásával [1]. Ezek egyike azon a tényen alapul, hogy a műszerezett ütési technológia alkalmas módszer az ütésre adott válasz kiértékelésére. Ezen eljárás szerint a próbatesteken kiértékelt ütési adatok egy K állandó arányossági tényezővel az alkat-

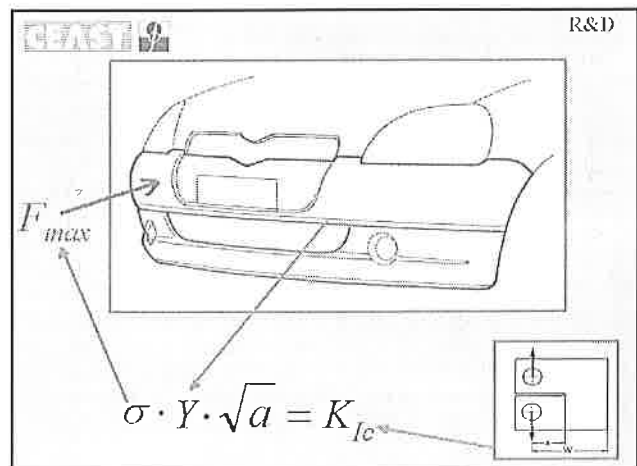
részre is átvihető. A K tényezőt pedig összehasonlító ütővizsgálattal határozzák meg, felhasználva az a tanulmányozandó anyagból készített próbatesteken és alkatrészen elvégzett törésvizsgálattal kapott eredményeket. A K tényező ismeretében a továbbiakban az alkatrész végfelhasználási állapotára a próbatestes vizsgálat alapján tervezési becslést végezhető.

Az említett eljárás nagyon érdekes, de gyakorlatilag a valós alkatrész vizsgálatán alapszik. Helyette, a lineárisan rugalmas törésmechanika legkorszerűbb módszerén alapuló eljárással [4], meghatározhatjuk az anyag törési szívósságát – mint az anyag belső tulajdonságát – jellemző két mennyiséget: a  $K_{IC}$  kritikus feszültségintenzitási tényező értékét és a  $G_{IC}$  fajlagos energia-felszabadulás kritikus értékét. Ez a két mennyiség a leghasználhatóbb adat az alkatrész tervezéséhez.

Az alkalmazott eljárást, amellyel meglehetősen nagy terhelési sebességgel határozzuk meg az anyagok törési szívósságát, a szerkezetek épségével foglalkozó európai társaság, az ESIS (European Structural Integrity Society) TC4 műszaki bizottsága (Technical Committee 4: Polymers, Adhesives and Composites – műanyagok, ragasztók, társított anyagok) fejlesztette ki [2, 3]. Ez az eljárás, 1 m/s ütési sebességgel, ISO szabvánnyá válik.

A WLEFMHR szoftvert a Ceast abból a célból fejlesztette ki, hogy a műszerezett ütővizsgálat eredményei tovább elemezhetőek legyenek, és az elvégzett mérések minősége sokkal jobb legyen. Ez a szoftver a kutatási-fejlesztési ipari osztályok és intézetek számára fontos eszköz a korszerű elemzéshez. A Ceast, amely aktív tagja az ESIS CT4 bizottságának, használta ezt az eljárást műanyagok törési szívósságának meghatározásához tanácsadói minőségében a jellemző alkalmazások kifejlesztése érdekében.

A 3. ábra vázlatosan szemlélteti a  $K_{IC}$  használatát: az ESIS vizsgálati eljárásával meghatározható – laboratóriumi segítséggel – a  $K_{IC}$  (vagy a  $G_{IC}$ ), majd ismerve az alkatrész alakját (geometriáját), feszültségállapotát (az ütőterhelés jellemző támadáspontját) és az alkatrész támaszait, meghatározható (végeeselemes módszerrel) az  $F_{max}$  erő. A  $K_{IC}$  ismeretén alapuló elemzés tekinthető manapság a legkorszerűbbnek, amellyel a műanyag alkatrészek végfelhasználási törési tulajdonságai becsülhetőek.



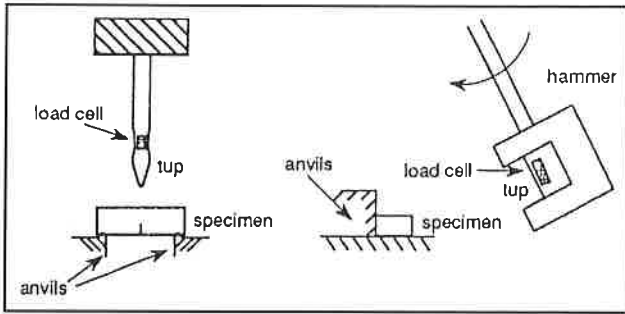
3. ábra. A  $K_{IC}$  alkalmazása a tervezéshez

## Vizsgálóberendezés

A műanyagok törési szívósságának meghatározása érdekében különféle vizsgálatokat kell elvégezni az ESIS-eljárás szerint.

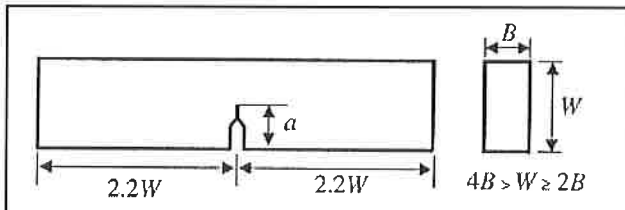
A vizsgálóberendezés ütőgép, mégpedig vagy ingás ütőmű (pl. Ceast Resil Impactor), vagy ejtődárdás ütőmű (pl. Ceast Fractovis).

\* Ceast SpA, Via Airauda 12, 10044 Pianezza (To), Olaszország



4. ábra. Az ütőgépek felszereltsége [5]

Mindkét berendezéssel elvégezhető az ütővizsgálat 1 m/s sebességgel az ESIS-eljárás igényei szerint, de ehhez speciális satut kell felszerelni. A szükséges vizsgálati elrendezés (4. ábra) hasonló a Charpy-féle ütővizsgálathoz. A vizsgálandó próbatestet (5. ábra) hárompontos hajlítópólya (SENB). A használandó vizsgálati eljárás szerint nem lehet eleve meghatározni a próbatest jellemző méreteit; ezek magától az anyagtól függenek, és ezeket az eljárás folyamán oly módon kell módosítani, hogy a következőkben részletezett feltételek teljesüljenek. Ez az oka annak, hogy a vizsgálógépet fel kell szerelni a különböző méretű próbatestek befogására alkalmas satuval.



5. ábra. A használandó SENB próbatest [2]

A törélelemzéshez a próbatesteket be kell metszeni, mégpedig – a szokásos Charpy-vizsgálattól eltérően – nagyon éles, repedésszerű be-metszés szükséges.

A vizsgálóberendezést műszerezett ütőfejjel kell felszerelni. Az ütőfejbe beépített mérőeszköz nyúlásmérő bélyeges vagy piezoelektromos rendszerű, amely a működő erőt folyamatosan méri, ezért mérésadatgyűjtőre is szükség van. Erre a célra fejlesztette ki a Ceast a DAS 8000 típusjelű mérésadatgyűjtő-rendszert (6. ábra), amely az ütési eseményre vonatkozó nyolc jelet 1 MHz frekvenciával szimultán gyűjti. A

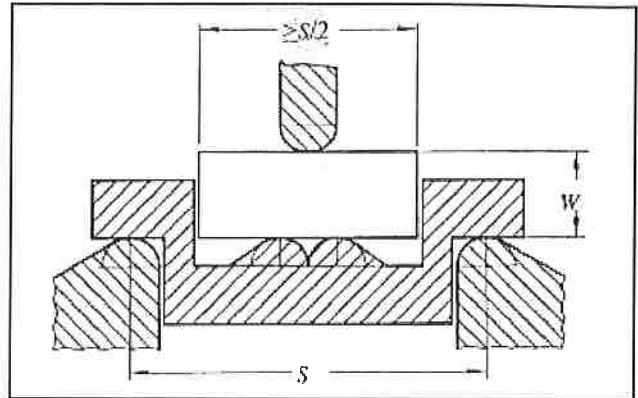


6. ábra. A Ceast DAS 8000 adatgyűjtő rendszere

DAS 8000 rendszert a D8EXTWIN szoftver vezérli, valamint kezeli és elemzi a begyűjtött adatokat, és megjeleníti az  $F = F(t)$  erő-idő görbét. Felhasználva a műszerezett ütés elméleti összefüggéseit [6], számítható az ütési folyamatot jellemző függvények: az ütőtest  $v = v(t)$  sebessége,  $d = d(t)$  elmozdulása, valamint az  $E = E(t)$  elnyelt energia. Ez a szoftver – amely Windows környezetben dolgozik – szolgáltatja az elvégzett vizsgálat eredményeit, de a további vizsgálatokhoz adattárolóként is használható.

Az ESIS-eljárás szerint az anyagra jellemző  $G_C$  vizsgálat közbeni méréséhez egy bemetszeten próbatesten is műszerezett ütővizsgálatot kell végezni, azonos sebességgel, a 7. ábra szerinti elrendezésben. Ennek, az ESIS által energiakorrekciósnek nevezett vizsgálatnak az eredményét ( $U_{COR}$ ) a törési energia kiszámításánál veszik figyelembe.

A pontos értékeléshez az is szükséges, hogy az  $F = F(t)$  görbe ingadozásait korlátozzuk. Az ESIS-eljárás feltételezi a mechanikai csillapítás, a próbatest és az ütőtest közé helyezett, ún. lágy párna alkalmazását, amely lehet vékony kenőcs- vagy nagy viszkozitású zsírréteg.

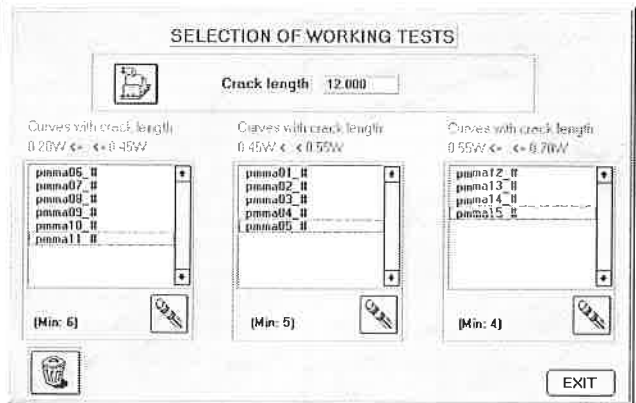


7. ábra. Az energiakorrekciós vizsgálat elrendezése – SENB alakzat [3]

## A WLEFMHR szoftver

Ezt a szoftvert – amely Windows környezetben dolgozik – a Ceast fejlesztette ki az ESIS-eljáráshoz, mégpedig a  $K_{IC}$  kritikus feszültségintenzitási tényező és a  $G_{IC}$  kritikus fajlagos energia-felszabadulás anyagjellemzők meghatározása céljából. A szoftver bemenete az elemzendő anyagra jellemző módon elvégzett műszerezett törésvizsgálat (a következőkben részletezett) sorozat adatai. A kezelő által irányított program kidolgozza az eredményt, és szolgáltatja az anyag törési szívósságára jellemző  $K_{IC}$  és  $G_{IC}$  értékeket.

A szoftver kezeli a paraméter-készletet (a próbatestek méretei, az ütés kezdeti sebessége) és a műszerezett ütővizsgálat közben mért, a D8EXTWIN adattárolós szoftverből nyert adatokat. A WLEFMHR szoftverrel végrehajtott vizsgálatok adatait – az egyszer beadott program szerint – a szoftver értékeli, majd három különböző csoportba osztja az  $a/W$  viszony szerint, ahol  $a$  a próbatest névleges repedéshossza (8. ábra).



8. ábra. A WLEFMHR-be elemzésre bevitt vizsgálati adatok

## A $K_{IC}$ kiértékelése

Az ESIS-eljárás alkalmazása legalább öt ismétlést igényel. Ezeket a vizsgálatokat olyan próbatesteken kell elvégezni, amelyekre fennáll:  $0,45 \leq a/W \leq 0,55$ .

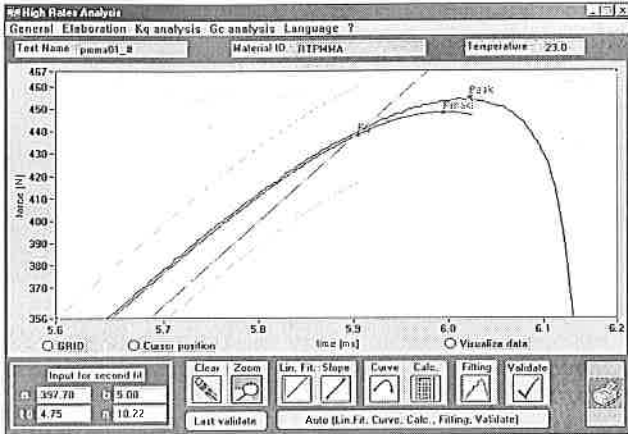
Ezeket a vizsgálatokat egyszer beadva a WLEFMHR szoftver minden egyes vizsgálatból meghatározza az egyezményes törési szívósság  $K_{IC}$  értéket, amelyeket majd felhasznál a  $K_{IC}$  meghatározásához.

Az ESIS-eljárás szerint a  $K_{IC}$  meghatározásának első lépése a függvényillesztés a műszerezett vizsgálat felvett  $F = F(t)$  görbére. Az illesztési függvény:

$$P(t) = a \cdot (t - t_0) - b \cdot (t - t_0)^n \quad (1)$$

ahol  $a$ ,  $b$ ,  $t_0$  és  $n$  (pozitív) illesztési paraméterek.

A 9. ábra mutatja a valós  $F = F(t)$  görbét és a WLEFMHR szoftverrel ráillesztett  $P = P(t)$  függvényt. A görbeillesztés céljából a kezelő az  $F = F(t)$  görbén azonosítja a bekezdő egyenes szakaszt (az ún. Hooke-egyenest – a szerkesztő) és kijelöli annak végpontját az elsődleges



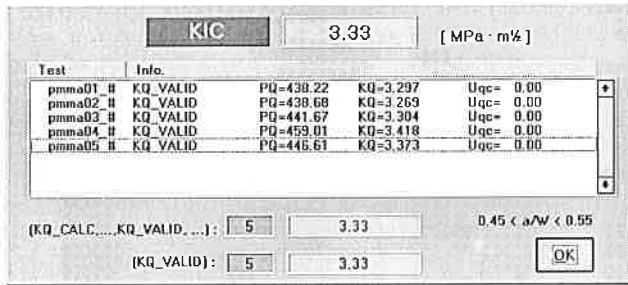
9. ábra. A mért  $F = F(t)$  és az illesztett  $P = P(t)$  görbék a WLEFMHR-ben

illesztés elvégzéséhez. A szoftver kiszámolja a mért értékekre legjobban illeszkedő függvény paramétereit. Az operátor ezeket a paramétereket megváltoztathatja.

A valós görbére illesztett virtuális  $P = P(t)$  függvény csökkenve eltér. A következő lépés a törés kezdetéhez tartozó  $P_0$  pont kijelölése úgy (a Hook-egyenesnél 5%-kal nagyobb meredekségű egyenessel – a szerkesztő), hogy a hozzárendelhető  $P(t)$  érték ne térjen el jelentősen a valós  $F(t)$  értékétől.

A  $P_0$  pont szolgál a  $K_{IC}$  érték meghatározásához, amelyet mint ideiglenes értéket még ellenőrizni kell linearitásra és a méret-követelményekre az ESIS-eljárás szerint. A linearitás azért kell ellenőrizni, hogy igazoljuk: a görbe menete megfelel „az instabilitást megelőzően megindult stabil repedésnövekedésnek”. A méretet pedig azért kell ellenőrizni, hogy igazoljuk: a vizsgált próbatest  $B$  vastagsága elegendő-e a síkbeli alakváltozás állapot kialakulásához, és a  $(W - a)$  érték pedig a túlzó képlékenység elkerüléséhez. Bemenő adatként ellenőrizni kell – az eltört próbatesten mérve – a repedés hosszának valós értékét is. Továbbá, meg kell állapítani egytengelyű húzással az anyag folyáshatárát, mégpedig megfelelő vizsgálattal úgy, hogy a folyás kezdetéig eltelt idő  $\pm 20\%$ -kal térhet el a törés kezdetéig (a  $P_0$  pont eléréséig) eltelt időtől.

Ha a szükséges feltételek meglétét igazoltuk, akkor a  $K_{IC}$  értékeket a szoftver  $K_{IC}$  értékeként kezeli és kiszámítja (legalább öt vizsgálat alapján) azok számtani középértékét (10. ábra).



10. ábra. A  $K_{IC}$  kiértékelés a WLEFMHR-ben

### A $G_{IC}$ kiértékelése

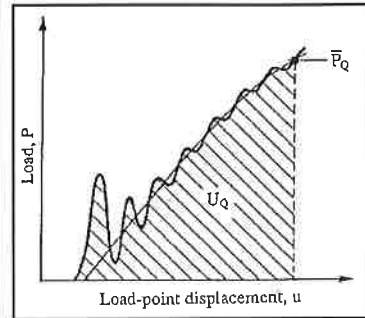
A kiértékeléshez legalább tizenöt érvényes meghatározást kell elvégezni. Ehhez olyan próbatesteket kell megvizsgálni, amelyeknél az eredeti repedés hossza a  $0,20 \leq a/W \leq 0,70$  tartományon belül változik. Ez magába foglalhatja a  $K_{IC}$  kiértékeléshez felhasznált öt próbatestet is. Azt ajánlják, hogy a maradék tíz próbatest közül hatnál az eredeti repedés hossza a  $0,20 \leq a/W \leq 0,45$  értékhatárok között, négyenél pedig  $0,55 \leq a/W \leq 0,70$  között legyen.

Az ESIS-eljárás szerint a  $G_{IC}$  közvetlenül meghatározható a valódi  $U$  törési energiából, amely a terhelés-elmozdulás görbe  $P_0$  pontjáig integrálással meghatározott  $U_0$  energia az ún. parazita energiával korrigált értéke. A fajlagos energia-felszabadulás kritikus értéke:

$$G_{IC} = \frac{U}{B \cdot W \cdot \Phi} \quad (2)$$

ahol  $B$  és  $W$  a próbatest 5. ábra szerinti mérete, és  $\Phi$  az energiatényező [4], amely az  $a/W$  viszony függvénye.

A parazita energia, amelyre utaltunk, két csoportra osztható, és számításba vételük módja különböző.

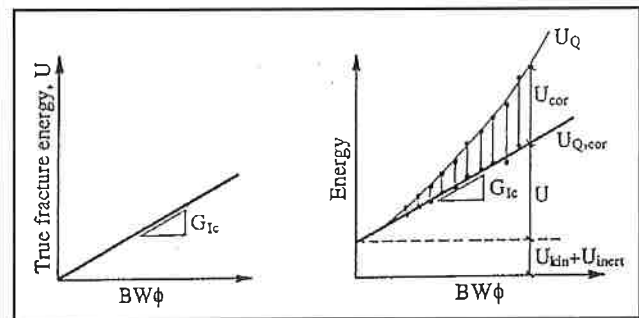


11. ábra. Az  $U_0$  energia meghatározás az  $F = F(t)$  görbéből [3]

meghatározott érték a hamis  $U_{cor}$  energia. Ennek ismeretében minden egyes próbatestre meghatározható a korrigált  $U_{Q,cor}$  érték a (3) egyenlettel:

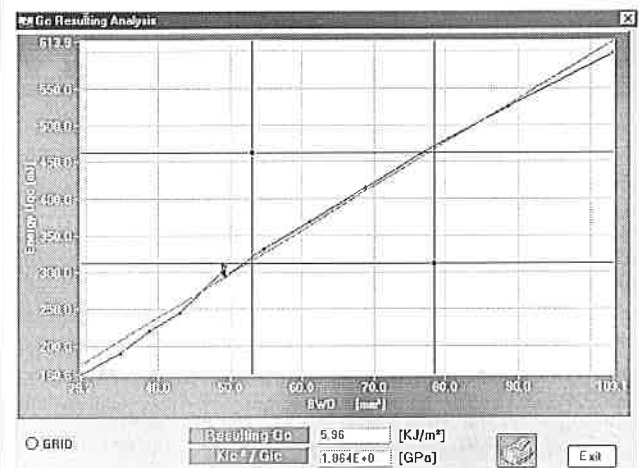
$$U_{Q,cor} = U_Q - U_{cor} \quad (3)$$

A hamis energiák második csoportja, amelyet számításba kell venni, a mozgó próbatest és a gyorsuló próbatest keltette inercia erők kinetikai energiáinak az összege. Ez az energiatöbblet – a vizsgálat-sorozaton belül – állandó, független az egyes próbatestektől és az  $a/W$  aránytól. Az eljárás szerint, a  $G_{IC}$  kiértékelése (a 2. egyenlet szerint) az  $U_{Q,cor} - (BW\Phi)$  egyenes meredeksége (lásd a 12. ábrát).



12. ábra. A  $G_{IC}$  meghatározása az ESIS-eljárás szerint [3]

A WLEFMHR szoftver elvégzi ezt az összetett elemzést, és a  $G_{IC}$  meghatározása céljából előállítja az  $U_{Q,cor} - (BW\Phi)$  egyenest (13. ábra).



13. ábra. A  $G_{IC}$  meghatározása a WLEFMHR szoftverrel

## Következtetések, megjegyzések

G. Charpy 1901-ben publikálta [7] első előadását az anyagok ütővizsgálatáról. Az eltelt száz évben számos kutatási eredmény és tanulmány látott napvilágot a különböző anyagokra. Mint a bevezetőben hangsúlyoztuk, a műanyagok ütővizsgálatával nyert eredményeket számos tényező jelentősen befolyásolja. E tényezők között a vizsgált test geometriájától függő rugalmassága a legfőbb kényszere az ütővizsgálati eredmények tervezési célú felhasználásának. A valós szerkezeti elem különleges külső igénybevétel hatása közbeni viselkedésének tanulmányozásához a mérnököknek az anyag belső, az elem alakjától független, tulajdonságainak (pl. a rugalmassági modulus) ismeretére van szükségük. Az anyag – vonatkozó szabványok szerint meghatározott – rugalmassága nem belső tulajdonsága magának az anyagnak. Hosszú idő óta használják már és nagyon fontos az anyag jellemzésére az ütőszerű terhelés, mivel ez az egyetlen olyan adat a műanyag „azonosító kártyáján”, amely pótolhatatlan az anyagok kiválasztásához és összehasonlításához. Az ütés elemzésén alapuló törésmechanika, amely a WLEFMHR szoftvernek is az alapja, mérnöki eszközt kíván adni a valós szerkezeti elem viselkedésének a megértéséhez. A  $K_{IC}$  vagy a  $G_{IC}$  ismerete a jellemző hőmérsékleten kitölti a rést az anyag rugalmassága és a tervezési adatigény között.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Prof. A. Pavon úrnak (Politecnico di Milano – Milánó – Olaszország) a WLEFMHR szoftver kifejlesztéséhez nyújtott segítségével. Megkülönböztetett tisztelet illeti Dott. M. Grosso urat (ügyvezető igazgató – Ceast SpA, Pianezza (To), Olaszország), hogy bízott az ütés legkorszerűbb fejlesztésében és folyamatosan támogatta

a WLEFMHR szoftver ipari kifejlesztése (ellenőrzés, piacositás) során a Ceast K+F tevékenységét.

## Irodalom

- [1] P. E. Reed: Impact testing of plastics for design. Department of Materials, Queen Mary College, London
- [2] J. G. Williams: KIC and GC at slow speeds for polymers; in Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers and Composites, edited by D. R. Moor, A. Pavan, J. G. Williams, published by Elsevier, Oxford (2001), pp. 11–26.
- [3] A. Pavan: Determination of fracture toughness (KIC and GIC) at moderately high loading rates; in Fracture Mechanic Testing Methods for Polymers and Composites, edited by D. R. Moor, A. Pavan, J. G. Williams, published by Elsevier, Oxford (2001), pp. 27–58.
- [4] J. G. Williams: Fracture Mechanics of Polymers, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1984
- [5] A. Pavan, S. Draghi: Further experimental analysis of the dynamic effects occurring in three-point bending fracture testing at moderately high loading rates (1 m/s) and their simulation using an ad hoc mass-spring-dashpot model; in Fracture of Polymers, Composites and Adhesives, edited by J. G. Williams, A. Pavon published by Elsevier, Oxford (2000), pp. 347–361
- [6] ISO 179-2:1997, Plastics – Determination of Charpy impact properties – part 2: Instrumented impact test
- [7] G. Charpy: Essay on Metals Impact Bend Test of Notched Bars (reprint from 1901), Pendulum Impact Testing: A Century of Progress, ASTM STP 1830, T. A. Siewert and M. P. Manahan, Sr., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (2000), pp. 46–69.

Lektorálta és fordította: Lehofer Kornél

# Növelt szilárdságú hegesztett acél repedésterjedési tulajdonságainak vizsgálata

Csapó Péter\*

*Hegesztett szerkezeteink, azaz a varratok és azok közvetlen környezete tartalmaz bizonyos mennyiségű belső anyagfolytonossági hiányt, mely a törés veszélyét fokozza. Az egyszerűbb törésmechanikai elméletekkel az egytengelyű statikus és fáradásos igénybevételek okozta tönkremeneteleket viszonylag jól tudjuk kezelni. A gondot az okozza, hogy a hibák orientációja véletlenszerű, a terhelés pedig összetett. Ezt a gondolatot folytatva végeztem négyponos, aszimmetrikusan terhelt hegesztett próbatesteken repedésterjedési vizsgálatokat.*

## Bevezetés

Szerkezeteink törési okai még mindig 70–80%-ban kifáradásra vezethetők vissza, annak ellenére, hogy régóta kiemelten vizsgáljuk a jelenséget. Az anyag viselkedését eleinte ismétlődő igénybevétel hatására a Wöhler-görbe alapján meghatározható tartamzilárdsággal és kifáradási határral jellemeztük, majd vizsgáltuk a próbatest feszültségi állapotának (feszültséggyűjtő hely) és a feszültség időbeli lefolyásának ( $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) hatását. Számos – időben elhúzódó – méréssel meghatározhatjuk azon biztonsági diagramokat, melyekről elmondható az, hogy ha a szerkezet méretezésénél kiszámított statikus feszültség és a rászuperponált váltakozó feszültség által meghatározott pont a biztonsági terület belsejébe esik, akkor a két feszültség eredője törést még nem okozhat. Hegesztett szerkezeteink, azaz a varratok és azok közvetlen környezete tartalmaz bizonyos mennyiségű belső anyagfolytonossági hiányt, mely a törés veszélyét fokozza. A törésmechanika klasszikus esetben abból indul ki, hogy a repedés vagy az azt valamilyen formában kiváltó ok (diszlokációtörődés, rideg fázis stb.) már eleve megtalálható

az anyagban vagy pedig a gyártás (hegesztés, hőkezelés stb.) illetve az üzemelés alatt keletkezik.

A hegesztett kötésben lévő hibák veszélyességét leegyszerűsítve a lekerekítési sugaruk alapján értékeljük, tehát legveszélyesebbnek a két-méretű, síkszerű hibák, azaz a repedések tekinthetők. Egy adott szerkezet esetén fontos a hibák méretváltozásának (pl. fáradásos repedésterjedés révén) figyelemmel kísérése, a repedésterjedési folyamat megismerése, illetve a repedésterjedési sebesség meghatározása mind az anyagban, mind pedig a hegesztett kötésben. Ezt az is indokolja, hogy a repedések elsősorban a varratban, illetve annak környezetében jelentkeznek. A repedések terjedése a ridegtörés kockázatának jelentős növekedését eredményezi, s így a hegesztett szerkezet statikus és kifáradási tulajdonságait is drasztikusan csökkenti.

A klasszikusnak számító egytengelyű statikus – mint például a „tiszta” húzás, nyomás, hajlítás, csavarás – és fáradásos igénybevételeket, az „egyszerűbb” törésmechanikai elméletekkel viszonylag jól tudjuk kezelni, azaz a méretezéseknél, illetve az élettartambecsléseknél az ilyen igénybevételek nem jelenthetnek problémát [1]. A gondot az okozza, hogy ezen egyszerűbb elméletek egy adott egytengelyű igénybevételi típus mellett rendszerint homogén, izotróp anyagot tételeznek fel, illetve speciális helyzetű repedésekkel, eltérésekkel foglalkoznak, holott a hegesztett kötésekben, illetve azok közvetlen környezetében létrejövő hibák orientációja véletlenszerű, a terhelés pedig többtengelyű, összetett.

A terhelés irányával tetszőleges nagyságú  $\Theta$  szöget bezáró repedés esetére statikus és ciklikus igénybevételekre G. C. Sih bevezette az alakváltozási energiasűrűséget, mely a különböző  $a_j$  együtthatókkal, illetve a  $K_j$  feszültségintenzitási tényezőkkel az alábbi módon írható le:

$$S = a_{11} \cdot K_1^2 + 2a_{12} \cdot K_1 \cdot K_{11} + a_{22} \cdot K_{11}^2 + a_{33} \cdot K_{111}^2$$

Az alakváltozási energiasűrűség tényező (S) a törési szívóssággal

\*hegesztési főmérnök, AGMI Anyagvizsgáló és Minőségellenőrző Rt., H 1211 Budapest, Gyepsor u. 1., H-1751 Budapest Pf.:114, 277-49-01, agmimtech@axelero.hu