

Mechanikai vizsgálatok egyedi mintageometriák esetében

A műanyagtermékek mechanikai tulajdonságaik szempontjából történő minősítése sok területen nélkülözhetetlen. A termékek alakja azonban sok esetben nem teszi lehetővé a vizsgálati szabványokban előírt geometriájú próbatestek használatát. Tipikus példa erre az íves geometriával jellemző csövek ellenőrzése, vagy azok a szerkezetek, amelyekből csupán kis méretű próbatest munkálható ki a vizsgálatokhoz. Ezekben az esetekben olyan alternatív mérési módszerek fejlesztésére van szükség, amelyek validálása, illetve az elterjedten használt szabványos vizsgálatokra való visszavezetése megoldható.

Tárgyszavak: mechanikai tulajdonságok; Charpy-féle ütvehajlító szilárdság; próbatest geometria; small punch teszt

A különböző polimerekből készült termékek egyik legfontosabb mechanikai tulajdonsága a törékenység, illetve az ütésállóság, amely az anyag energiaelnyelő képességével van kapcsolatban. Ezen tulajdonság számszerűsítésére elterjedt módszer az ingás ütőművek használata, legfőképpen az egyoldalon befogott (Izod) és a hárompontos (Charpy) hajlítási módnak megfelelő elrendezésben.

A térhálós mátrixú, tipikusan nagy átmérőjű csövek mechanikai vizsgálatai jellemzően a húzási-nyomási tulajdonságok, illetve a hosszútávú viselkedés (kúszás, fáradás) ellenőrzésére irányulnak. Sok esetben szükség van azonban a szívósság/ütésállóság jellemzésére is.

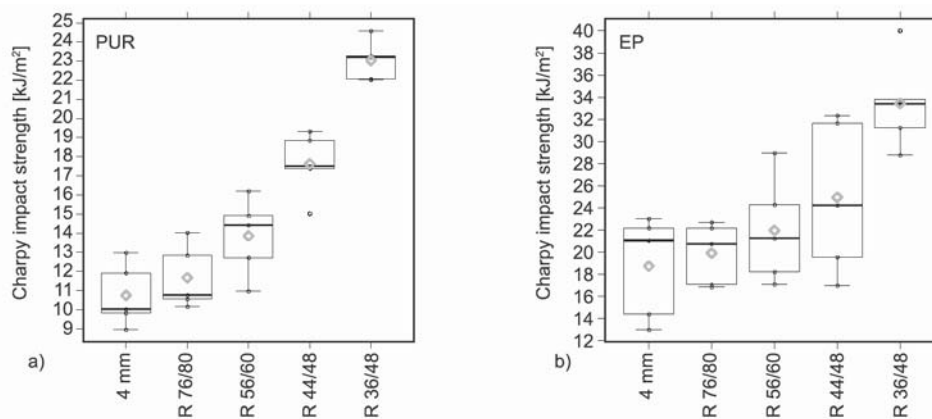
A darabok ütésállósága eltérő lehet a minták vastagságának, illetve geometriájának változásával: a növekvő vastagság hatására a szívós viselkedést ridegtörés válthatja fel, mivel nagyobb mintatérfogatban több hibahely valószínűsíthető. Német kutatók azt vizsgálták, hogyan változik a hornyolt és a hornyolatlan Charpy-féle ütőmunka különböző vastagságú (2–10 mm) és eltérő görbületű (külső sugár: 40–80 mm) epoxi (EP) és poliuretán (PUR) alapú minták esetében (1. ábra). Az epoxi mátrix viselkedését gipsz- és ütésállóság-növelő adalékkal ellátott esetben is vizsgálták. Méréseik alapján a nagyobb mintavastagság legtöbb esetben nagyobb ütőszilárdságot eredményezett, szemben a ridegedést valószínűsítő hipotézissel. Ezt azzal magyarázták, hogy az összes teszt során 62,5 mm altámasztási távolságot használtak, amit a DIN EN ISO 179-1 szabvány a 4 mm vastagságú próbatestekhez ír elő.

Az íves mintákat a domború oldalukon ütve, a görbület hatását elemezve megállapították, hogy annak növekedésével az ütőszilárdság értéke is növekedett (2. ábra). Ez az eredmény szintén a várakozásokkal ellentétes, mivel a nagyobb görbület miatti hosszabb ív ebben az esetben is nagyobb térfogatot, illetve több hibahelyet jelentene. Ez nem magyarázható a csekély mértékben megváltozott ingaúttal, illetve az abból következő ütési sebesség különbséggel, mivel az a különböző geometriájú minták esetében csupán néhány század m/s-ot jelent. A tapasztalt ütőszilárdság-növekményt tehát maga az íves geometria okozza.

Az egyenes és a különböző görbületű minták esetén értékelték a repedésérzékenységet (k_2) is, amit a bemetszett Charpy-féle ütőszilárdság (a_{cN}) és a bemetszetlen Charpy-féle ütőszilárdság (a_{cU}) hányadosaként lehet meghatározni:



1. ábra. Az ütévizsgálathoz használt különböző vastagságú és görbületű minták. A görbe minták vastagsága egységesen 4 mm, ezek esetében az első szám a belső, a második szám a külső sugár nagyságát jelöli. A „K” jelölésű minták a DIN EN ISO 179-1 szabvány szerint V-alakú, A-típusú hornyolással készültek.



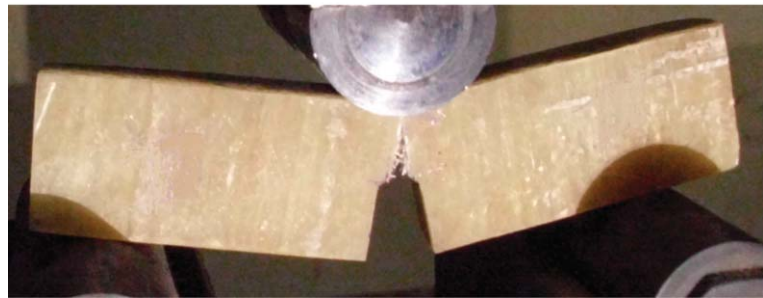
2. ábra. Hornyolatlan Charpy-féle ütőszilárdság eredmények eloszlásának box-diagramjai a különböző görbületű minták esetében. Az átlagértékeket a rombuszok jelölik. a) PUR minták, b) EP minták.

$$k_z = \frac{a_{cN}}{a_{cU}} \cdot 100\%$$

Minél nagyobb a k_z értéke, annál kisebb a repedésérzékenység. A tesztek során nem észleltek szignifikáns különbséget az értékben a görbület hatására, a PUR minták estében az érték 17%, töltetlen epoxi mintáknál pedig 5% körül mozogott. 10 tömeg% ütésállóság-növelő adalék az epoxi minták k_z értékét 8%-ra emelte, míg a 12,7% gipsztöltés 47%-ra. Utóbbi emelkedés

azzal magyarázható, hogy a gipsz töltés jobban rontotta a bemetszetlen ütőszilárdságot a bemetszett értékhez képest.

A homoktöltésű, üvegszál-erősítéses epoxi-mátrixú kompozit csövek törési szívósságának, illetve ütésállóságának meghatározása különösen fontos azokon a területeken, ahol a termékek agresszív környezeti tényezőknek (pl. sivatagi kőolajmezőknél történő használat) vannak kitéve, így feszültségkorróziós hatások léphetnek fel. A vizsgálatok során a csövekből kivágott mintákat 60 napra használat helyéről származó, magas klórtartalmú szennyvízbe helyezték, s többféle mechanikai vizsgálattal jellemezték ezen kondicionálás során fellépő hatásokat. A törésmechanikai tesztek ASTM D5045-14 szabvány szerinti egyoldalon bemetszett hajlító próbatesten végezték (3. ábra). A 13 mm vastag és 30 mm széles mintán a bemetszés mélysége kb. az alátámasztási távolság 45%-a. Az előzetes kondicionálás hatására lényeges csökkenés (36%) mutatkozott a vizsgálat során mért maximális erőben, illetve az erőelmozdulás görbe jellege is megváltozott: míg a kiindulási állapotban a minta vizsgálata során az erőérték folyamatosan növekedett (nem mutatkozott lágyulás), addig a kondicionált esetben a maximális erőérték elérése után lényeges lágyulás következett be, amit a töltő-, illetve erősítőfázisok és a mátrixanyag határfelületi elválása okozott.

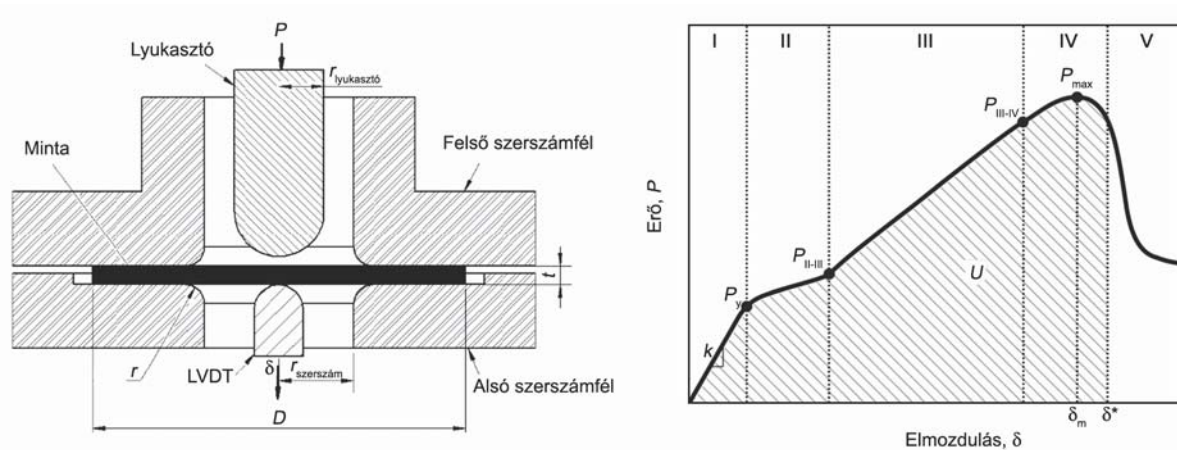


3. ábra. Egyoldalon bemetszett hajlítóvizsgálat (Single edge notch bending – SENB) üvegszál-erősítésű csőből kimunkált próbatesten.

Az ütőszilárdság változását ASTM D6110 szabvány szerinti Charpy-féle vizsgálattal követték nyomon. Az előzetes bemeztetés hatására ez az érték is jelentősen, 40%-kal csökkent, ami szintén feszültségkorróziós hatásokból eredő fázisváltásokkal, illetve mikrorepedések megjelenésével magyarázható.

Az 1980-as években fejlesztett small punch teszt (SPT) az utóbbi időben egyre elterjedtebb anyagvizsgálati módszer. Népszerűsége annak köszönhető, hogy kisméretű (átmérő ≤ 10 mm; vastagság $\leq 0,5$ mm) próbatestek vizsgálatával is fontos mechanikai tulajdonságokról ad információt. Olyan minimális ez a mintaigény, hogy kvázi roncsolás-mentes vizsgálatként is szokták rá tekinteni. A módszert eredetileg atomerőművek vizsgálatánál alkalmazták, mivel ezeken a területeken sokszor nem álltak rendelkezésre olyan (szabványos méretű) próbatestek, amelyeket ugyanazon hatások érték, mint az üzemelő fémötvözet-szerkezeteket.

A módszer során kombinált húzó- és a hajlító igénybevételnek teszik ki a mintát. Az elrendezés egy alsó és egy felső szerszám közé befogott vékony próbatestből és egy félgömbvégű vagy golyó kialakítású lyukasztóból (punch) áll (4a. ábra). A mérés során erőmérőcella, illetve differenciál transzformátor (LVDT) segítségével regisztrálható az erő (P), illetve az elmozdulás (δ). Az eredményül kapott P - δ görbe öt területre osztható (4b. ábra): I: rugalmas hajlítás; II: képlékeny hajlítás; III: membrán nyúlás; IV: képlékeny instabilitás; V: tönkremenetel. Meg lehet határozni továbbá a kezdeti merevséget (k), a folyáshatárhoz tartozó erőt (P_y), a maximális terhelésnél mérhető lehajlást (δ_m), a tönkremenetelhez tartozó lehajlást (δ^*), illetve a deformációs energiát (U).



4. ábra. a) Az SPT vizsgálat elrendezésének sematikus rajza; b) tipikus SPT erő-elmozdulás görbe.

A vizsgálat során ébredő komplex feszültségállapotok miatt azonban nehézségekbe ütközik a kapott mérőszámok megfeleltetése a hagyományos húzóvizsgálattal meghatározható mechanikai tulajdonságoknak. Habár maga az SPT vizsgálat szabványosítása sem zajlott még le, ezért pl. P - δ görbe zónáinak és jellegzetes pontjainak egzakt meghatározása sem egységes, többen próbálkoztak gyakorlati összefüggést felállításával, például a P_y és a klasszikus húzóvizsgálattal meghatározható folyáshatár (σ_f), illetve a k érték és a Young-modulus (E) között. Ezek a becslések azonban nem alkalmazhatók általánosan, mivel igen érzékenyek a kísérleti paraméterekre, illetve az anyagi jellemzőkre.

Számos összefüggést javasoltak továbbá az anyagok törésmechanikai jellemzőinek becslésére az SPT eredményekből. A törési tulajdonságok meghatározására irányuló módszerek elsődlegesen egy membránszerű minta merev lyukasztón történő áthúzásának egyenértékű tönkremeneteli deformációjára vezethetők vissza. Az egyenértékű tönkremeneteli deformáció (ϵ_{qf}) a következőképpen definiálható:

$$\epsilon_{qf} = \ln\left(\frac{t}{t_f}\right),$$

ahol t a kezdeti mintavastagság, t_f pedig a kialakult mintavastagság a tönkremeneteli helyen. Az ϵ_{qf} érték pedig lineáris kapcsolatban van a törési szívósság J -integrállal meghatározott értékével (J_{IC}). A tönkremeneteli vastagság mérése azonban sokszor nem megoldható megfelelő pontossággal, ezért az ϵ_{qf} meghatározására más összefüggés is használatos:

$$\epsilon_{qf} = \beta_{qf} \left(\frac{\delta^*}{t}\right)^p,$$

ahol $\beta_{qf} = 0,09$ és $p = 2,0$ a 3 mm sugarú és 0,25 mm vastagságú korong alakú próbatest-geometriához tartozó konstansok, δ^* pedig a tönkremenetelhez tartozó lehajlás.

A rugalmas-képlékeny törésmechanikai megközelítés alkalmazása során a próbatest lapjának közepén egy éles végű bemetszést (előrepedés) ejtenek, így hozva létre a lokális feszültségkoncentrációt.

Bár az SPT tesztet kezdetben csak fémes anyagok vizsgálatánál alkalmazták, újabban polimer szerkezetek minősítésére is használják. Sok esetben a cél itt is az egytengelyű húzóvizsgálattal meghatározható anyagjellemzőkre történő visszavezetés. Spanyol kutatók ötféle

műanyagokon végeztek vizsgálatokat, s jó korrelációt ($R^2 = 0,89$) találtak az SPT görbe kezdeti meredekségét jelző k érték mintavastagsággal (t) fajlagosított értéke és a Young-modulus (E), valamint a P_y vastagságnégyzettel osztott értéke és a folyáshatár (σ_f) között ($R^2 = 0,91$). A húzóvizsgálat folyáshatárhoz tartozó nyúlása (ε_y) és az SPT teszt mintavastagságra fajlagosított folyáshatárához tartozó deformációja (δ_m) között azonban már nem volt ilyen erős kapcsolat ki-mutatható. Ezt azzal indokolták, hogy az STP vizsgálat során fellépő kéttengelyű feszültségá-lapotban a polimerek szívós-rideg viselkedése eltér az egytengelyű terhelésnél tapasztalható-tól.

A vizsgálat egyik változata a shear punch test (ShPT), amellyel a minta nyíró-igénybevétel-vel szembeni ellenállása minősíthető. Ez esetben a lyukasztó vége nem gömb-szerű, hanem sík, a lemezkivágáshoz hasonló megoldással.

Összeállította: Dr. Ronkay Ferenc

Graupner, N.: Kühn, N.: Müssig, J. (2021). Influence of sample thickness, curvature and notches on the Charpy impact strength – An approach to standardise the impact strength of curved test specimens and biological structures – Polymer Testing, 2021. 106864.

Hassan, M. K.: Mohamed, A. F.: Khalil, K. A., Abdellah, M. Y.: Numerical and experimental evaluation of mechanical and ring stiffness properties of preconditioning underground glass fiber composite pipes – Journal of Composites Science, 2021. 264. sz. p. 1–14.

Rodríguez, C.: Cuesta, I. I.: MasPOCH, M. L. L.: Belzunce, F. J.: Application of the miniature small punch test for the mechanical characterization of polymer materials – Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. 86, p. 78–83.

Torres, J.: Gordon, A. P.: Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials – Journal of Materials Science, 2021. 18. sz. p. 10707–10744.