

Az „Essential Work of Fracture” (effektív törésmunka) módszer alkalmazása műanyagok törési jellemzőinek meghatározására

Major Zoltán*

Bevezetés

A műanyagok szívósságának, törési jellemzőinek meghatározására mind gyakrabban alkalmazzák a különböző törésmechanikai módszereket. A viszonylag egyszerű lineárisan rugalmas törésmechanika (LRTM) alkalmazhatósága a műanyagok nemlineáris viselkedése, a mechanikai tulajdonságok idő- és hőmérsékletfüggése következtében meglehetősen korlátozott. A rugalmas-képlékeny törésmechanikai (RKTm) mérőszámok pl. J-integrál alkalmasabbak a műanyagok törésmechanikai jellemzésére. Ezen vizsgálatok elvégzése azonban meglehetősen bonyolult, fejlett vizsgálattechnikai háttérrel és gyakorlott személyzetet igényel. Például a stabil repedéskeletkezést jellemző kritikus érték a J_{Ic} pontos meghatározása is meglehetősen nehézkes, mivel a műanyagoknál a repedéscsúcs letompulása többféle módon végbemehet (mint minden tulajdonság ez is idő- és hőmérsékletfüggő). A fémek anyagoknál elterjedten alkalmazott tompulási egyenes (blunting line) nem, vagy csak igen durva közelítéssel használható. A gyakran javasolt 0,2 mm-es stabil repedésterjedéshez tartozó érték a $J_{0,2}$ -es valódi repedéscsúcs-tompulás figyelembevétele nélkül nem minden esetben jellemzi az anyag valódi ellenállását. A tompulási egyenes különböző módszerekkel történő becslése a J_{Ic} meghatározásánál akár 200%-os eltérést is eredményezhet, ami a gyakorlatban nem elfogadható érték. A poliolefinok esetében különösen nehézkes és szubjektív a kritikus J-integrál meghatározása. A kutatók ezért kerestek olyan módszert, amivel a fent említett nehézségek kiküszöbölhetők.

Az „essential work of fracture” (effektív törésmunka, továbbiakban EWF) koncepcióját először Broberg [1] javasolta. A gyakorlati alkalmazáshoz Mai és Cotterell [2] fejlesztett ki egy elegáns módszert. Karger-Kocsis [3], aki egyik úttörője az EWF-módszer gyakorlati alkalmazásának a műanyagok területén magyar munkatársaival többek között β és α módosított polipropilén [4], amorf kopoliészter és más műanyagok törési tulajdonságait hasonlította össze e módszerrel [5]. A vizsgálati eredményekből levont következtetések jól használhatók, mind az adott anyag deformációs mechanizmusainak megértéséhez, mind pedig különböző, gyakran igen szívós anyagok összehasonlításához. További jelentős alkalmazási terület a műanyag fóliák vizsgálata. Ezen a területen a már említett szerzők mellett Hashemi [6] munkái tarthatnak számot szélesebb érdeklődésre. A műanyag fóliák készítésével, feldolgozásával foglalkozó szakemberek számára igen érdekes mérési eredmények, összehasonlító adatok találhatóak az előbbi szerző munkáiban. Bár a módszer elsősorban a sík feszültségi állapotban levő próbatestek vizsgálatára alkalmas, az utóbbi években több kutató is megpróbálta a módszert sík alakváltozási állapotban is használni, valamint a szívós/rideg átmenetet e módszerrel jellemezni. Az ESIS TC4 Polymers and Composites munkabizottságának munkaprogramjában is szerepel a módszer mérés technikájának, alkalmazhatóságának kidolgozása, az ISO szabványok közé történő felvételének előkészítése [7].

Az EWF-módszer elvi alapjai

A teljes törési munka két részre osztható fel. Az első rész, ami a repedés terjedéséhez szükséges, ezt nevezzük az effektív résznek (essential work, w_e), és a másik rész, ami arányos a repedés körül

kialakult képlékeny zónában elnyelt energiával, ez a látszólagos törésmunka (non-essential work w_p).

$$W_f = w_e + w_p \quad (1)$$

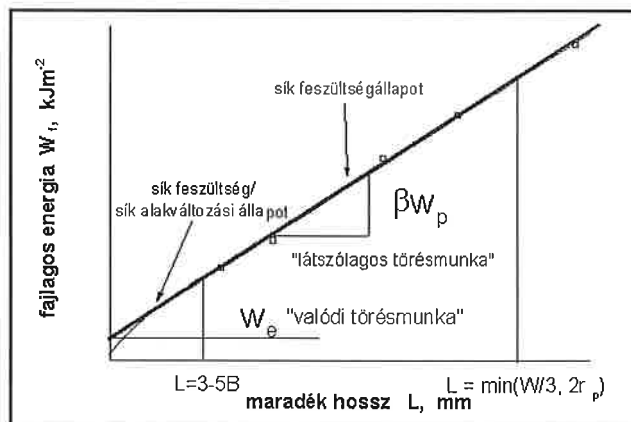
Ha a terhelés és repedéskeletkezés során a próbatest maradék keresztmetszete teljesen megfolyik, akkor a w_e arányos a maradék rész hosszával (l), a w_p pedig, miután egy térfogatban lezajló folyamatot jelöl, ennek négyzetével. Ha mindkét részt fajlagos alakban írjuk fel, akkor a következő összefüggést kapjuk.

$$W_f = w_e l B + \beta w_p l^2 B \quad (2)$$

A vizsgálat elvi vázlata látható az 1. ábrán. Mint minden törésmechanikai mérőszám a w_e is érvényességi korlátokhoz kötött mennyiség. A próbatest maradék szakaszának hosszára teljesülni kell az alábbi feltételeknek:

$$(3-5)B < l > \min(W/3, 3r_p) \quad (3)$$

ahol r_p a képlékeny zóna mérete az LRTM-ben használatos képlet, vagy a Dugdale-modell szerint. Az első feltétel szerint a maradék hosszának nagyobbak kell lenni, mint a próbatest B vastagságának 3-5-szöröse azért, hogy elkerüljük a sík alakváltozási állapot kialakulását. Ezt kíséreltetileg a különböző anyagok esetén úgy határozhatjuk meg, hogy egy diagramban ábrázoljuk a folyáshatárt majd ennek 1,15-szorosát, amely értéket Hill [8] határozott meg kettős bemetszésű próbatestek esetére. A különböző hosszúságú bemetszések esetén meghatározott maximális feszültségértékek egy adott repedéshossz elérése esetén meghaladják az adott folyáshatár értéket. Ez a pont tekinthető az alsó határértéknek. Meg kell azonban jegyezni, hogy a különböző hosszúságú bemetszések miatt különböző törési idők adódnak. Mivel a műanyagok folyáshatára időfüggő, így a fent említett értékek sem állandóak, hanem a maradék hossz függvényében változnak.



1. ábra. Az „essential work of fracture” vizsgálati módszer elvi vázlata

A második feltétel szerint az l maradék hosszának, nagyobbak kell lenni, mint a képlékeny zóna méretének a kétszerese, hiszen az a legfontosabb feltétel, hogy a maradék keresztmetszet teljes megfolyása előzze meg a repedés keletkezését. A képlékeny zóna méretét itt is hőmérséklet- és időfüggő értékekkel kell meghatározni. A harmadik feltétel szerint a próbatest szélessége legyen nagyobb, mint a maradék hossz háromszorosa azért, hogy elkerüljük a képlékenyen alakváltozott tartomány kiterjedését a próbatest peremére.

* Joanneum Research, Institut für Kunststofftechnik, Leoben, A-8700

További hasznos információk is nyerhetők a vizsgalatokból. A már említett Hill vizsgálatai szerint a maximális erő a maradék hossz, l függvényében a következőképpen változik:

$$\frac{P_{max}}{B} = mL\sigma_{ys} \quad (4)$$

ahol m a képlékeny alakváltozás korlátozási tényező, aminek szokásos értéke síkfeszültségi állapot esetén 1. Ez tulajdonképpen az előzőekben már említett első kritérium más alakban történő felírása. Műanyagoknál a vizsgálati hőmérséklet és sebesség változásával az m értéke is változik. Meghatározható a vizsgálatokból a repedéskinyílás, D_c átlagos értéke is. Ez nem azonos a CTOD értékkel, de további információkat szolgáltat az anyag alakváltozási tulajdonságairól.

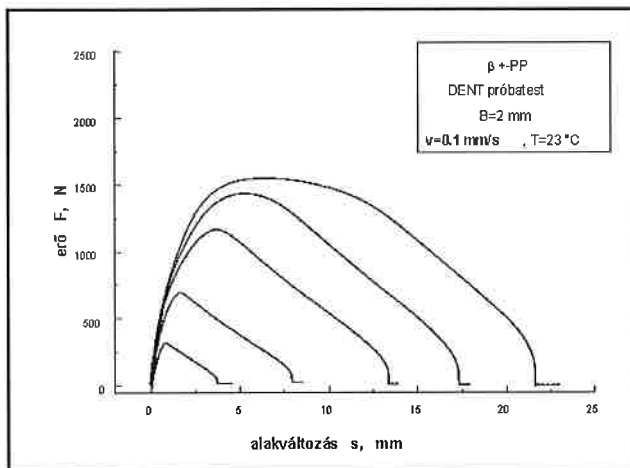
$$d_{final} = \Delta_c + \Theta L \quad (5)$$

ahol d_{final} a maximális deformáció, a Θ pedig a törési zóna repedéskinyílásának a szögével arányos.

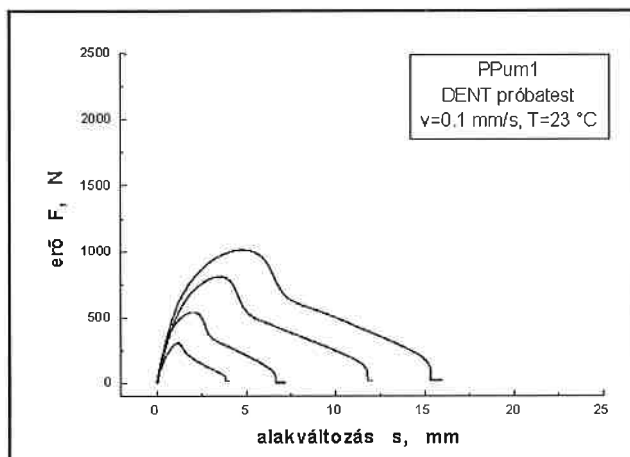
Kísérletek

Anyagok

A vizsgálatokhoz különböző polipropilén anyagokat (továbbiakban a jelölés β +PP és PPum1) használtam fel. A 2. és 3. ábrán két különböző anyag DENT próbatetekkel felvett erő-elmozdulás diagramjai láthatók 1 mm/s vizsgálati sebességnél, szobahőmérsékleten (23 °C).



2. ábra. A β +PP erő-elmozdulás diagramja



3. ábra. A PPum1 erő-elmozdulás diagramja

Kísérletechnika

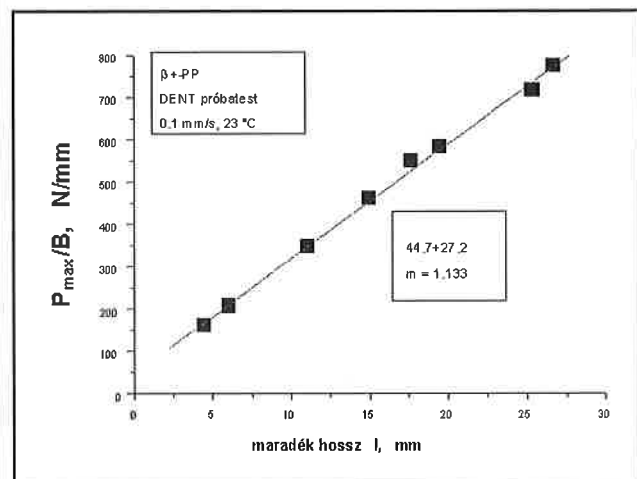
Az EWF mérés technikája igen egyszerű. Különböző hosszúságú bemetszésekkel ellátott egy (SENT), vagy két oldalon bemetszett

(DENT) szakítópróbatetekkel felvesszük az erő-elmozdulás diagramokat. Az elmozdulásméréshez használható a keresztfej, vagy a dugattyú elmozdulás jele is, de a próbatesthez rögzített extenzométer még pontosabb jelet szolgáltat. Természetesen ebben az esetben a nyúlásmérő méréshatárának nagyobbak kell lenni, mint a maximális elmozdulás, kb. 30-35 mm. A bemetszéshosszak a már említett kritériumok figyelembevételével határozhatók meg. Célszerű legalább 6-8 különböző hosszúságú bemetszést tartalmazó próbatestet vizsgálni.

A különböző hosszúságú bemetszéssel ellátott próbatetek diagramjaiból meghatározzuk a töréshez szükséges energiákat (a különböző szoftverekkel pl. Origin [9]) az integrálás egyszerűen, gyorsan elvégezhető. Látható, hogy a vizsgált anyagok különbözőképpen viselkednek. Míg a β +PP a maximum elérése után stabil egyenes folyást mutat, addig a PPum1 jelűt nagyobb mértékű jellegzetes képlékeny instabilitás jellemzi.

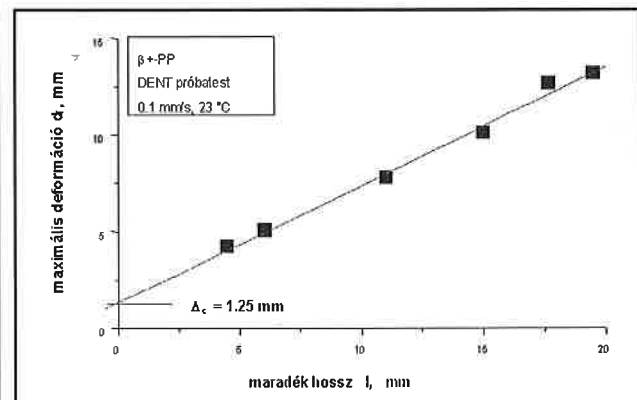
Eredmények

Az 4. ábrán a próbatest vastagságára vonatkoztatott maximális erő értéket ábrázoltuk a maradék hossz függvényében. Ha az adott hőmérséklethez és alakváltozási sebességhez tartozó folyáshatár értékét ismerjük, akkor az m értéke meghatározható. A bemutatott példában az m értéke (1,133) jól egyezik az elméletileg meghatározott 1,15-ös értékkel.



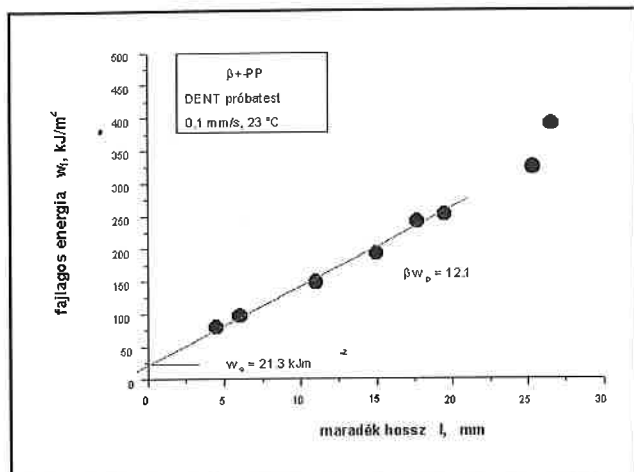
4. ábra. A próbatest szélességére vonatkoztatott maximális erő P_{max} a maradék hossz függvényében

Az 5. ábrán a töréshez tartozó maximális deformáció a maradék hossz függvényében van ábrázolva. A Δ_c érték jellemzi a bemetszés kinyílását.



5. ábra. A maximális deformáció változása a maradék hossz függvényében

A vizsgálatokból meghatározott fajlagos energiaértékek kerültek ábrázolásra a maradék hossz függvényében a 6. ábrán β +PP esetén. Látható, hogy a teljesen képlékenyen alakváltozott próbatest esetén a

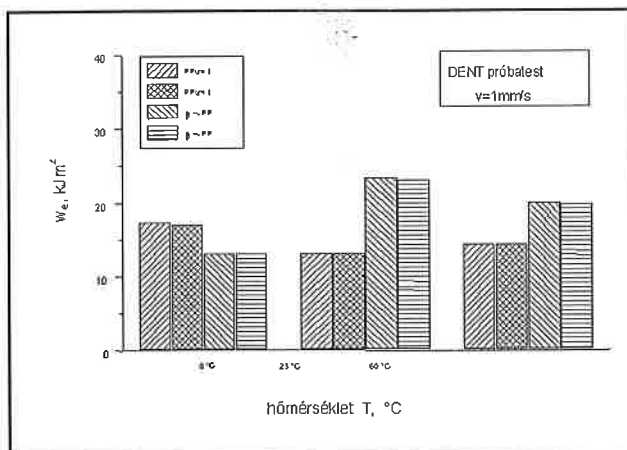


6. ábra. A fajlagos energia változása a maradék hossz függvényében az effektív törésmunka, w_0 meghatározásához

diagram valóban lineáris a w_0 értéke pontosan meghatározható. Amennyiben a próbatesten megmérjük a képlékeny zóna méretét (ez ellipszis, vagy rombusz alakú), akkor a képlékeny zónában elnyelt látólagos törésmunka w_1 értéke is megadható.

Különböző hőmérsékleten elvégzett vizsgálatok eredményeit mutatja be a 7. ábra β +PP és PPum1 összehasonlításával. Mind a vizsgált anyagok összehasonlítása, mind pedig az adott anyag tulajdonságainak hőmérséklet-függése pontosan meghatározható. Mint azt Karger-Kocsis [3] egyik munkájában részletesen elemezte nem minden anyag viselkedik a vizsgálattechnika szempontjából ideálisan. Az amorf műanyagok többsége, amelyek a maximális erő elérése után határozott folyást (necking) mutatnak a repedéskeletkezés előtt, jól vizsgálhatók e módszerrel. A részben kristályos műanyagok többsége, pl. a β +PP is, egyértelműen a bonyolultabb viselkedést mutató anyagok közé tartozik.

További fontos kérdés (főleg törésmechanikával gyakran foglalkozó szakemberek számára), hogy van-e, és ha van mi a kapcsolat az EWF-ből meghatározható mérőszámok és a J-integrál, vagy az R-görbe



7. ábra. A vizsgált PP anyagoknál az effektív törésmunka értékei, w_e a vizsgálati hőmérséklet függvényében

között. Bár az irodalomban található erre vonatkozó elméleti összefüggés, ennek kísérleti igazolása azonban ma még nem tekinthető teljes értékűnek. Ugyancsak nem tisztázott kérdés, hogy a módszer valóban használható-e sík alakváltozási állapotban a törésmunka meghatározására, és ha igen mi ennek a kapcsolata a sík feszültegi állapotban meghatározott értékekkel.

Irodalom:

[1] Broberg K.B.: Mech. Phys. Solids (1975) 23, 215
 [2] Mai Y. W, B Cotterell: Int. J. of Frac.,32, 105-125 (1986)
 [3] Karger-Kocsis J: Polymer Bulletin 37, 119-126 (1996)
 [4] Karger-Kocsis J., T Cigány: Polymer Vol 38 No: 18, pp 4587-4593, 1997
 [5] Karger-Kocsis J., Varga J.: J.of Appl. Polymer Science Vol. 62 291-300 (1996)
 [6] Hashemi S.: J. of Mat. Sci. 32 (1997) 1563-1573
 [7] ESIS TC4: Test Protocol for EWF, Version 5 (1997)
 [8] Hill R.H: J. Mech. Phys. Solids, 4 (1952) 19
 [9] MicroCal Inc.: Origin 5.0 Reference Manual (1998)

Az ezredforduló anyagai és technológiái

Folytatás a 137. oldalról

A plenárius üléseken a felkért előadók áttekintették egyrészt az anyag-tudomány – kiemelten a funkcionális anyagok és az előállításukhoz szükséges mikro- és nanotechnológia – alapvető szerepét a gazdasági fejlődésben és az életminőségre gyakorolt várható hatásait; másrészt a kormányzati szervek (GM, OMFB) és az EU vezető munkatársai bemutatták a tudományszervezés és -támogatás – kutatóhelyeket összefogásra is ösztönző – hazai és európai helyzetét és a lehetőségeket, kiemelten a hazai beszállítói célprogramot, illetve az EU 5. keretprogramjában 2002-ig szereplő anyagkutató feladatokat (ez utóbbiakról az Interneten is tájékozódhatnak az érdeklődők a www.cordis.lu, illetve a growth@dg12.cec.be címen).

Az anyagok és technológiák, a kutatási és vizsgálati módszerek, a modellezés és anyaginformatika szekciókban és a kerekasztal megbeszélésekben elhangzottak, valamint a posztereken bemutatottak – amelyeknek lényege nagyrészt elolvasható a konferencia-kiadványban – fontosabb megállapításai a következőkben összegezhetők:

A XXI. században a nemfémek alkalmazásának a köre bővül, de megmarad a fémeknek és ötvözeteknek a szerepe és a jelentősége is mind a szerkezeti, mind a funkcionális anyagok között. Azonban ezek fejlesztésben és gyártásában is a súlypont az anyagtulajdonságok tudatos – a felhasználói igényekre szabott – megváltoztatására helyeződik át. Mint ahogyan ez a szemlélet már fokozottabban érvényesül a fém- vagy műgyanta bázisú szerkezeti kompozitok, még inkább a funkcionális anyagok (különösen az informatika és a szenzori-

ka igényeire) fejlesztésében és gyártásában is. Ehhez nélkülözhetetlen az anyag szerkezete és tulajdonságai közti összefüggések, illetve a kívánt anyagszerkezetet létrehozó technológiai műveletek számítógéppel segített modellezése illetve vezérlése és ellenőrzése.

A sokszor egymásnak ellentmondó anyagtulajdonsági igényeket kielégítő ún. gradiens tulajdonságú anyagok és alkatrészek előállításának egyik fontos eszköze a felület összetételét, szerkezetét megváltoztató felületkezelési eljárások. Ezek köre, amelybe a régóta eredményesen alkalmazott eljárások, pl. betétedzés, kéregöntés, termokémiai és újabban a lézeres felületkezelés is beletartoznak, jelentősen kibővült, különösen a funkcionális tulajdonságokat (pl. szenzorok készítése céljából) megvalósító vékony rétegek előállítása kémiai gőzleválasztással erősen korrozív gázok érzékeléséhez. Az ilyen felületi anyagszerkezetek kutatásához, de ellenőrzéséhez is nélkülözhetetlenek a koszerű felület-analitikai spektroszkópos módszerek, a speciális szerkezetvizsgáló eszközök (pl.a pásztázó alagútmikroszkóp) alkalmazása is.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a felhasználói igényre szabott anyagkutatás, -fejlesztés és -előállítás sokrétű szilárdtestfizikai, kémiai, vizsgálattechnikai és módszertani, anyaginformatikai, valamint gyártástechnikai és technológiai ismeret rendszerbe szervezett alkalmazni tudását igényli. Az ebben megszerzett tapasztalatok és eredmények kölcsönös megismertetését jól szolgálta ez az anyagtudományt átfogóan kezelő konferencia.

Lehofer Kornél