

# Kukoricamaghéj alkalmazhatóságának vizsgálata polimerek töltő- és erősítőanyagaként

Dogossy Gábor<sup>1</sup> – Kovács József Gábor<sup>2</sup> – Czigány Tibor<sup>3</sup>

## 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 legújabban 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 egyeduralgoló 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 szénszálgártók közel azonos arányban voltak jelen. Több gyártó ajánlotta a már említett üveg- és szénszál mellett az aramidszálat, 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 (biodegradálisanak) [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 igénybevételi 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

<sup>1</sup>szigorló gépészmérnök, <sup>2</sup> egyetemi tanársegéd, <sup>3</sup> 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, búzakorpa) polimerekbe való alkalmazhatósága is. Ennek oka a környezetvédelmi előírások mellett azok alacsony árában (kilogrammonkénti áruk 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 erősítőanyagaként 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” alacsony volt.

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.

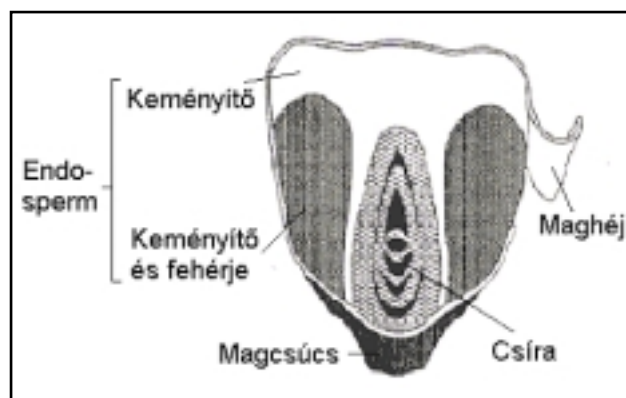
## A felhasznált anyagok és előállításuk

Vizsgálataink során mátrix anyagként a TVK által gyártott Tipelin márkanevű 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
Maghéj	0,5	1	51	1,1	2	2,9	5,3
Endosperm	98	28,2	27	14,5	74,8	16,5	81,9
Csira	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 kukoricamaghéj a kukoricaszem nedves őrlése során bőséges mennyiségben keletkező melléktermék. Napjainkban a kukoricamaghéjat a besűrített áztató lével, valamint a csiraolaj kisajtolása után visszamaradt csiralepénnyel együtt elsősorban állati takarmányként hasznosítják, illetve elégetik.

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

2. táblázat A kukoricamag összetétele

Kukoricamaghéj	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 kukoricamaghéjat, amelyet Brabender 814402 típusú, kétcsigás 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 ütöműves vizsgálatokhoz az ISO 178 szabvány szerinti téglalap alakú próbatesteket alkalmaztuk.

**Vizsgálati eljárások**

**Folyóképesség vizsgálat (MFI)**

A folyási mutatószám meghatározását Zwick 4104 típusú, kapilláris plasztométerrel végeztük. A vizsgálat célja a különböző kompozitok fröccsöntéssel való feldolgozhatóságának 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-vezérlésű, univerzális szakítógépet használtunk. A méréseket 10 mm/perc szakítási sebességgel, szobahőmérsékleten végeztük. Az erő-elmozdulás görbékből húzószilárdságot ( $\sigma_M$ ), és nyúlást ( $\epsilon_M$ ) számoltunk:

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

ahol  $F_M$  (N) a maximális erő,  $A_0$  (mm<sup>2</sup>) 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-vezérlésű, univerzális szakítógépet használtunk. A hajlítást 10 mm/perc keresztfej sebességgel, szobahőmérsékleten végeztük. Az erő-elmozdulás görbékből hajlítószilárdságot ( $\sigma_H$ ), illetve nyúlást ( $\epsilon_H$ ) 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:

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

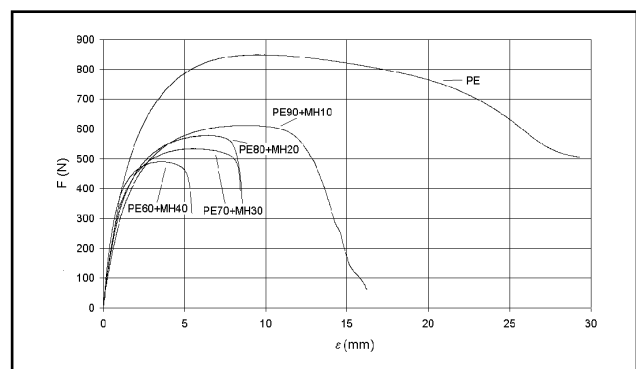
ahol  $A_n$  (J) a mintadarab eltöréséhez szükséges munka, h (mm) a próbatest vastagsága, b (mm) a próbatest szélessége.

**Pásztázó 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.

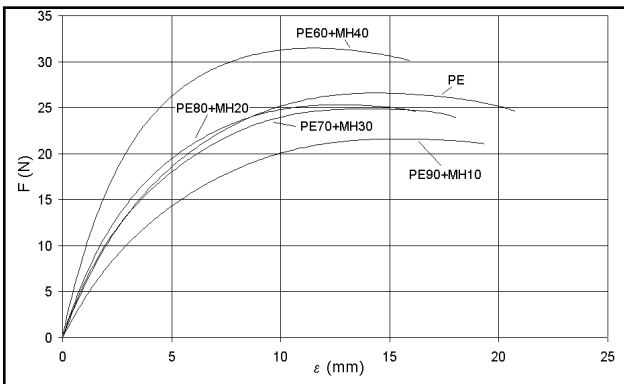
**Az eredmények értékelése**

A különböző tömegszázalékú kukoricamaghéjjal töltött PE előállítasakor az 50% vagy a feletti töltőanyag esetén már csomósodást és elégtelen keveredést tapasztaltunk. Megállapítottuk, hogy a kukoricamaghéj



3. ábra. A vizsgált anyagok szakítódigramjai

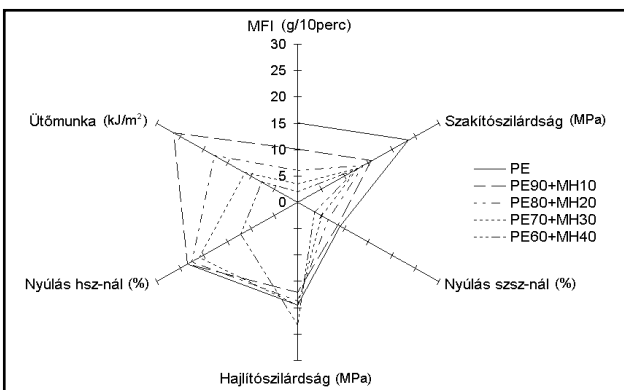
növekvő mennyisége mellett a fröccsöntött próbatest felületi minősége romlik, és a 40% fölötti mennyiség már nagymértékben destabilizálja a kompozitot, ezért vizsgálatainkat a 10, 20, 30 és 40%-os töltésű anyagokkal végeztük el. A szakítóvizsgálat eredményei a 3. ábrán, míg a hajlítóvizsgálaté a 4. ábrán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



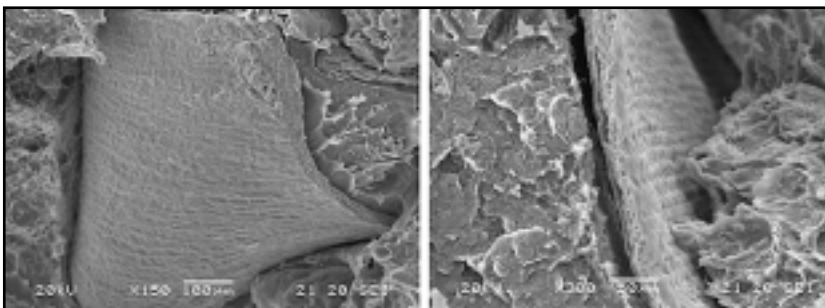
4. ábra. A vizsgált anyagok hajlítódigramjai

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 alkalmazhatók környezetbarát autópári alkatrészek (pl. autók belső burkolata) előállításához is.



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



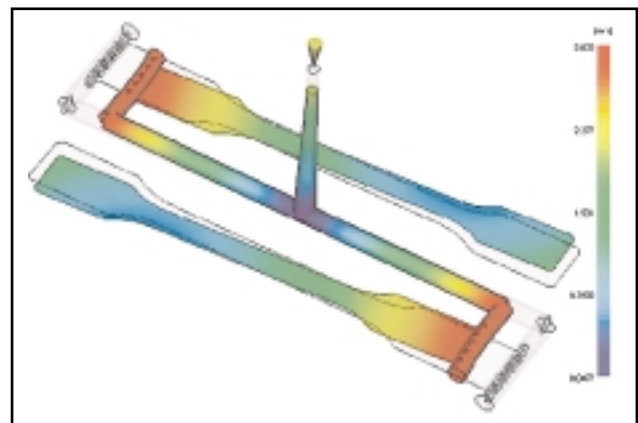
6. ábra. A maghéjjal töltött PE töretéről készült SEM felvételek

A töretfelületről készült pásztázó elektronmikroszkópos felvételeken jól látszik, hogy a PE és a kukoricamaghéj közötti kapcsolat nem kielégítő, a határületi 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 összehasonlítva mérési adatainkkal kielégítő egyezést tapasztaltunk. Ugyan is a névlegesen 170 mm hosszú, PE-ből készült próbatest 165,95 mm-re, míg a 40% maghéjjal tartalmazó anyagból készült 169,8 mm-re zsugorodott. Megoldásra váró további feladat a végelemes szimulációs modellünk peremfeltételeinek pontosítása, finomítása.

## Összefoglalás

Munkánknak 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 kukorica-magháját. 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 Zabold: 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] Czikkovszky 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 próbatesten 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 „láttelele” a lemez próbatesten mintegy 200 kHz frekvenciával gerjesztett Lamb-hullámok (ultrahang lemez hullámok) terjedésének felületre merőleges, nm nagyságrendű amplitúdójának a legnagyobb értékét rendelték, amelyet a károsodott folton áthaladó 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/mm<sup>2</sup>) 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 kompozitlemez alkatrész maradék szilárdságának roncsolásmentes meghatározására. Ugyanis a károsodott folton át megmérve roncsolásmentesen a Lamb-hullámok legnagyobb amplitúdóját, az összefüggéssel a maradék szilárdság kielégítően pontosan becsülhető.

### A Monte Carlo-szimuláció alkalmazása a radiográfiában

A hagyományos radiográfiái szimulátorok a lineáris gyengülési törvényét és a sugárzás–anyag kölcsönhatását leíró gyengülési tényezőt alkalmazzák. Ez utóbbi csökkenti a az átsugárzásos felvételtechnika szimulálásakor a szórt sugárzás kontrasztcsökkentő hatását. Ám 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 szemcsézettsége) 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 radiográfiái 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 cikkében.

### 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 mikropredések gyakorisága és térfogatysűrűsége 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 Lebensdauervorhersagen verbessern című cikkében (Materialprüfung 2003/3.), a károsodás kezdeti, sztochasztikus folyamatának szimulálása.

Az anyagszerkezetnek meghatározó hatása van a mikropredések 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 töltött igénybevételre vonatkozóan felvetődött kérdésekre újabb modellekkel kellett válaszolni. Ugyanis, amikor a mikropredés hossza meghaladja az anyagszerkezetre jellemző méretet, akkor az anyagszerkezet inhomogenitásainak a repedésterjedésre gyakorolt hatása elenyészik. Ezt követően a repedés terjedését a kontinuum-mechanika makroszkópos módszerrel írhatjuk le, különösképpen a rugalmas-képlékeny törésmechanikával, jelenleg előnybe részesítve a repedés csúcspontjának helyes igénybe vevő, ciklusonkénti J-integrál értékekkel, megkülönböztetve a repedés kinyílásakor és záródásakor a feszültség- és alakváltozás-állapotot.

### A károsodás kritériuma vékony lemezek tartamszilárdságának meghatározásához

Az anyag-energia- és költségtakarékos lemezkonstrukciók széles körű elterjedése magával hozta a vékony lemezek és a belőlük (ponthegesztéssel, lézeres hegesztéssel, kisajtolásos szegescseléssel, ragasztással és más hibrid eljárással) szerelt szerkezeti elemek fáradási tartamszilárdságának az egységes károsodási kritérium szerinti meghatározásának igényét. Ezzel a kérdéskörrel foglalkozik Ping Xu és Bernhard Lehmkuhl 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 százalékban kifejezett értékeit), amelyekhez értelemszerűen különböző tartamszilárdságok tartoznak. Ezért a különböző szerkezeti megoldások, kötéstípusok fáradásbírására, tartamszilárdságára gyakorolt hatásának összehasonlítható megítélését az egységes károsodási kritérium hiánya zavarja. Szerzők az egységes károsodási kritérium elfogadása mellett érvelnek.