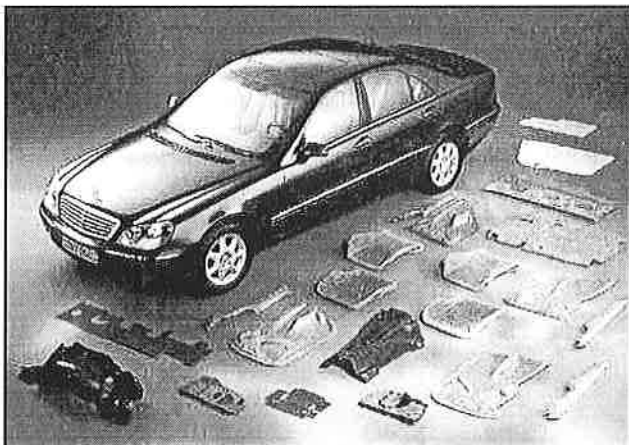


Kukoricamaghéj alkalmazhatóságának vizsgálata polimerek töltő- és erősítőanyagként

Dogossy Gábor¹ – Kovács József Gábor² – Czigány Tibor³

Bevezetés

A polimer kompozitok elterjedése az utóbbi évtizedekben exponenciálisan fejlődik. Míg régebben a felhasznált anyagokat a hőre keményedő mátrix és az üvegszál erősítés jellemezte, addig ma már a mátrix anyaga egyre inkább a hőre lágyuló polimerek irányába tolódik, és erősítőanyagként számos más, mesterséges és természetes szál jelenik meg a kompozit termékekben. Erre bizonyíték a 2003. április 1-3. között Párizsban megrendezett Kompozit Világkiállítás, ahol a kompozit hagyományosnak mondható felhasználása, például a hajóépítésben, csak kis szerepet kapott. Legnagyobb hányadban az autópár jelent meg mint felhasználó, és mellette jelentős szerepet kapott az építőipar, a repülőgépipar, a sporteszközök gyártása, és a legújabbban az energiaipar (szélkerekek). Amíg a hagyományos hajóépítés anyaga elsősorban az üvegszál erősítésű poliészter gyanta, addig az autópárban felhasznált hőre lágyuló polimerek széles skálája megtalálható (PA6, PP stb.). Az egyeduralkodó üvegszál mellett megfigyelhető a szénszál térhódítása, ami azzal magyarázható, hogy a nagy piaci verseny és az alkalmazási területek kiszélesedése lehetővé tette a gyártók számára a szénszál árának drasztikus csökkentését. A kiállításon az üveg- és szénszályártók közel azonos arányban voltak jelen. Több gyártó ajánlotta a már említett üveg- és szénszál mellett az aramidszálakat, és egy új típusú erősítőanyag is megjelent a kiállításon, ez pedig a bazaltszál. A felsorolt szálak jellemzően kiváló mechanikai tulajdonságúak, azonban újrahasznosításuk még nem megoldott. Az európai környezetvédelmi törvények (pl. a roncsautó irányelv) arra ösztönzik és kényszerítik, elsősorban a járműiparban, a kompozitgyártókat, hogy olyan alapanyagokat, illetve termékeket gyártsanak [1], amelyek részben vagy teljes mértékben lebomlanak a környezetben (biodegradálhatóság) [2]. Ezért az erősítő anyagok között megjelent a farost, valamint számos ipari növény rostja (len, kender, sisal stb.) [3,4,5]. Természetesen ezek a szálak nem érik el a hagyományos szálak szilárdsági tulajdonságait, azonban számos kis, illetve közepes igénybevétel helyre kiválóan megfelelnek, és felváltathatják a „hagyományos” szálak alkalmazását. Erre már több példa található, pl. lenszál-erősítést alkalmaznak a Mercedes S osztály modelljének számos alkatrészéhez (1. ábra) [6].



1. ábra. A Mercedes S Class polimer alkatrészei

¹szigorló gépészmérnök, ² egyetemi tanársegéd, ³ dr., tanszékvezető egyetemi docens: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék

A természetes eredetű szálak alkalmazhatósága mellett egyre nagyobb figyelmet kap a mezőgazdasági melléktermékek (pl. kukoricamaghéj, búzakarpa) polimerekbe való alkalmazhatósága is. Ennek oka a környezetvédelmi előírások mellett azok alacsony árban (kilogrammonkénti árúk 5-10-szer kisebb, mint a legolcsóbb polimeré) és nagy volumenű keletkezésükben keresendő. Ezért kezdeményezte a BME Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék a mezőgazdasági melléktermékek polimerek töltő- és erősítőanyagként való alkalmazhatóságának vizsgálati programját.

Magyarország nagy mennyiségben termel kukoricát. Az étkezési és takarmányozási felhasználás mellett a kukoricamagnak a keményítő frakcióját alkalmazzák nyersanyagként alkohol (bioüzemanyag) előállításához. A kukoricamag mellékterméke a maghéj, amelynek felhasználása ma még nem megoldott. Kezdeti próbálkozások történtek biomasszaként, etilalkohol előállítására, valamint biobrikett gyártására, és bár mindkét alkalmazási kísérlet hozott eredményeket, a kihozatali és gazdaságossági hatások „rendkívül” alacsonyok voltak.

A cikk célja bemutatni a polimerhez erősítő/töltő anyagként adagolt kukoricamaghéj alkalmazhatóságának vizsgálati eredményeit. Változó erősítőanyag-tartalom mellett vizsgáltuk az anyag folyási mérőszámát és a fröccsöntéssel gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságait.

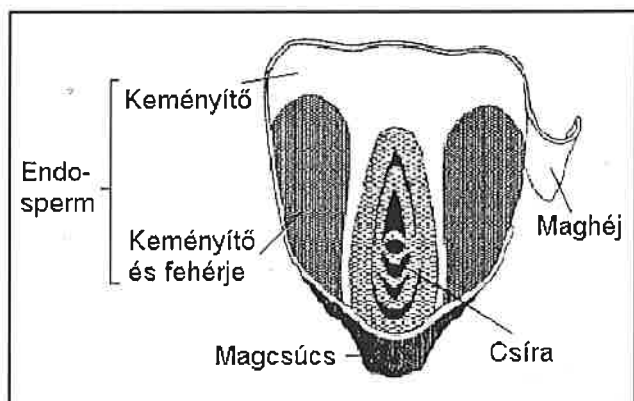
A felhasznált anyagok és előállításuk

Vizsgálataink során mátrix anyagként a TVK által gyártott Tipelin márkanévű polietilént (PE) használtuk. Erősítőanyagként a Hungrana Kft-ben melléktermékként nagy mennyiségben keletkezett, 2002-ben aratott kukoricának a maghéját alkalmaztuk.

Kukoricamaghéj

A kukoricamagnak négy fő része van (2. ábra) [7]:

1. Magcsúcs: segítségével kapcsolódnak a szemek a kukoricacsőhöz.
2. Maghéj: a rostanyagokat tartalmazza.
3. Endosperm: a külső rétege főként olajban és fehérjében, míg a belső rétege keményítőben és fehérjében gazdag.
4. Csíra: az endosperm alsóbb rétegébe van ágyazódva.



2. ábra. Az érett kukoricamag keresztmetszete

A kukoricamag átlagos összetételét és az egyes komponensek megoszlását a négy frakció között az 1. táblázat tartalmazza. A rostanyag (hemicellulóz + cellulóz + lignin) több, mint 50%-át a kukoricamaghéj tartalmazza.

1. táblázat A kukoricamag összetétele [8]

Frakciók	Komponensek megoszlása (%)						Teljes magra vonatkoztatott %
	Keményítő	Oldható cukrok	Hemicellulóz + cellulóz + lignin	Lipidek	Fehérje	Hamu	
Magcsúcs	0,1	0,7	0,1	0,7	0,8	0,9	0,49
Magháj	0,5	1	51	1,1	2	2,9	5,3
Endosperm	98	28,2	27	14,5	74,8	16,5	81,9
Csíra	1,4	70,2	16	83,7	22,4	79,7	12,31
Teljes kukoricamag	71,7	2,6	8,1	4,3	10,3	1,4	100

A kukoricamag hámja a kukoricaszem nedves őrlése során bőséges mennyiségben keletkező melléktermék. Napjainkban a kukoricamag hámját a besűrített áztató lével, valamint a csíraolaj kisajtolása után visszamaradt csíralepénnyel együtt elsősorban állati takarmánnyként hasznosítják, illetve elégetik.

Az általunk felhasznált kukoricamag hámj összetételét a 2. táblázat szemlélteti [9].

2. táblázat A kukoricamag összetétele

Kukoricamag hámj	Összetétel [%]
Keményítő-tartalom	22,54
Cellulóz-tartalom	23,38
Hemicellulóz-tartalom	31,14
Hamu-tartalom	1,18
Lignin-tartalom	7,37
Fehérje-tartalom	11,68
Zsirtartalom	2,71
Összesen	100

Próbatest gyártás

A vizsgálatokhoz a polietilénbe 0, 10, 20, 30, 40 és 50 tömegszázalékos arányban kevertünk kukoricamag hámj, amelyet Brabender 814402 típusú, kétszigás extruderben homogenizáltunk, és 3 mm átmérőjű előgyártmányt húztunk belőlük, majd Brabender 881203 típusú aprítóval granuláltuk. A granulátumból ISO 3167 szabvány szerinti piskóta alakú próbatesteket fröccsöntöttünk az Arburg Allrounder 270C típusú öntőgéppel. Az ütőműves vizsgálatokhoz az ISO 178 szabvány szerinti téglalap alakú próbatesteket alkalmaztuk.

Vizsgálati eljárások

Folyóképesség vizsgálat (MFI)

A folyási mutatószám meghatározását Zwick 4104 típusú, kapilláris pasztométerrel végeztük. A vizsgálat célja a különböző kompozitok fröccsöntéssel való feldolgozhatóságának a megállapítása volt. A vizsgálatokat 180 °C hőmérsékleten, és 4,35 kg tömegű pótsúllyal hajtottuk végre. Az MFI folyási mutatószám az (1) összefüggés szerint:

$$MFI = \frac{m \cdot s}{t} \quad (g/10 \text{ perc}), \quad (1)$$

ahol s (s) a szabványos időnek (10 perc = 600 s) megfelelő szorzószám, t (s) az az idő, amely alatt az m (g) anyagmennyiséget a dugattyú a készülékből kisajtolta.

Szakítóvizsgálat

A méréshez Zwick Z050 BZ050/TH3A típusú, számítógép-vezérelésű, univerzális szakítógépet használtunk. A méréseket 10 mm/perc szakítási sebességgel, szobahőmérsékleten végeztük. Az erő-elmozdulás görbékből húzószilárdságot (σ_M), és nyúlást (ϵ_M) számoltunk:

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad (MPa), \quad (2)$$

ahol F_M (N) a maximális erő, A_0 (mm²) a kezdeti keresztmetszet (4x10 mm).

$$\epsilon_M = \frac{L_M - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (\%), \quad (3)$$

ahol L_0 (mm) a próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza, L_M (mm) a próbatest vizsgált szakaszának a maximális erőnél mért megnyúlt hossza.

Hárompontos hajlítóvizsgálat

A méréshez Zwick Z020 BZ020/TN2S típusú, számítógép-vezérelésű, univerzális szakítógépet használtunk. A hajlítást 10 mm/perc keresztfej sebességgel, szobahőmérsékleten végeztük. Az erő-elmozdulás görbékből hajlítószilárdságot (σ_H), illetve nyúlást (ϵ_H) számoltunk:

$$\sigma_H = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (MPa), \quad (4)$$

ahol F_{max} (N) a diagramról leolvasott maximális erő, L (mm) az alátámasztás távolsága, b (mm) a próbatest szélessége, h (mm) a próbatest vastagsága.

$$\epsilon_H = \frac{L_M - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (\%), \quad (5)$$

ahol L_0 (mm) a próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza, L_M (mm) a próbatest vizsgált szakaszának a maximális erőnél mért megnyúlt hossza.

Charpy-féle ütőhajlító vizsgálat

A méréseket Ceast Resil Impact Junior ütőművel végeztük. A kalapács ütési energiája: 25 J, a támaszköz: 62 mm volt. Az ütőhajlító szilárdságot (a_v) a (6) összefüggéssel határoztuk meg:

$$a_v = \frac{A_n}{b \cdot h} \cdot 10^3 \quad (kJ/m^2), \quad (6)$$

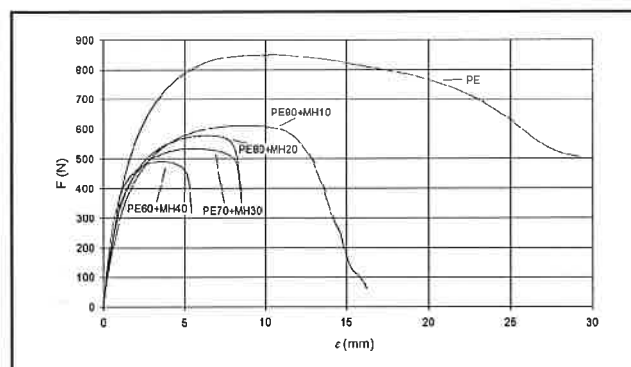
ahol A_n (J) a mintadarab eltöréséhez szükséges munka, h (mm) a próbatest vastagsága, b (mm) a próbatest szélessége.

Pasztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

A töretfelületekből metszeteket készítettünk, amelyeket Polaron SC7620 típusú berendezésben bearanyoztunk, majd a felületeket JEOL 5500LV típusú pásztázó elektronmikroszkóppal megvizsgáltuk és a jellemző részleteket lefényképeztük.

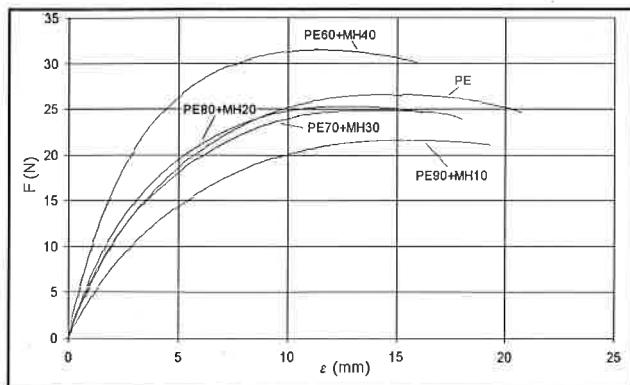
Az eredmények értékelése

A különböző tömegszázalékú kukoricamag hámjával töltött PE előállításkor az 50% vagy a feletti töltőanyag esetén már csomósodást és elégtelen keveredést tapasztaltunk. Megállapítottuk, hogy a kukoricamag hámj



3. ábra. A vizsgált anyagok szakítódigramjai

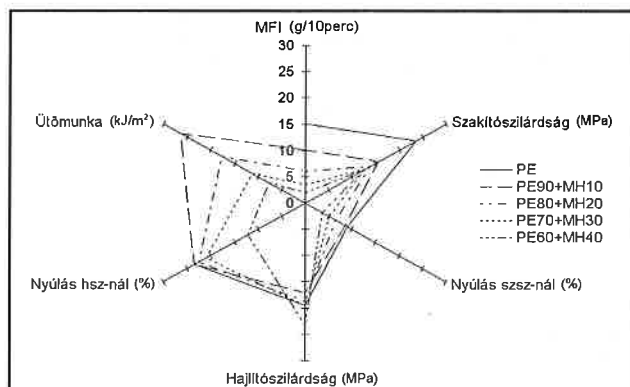
növekvő mennyisége mellett a fröccsöntött próbatest felületi minősége romlik, és a 40% fölötti mennyiség már nagymértékben destabilizálja a kompozitot, ezért vizsgálatainkat a 10, 20, 30 és 40%-os töltésű anyagokkal végeztük el. A szakítóvizsgálat eredményei a 3. ábrán, míg a hajlítóvizsgálat a 4. ábrán láthatóak.



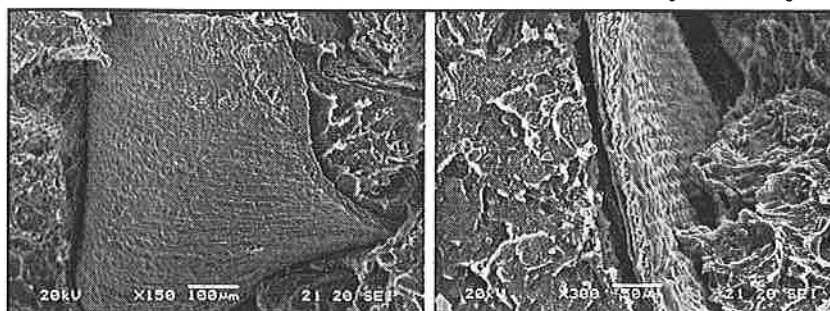
4. ábra. A vizsgált anyagok hajlítódíagramjai

A szakítóvizsgálat során a töltetlen PE bizonyult a legerősebbnek. A kukoricamaghéj-tartalom növekedésével a szakítószilárdság és a nyúlás is csökkent. A hajlítóvizsgálat során pedig csak a 40%-ban töltött kompozit mutatott a PE-nél nagyobb hajlító merevséget. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a maghéjjal töltött PE kompozit a jelen formájában elsősorban másodlagos termékek készítésénél alkalmazható, ahol nincs, illetve csekély a mechanikai igénybevétel, de fontos a merevség, a kis tömeg, és az alacsony ár (pl. fröccsöntött tömegcikk).

Az 5. ábrán polárdiagramban összesítettük a vizsgált kompozitok mechanikai tulajdonságait. (Számértékeit tekintve valamennyi skála léptéke azonos.) A diagram alapján is megállapítható, hogy a kukoricamaghéjjal töltött rendszereknek mind a statikus, mind a dinamikus hárompontos hajlítással szembeni ellenálló képessége jó, így alkalmasak környezetbarát autópári alkatrészek (pl. autók belső burkolata) előállításához is.



5. ábra. A maghéjjal töltött PE anyagok és a PE mechanikai tulajdonságai



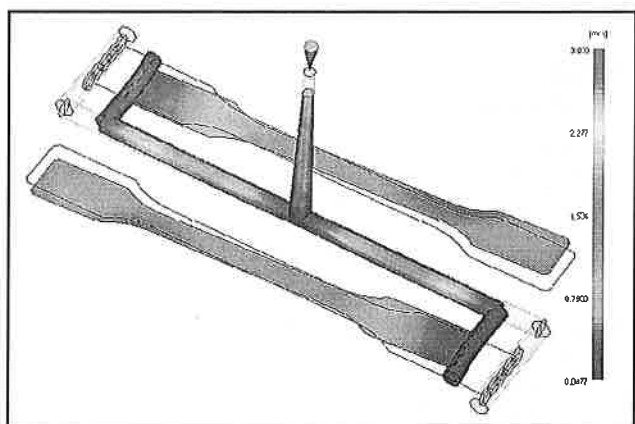
6. ábra. A maghéjjal töltött PE töretéről készült SEM felvételek

A töretfelületről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken jól látszik, hogy a PE és a kukoricamaghéj közötti kapcsolat nem kielégítő, a határfelületi adhézió nem megfelelő. Ez a próbatestek töltőanyag-tartalomtól függően romló felületi minősége alapján várható volt.

A fényképfelvételeken megfigyelhető a kukoricamaghéj réteges szerkezete, és a maghéj és a képlékeny mátrix közötti üregek. Ezért megoldandó feladat a maghéj illetve a mátrix megfelelő kezelése, amellyel elérhetővé válhat nemcsak a fröccsöntött tárgy felületi minőségének, hanem mechanikai tulajdonságainak lényeges javulása is.

Szimuláció

A szakirodalomból [10] közismert, hogy a PE mátrix zsugorodása nagy (1,3–3,5%). Ezt a belőle fröccsöntéssel készülő termékek tervezésekor figyelembe kell venni. Szimulációval vizsgáltuk a fröccsöntött, piskóta alakú próbatestek zsugorodását annak megállapítása céljából, hogy a kukoricamaghéj mennyivel csökkenti a PE zsugorodását. A szimulációban a kukoricamaghéjat rostos anyagként modelleztük.



7. ábra. A maghéjjal töltött PE anyagból előállított darabok vetemedése (az ábra 10-szeres nagyításban mutatja a vetemedéseket, amely tartalmazza a zsugorodást is)

A szimuláció eredményei (7. ábra) a zsugorodás nagymértékű csökkenését mutatták (1,8%-ról 0,3%-ra). A számítógépes szimuláció eredményét összehasonlítottuk mérési adatainkkal kielégítő egyezést tapasztaltunk. Ugyan is a névlegesen 170 mm hosszú, PE-ből készült próbatest 165,95 mm-re, míg a 40% maghéjat tartalmazó anyagból készült 169,8 mm-re zsugorodott. Megoldásra váró további feladat a végelesemes szimulációs modellünk peremfeltételeinek pontosítása, finomítása.

Összefoglalás

Munkánkban célul tűztük ki, hogy egy, a mezőgazdaságban nagy mennyiségben keletkező mellékterméket, a kukoricamaghéjat alkalmazzuk polimerek erősítő/töltő anyagaként. A maghéjat PE polimerhez adagoltuk. A vizsgálataink alapján megállapítottuk, hogy a maghéj elsősorban mint töltőanyag alkalmazható. A PE–maghéj keverékek mechanikai tulajdonságai a maghéj tömegarányának növelésével a töltetlen PE-hez képest csökkennek, kivétel csak a 40%-os töltőanyag tartalmú keverék, amelynek hajlítószilárdsága jobb, mint a töltőanyag nélküli PE alapanyagé. 40%-nál nagyobb arányú keveréket nem sikerült előállítani, mert a PE és a maghéj sűrűsége nagyon eltérő, és ezért a két anyag az extruder adagoló tölcserájában külön válik, aminek hatására először kisebb arányú keverék keletkezik, majd a „besűrűsödött” maghéj beragad

a csigába. Megoldásra váró további feladat a magháj és a mátrix határ-felületi adhéziójának növelése, a mechanikai vizsgálatok kiterjesztése és a szimuláció további pontosítása.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani az ARBURG Hungária Kft-nek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az ARBURG Allrounder 270C típusú fröccsöntőgépet, valamint az ANTON Kft-nek a cserélhető betétes fröccsöntő szerszámért. Továbbá köszönjük a szabadegyházi Hungrana Kft-nek, hogy felhasználhattuk a náluk keletkező kukoricamaghajat. A vizsgálatokat az OM NKFP 3A/0036/2002 számú pályázata támogatta.

Irodalom

- [1] Tschöke H.: Grüner Kunststoff fürs Auto, Technische Rundschau, 94 (2002), 41
 [2] Mohanty A. K., Misra M., Hinrichsen G.: Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites, Macromolecular Material Engineering 276/277 (2000), 1-24

- [3] Van den Oever M. J. A., Bos H. L., van Kemenade M. J.: Influence of the physical structure of flax fibres on the mechanical properties of flax fibre reinforced polypropylene composites, Applied Composite Materials, 7 (2000), 387-402
 [4] Van de Velde K., Kiekens P.: Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites, Polymer Testing, 20 (2001), 885-893
 [5] Yan Li, Yiu-Wing Mai, Lin Ye: Sisal fibre and its composites: a review of recent developments; Composites Science and Technology, 60 (2000), 2037-2055
 [6] Ingo Kleba, Jochen Zibold: Eine Fahrt ins Blaue; Kunststoffe, 2002/3, 113
 [7] Sárdi Á.: A kukorica magháj, mint mezőgazdasági melléktermék feldolgozásának lehetőségei; Diplomamunka, BME Mezőgazdasági Kémiai Technológia Tanszék, 2003.
 [8] Czikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai; Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.

SZEMLE

Ütéskárosodott üvegszál-erősítésű kompozit maradék szilárdsága

Impulzushullám-elemzés alkalmazásán alapuló, új roncsolásmentes vizsgálati módszerrel számolt be Frank Berning és Klaus Eberle a Materialprüfung 2003/4. számában a Restfestigkeit von impactgeschädigten Glasfaserverbundproben című cikkben.

Szerzők célul tűzték ki, hogy az üvegszál-erősítésű lemez próbatesteken az ismert energiájú ütés okozta károsodás roncsolásmentes „láttelele” és a hozzátartozó szilárdság között meghatározott összefüggéssel az ismeretlen energiájú ütés által károsodott kompozit alkatrész maradék szilárdsága meghatározható legyen.

Az ismert energiájú ütés okozta károsodás „láttelelehez” a lemez próbatestben mintegy 200 kHz frekvenciával gerjesztett Lamb-hullámok (ultrahang lemez hullámok) terjedésének felületre merőleges, nm nagyságrendű amplitúdójának a legnagyobb értékét rendelték, amelyet a károsodott felület átlagos egyenes mentén pontonként mérték lézer-vibrométerrel. A mérési idő kb. 200 µs. A méréseket követően meghatározták a lemez próbatest maradék szilárdságát szakítóvizsgálattal. A mérési adatok statisztikus feldolgozásával a maradék szilárdság (N/mm²) és a legnagyobb amplitúdó (nm) között lineáris korrelációs összefüggést határoztak meg: a maradék szilárdság fordítva arányos a legnagyobb amplitúdóval. Ez az összefüggés alkalmas az ismeretlen energiájú ütés által károsodott kompozit lemez alkatrész maradék szilárdságának roncsolásmentes meghatározására. Ugyanis a károsodott felületet át mérve roncsolásmentesen a Lamb-hullámok legnagyobb amplitúdóját, az összefüggéssel a maradék szilárdság kielégítően pontosan becsülhető.

A Monte Carlo-szimuláció alkalmazása a radiográfiában

A hagyományos radiográfiai szimulátorok a lineáris gyengülési törvényt és a sugárzás-anyag kölcsönhatását leíró gyengülési tényezőket alkalmazzák. Ez utóbbi csökkenti a az átsugárzásos felvételtechnika szimulálásakor a szórt sugárzás kontrasztszökkentő hatását. Am számos alkalmazáshoz, például a hegesztési varratok vizsgálatához, ez az egyszerűsítés gyakorlatilag kielégítően alkalmazható. Viszont a Monte Carlo-eljárással az egyes kölcsönhatások mechanizmusai, mint a Compton- és a Rayleigh-szórások, részletesen leírhatók. Továbbá, ez a módszer lehetővé teszi a különböző, a képmínőséget befolyásoló tényezők, mint például az erősítőfóliák alkalmazása, a detektorzaj (pl. a film szemcsészettsége) okozat belső életlenség vizsgálatát és leírását is. Általában, a Monte Carlo-szimuláció minden olyan esetben eredményesen alkalmazható, amikor a szórt sugárzás hatásának részletes vizsgálata hozzájárul a radiográfiai képalkotás minőségének a javításához. Segítségével a felvételtechnika optimalizálhatóan tervezhető – mutat rá Gerd-Rüdiger Tillach a Monte-Carlo-Simulation für radiographische Anwendungen című, a Materialprüfung 2003/3. számában megjelent cikkben.

A kifáradási élettartam előrejelzése megbízhatóságának javítása

A repedésképződés és a rövid repedések terjedése mechanizmusának pontosabb megismerésével azért javítható az élettartam-becslés megbízhatósága, mert ez a károsodás kezdetétől tartó folyamat a teljes élettartam jelentős hányada.

Számos megfigyelés igazolja, hogy a fáradásos repedések az anyagszerkezet hibáinál keletkeznek, így a mikrorepedések gyakorisága és terjedésgyorsasága vonatkoztatott sűrűsége jelentősen függ az anyag szerkezetétől és az igénybevétel szintjétől, kölcsönhatásban a vizsgált mintadarab felületi minőségével.

Az új élettartam-becslési eljárás, amelyet Michael Vormwald közöl a Lebensdauererhöhung durch Verbesserung der Schadensmechanik című cikkében (Materialprüfung 2003/3.), a károsodás kezdeti, sztochasztikus folyamatának szimulálása.

Az anyagszerkezetnek meghatározó hatása van a mikrorepedések keletkezésére és terjedésük kezdeti szakaszára. Ezt a hatást számításba vehetjük a kísérleti tényeket magába foglaló empirikus repedésnövekedési függvényekkel, vagy a feltérképezett anyagszerkezeti inhomogenitásokat megfelelően felhasználó mechanikai modellel. Ez utóbbiak közül az első, a Tanaka által továbbfejlesztett Dugdale-modell volt. A felrepedés-élettartam szórására és a töltetű igénybevételre vonatkozóan felvetődött kérdésekre újabb modellekkel kellett válaszolni. Ugyanis, amikor a mikrorepedés hossza meghaladja az anyagszerkezetre jellemző méretet, akkor az anyagszerkezet inhomogenitásainak a repedésterjedésre gyakorolt hatása elenyészik. Ezt követően a repedés terjedését a kontinuum-mechanika makroszkopos módszerével írhatjuk le, különösképpen a rugalmas-keplékeny törésmechanikával, jelenleg előnybe részesítve a repedés csúcsát tényleges igénybe vevő, ciklusonkénti J-integrál értékekkel, megkülönböztetve a repedés kinyílásakor és záródásakor a feszültség- és alakváltozás-állapotot.

A károsodás kritériuma vékony lemezek tartamzilárdságának meghatározásához

Az anyag-energia- és költségtakarékos lemezkonstrukciók széles körű elterjedése magával hozta a vékony lemezek és a belőlük (ponthegesztéssel, lézeres hegesztéssel, kisajtolásos szegeccseléssel, ragasztással és más hibrid eljárással) szerelt szerkezeti elemek fáradási tartamzilárdságának az egységes károsodási kritérium szerinti meghatározásának igényét. Ezzel a kérdéskörrel foglalkozik Ping Xu és Bernhard Lehmkühl a Materialprüfung 2003/4. számában megjelent Einheitliches Versagenskriterium című cikkben. Áttekintik, vizsgálati példákkal illusztrálva, a gyakorlatban jelenleg használatos károsodási kritériumokat (például a rendszerint R = 0,1 aszimmetria tényezőjű lengőterhelésre a dinamikus merevség kétféle: a terhelés-/alakváltozás-amplitúdó, illetve a legnagyobb terhelés/legnagyobb alakváltozás viszonyszámok százalékában kifejezett értékeit), amelyekhez értelemszerűen különböző tartamzilárdságok tartoznak. Ezért a különböző szerkezeti megoldások, kötéstípusok fáradásbírására, tartamzilárdságára gyakorolt hatásának összehasonlítható megítélését az egységes károsodási kritérium hiánya zavarja. Szerzők az egységes károsodási kritérium elfogadása mellett érvelnek.