

Műanyagok roncsolásmentes vizsgálata

A műanyag termékek roncsolásmentes vizsgálati módszereinek választéka egyre bővül. A roncsolással járó módszerekhez hasonlóan itt is az anyaghoz, az alkalmazáshoz, a várható tulajdonságműködéshez igazodó vizsgálati eljárást kell kiválasztani. Ehhez nyújt kapaszkodót az alábbi összeállítás, amely áttekinti a roncsolásmentes vizsgálati módszereket és azok alkalmazási lehetőségeit.

Tárgyszavak: roncsolásmentes vizsgálatok; vizsgálati módszerek; röntgen; termográfia; ultrahang; elektromágneses sugárzás; terahertz tartomány; örvényáram; szálerősítésű kompozitok.

A műanyagokat, főleg a szálerősítésűeket egyre gyakrabban alkalmazzák olyan alkatrészekhez, építőelemekhez, amelyeknél a biztonság szempontjai határozzák meg a követelményeket. Ez érthető módon egyre fontosabbá teszi a termék roncsolásmentes vizsgálatát még az elkészült termék használatba vétele előtt, vagy akár összeszerelt állapotban a használat során, legyen szó szélérőművek lapátjairól, helikopteralkatrészekről, de a gépkocsik teherhordó elemeiről is. Mára számos vizsgálati módszert ismerünk a műanyagok roncsolásmentes vizsgálatára, és ezeket a módszereket jelenleg is folyamatosan fejlesztik. Néhány éve például még csak a laboratóriumokban használták a terahertzes vagy a mikrohullámos vizsgálatot. Ezek ma már ipari méretben is hozzáférhetők. Ma hasonló fejlődés előtt áll a magspin-rezonancián alapuló módszer alkalmazása polimerekre. A módszerek egyike sem tekinthető univerzális vizsgálati eljárásnak, minden esetben az alapanyag, a használat során előálló környezeti feltételek, az adott termék és a meghatározandó hibák jellegzetességei alapján kell kiválasztani a megfelelő vizsgálati módszert.

A különböző roncsolásmentes vizsgálati eljárások bemutatása

Röntgenvizsgálatok

Az átvilágításos röntgenvizsgálat alapja az, hogy a sugárzás elnyelése az anyag sűrűségétől függ. A tapasztalatok szerint a röntgenvizsgálattal $0,2 \text{ g/cm}^3$ sűrűségkülönbség megbízhatóan észlelhető. A röntgensugárzással jól kimutathatók a különböző üregek, repedések stb. Ugyancsak röntgensugárzással dolgozik az ipari komputertomográf (iCT). Az egyszerű átvilágítástól eltérően az iCT vizsgálatnál különböző irányokból készítenek felvételeket, amelyekből metszeti képeket, majd a tárgyról virtuá-

lis 3D modellt alkotnak. Hátránya ennek a módszernek, hogy a vizsgálható testek méretét a vizsgálóberendezés mérete korlátozza. Speciális komputertomográfiai eljárás a *laminográfia* is, amellyel olyan testek is vizsgálhatók, amelyeket nem lehet minden oldalról megközelíteni. A komputertomográfia a közönséges átvilágítással összehasonlítva idő- és költségigényesebb.

A kontraszt növelése érdekében fejlesztették ki néhány éve az ún. *kettős energiájú CT-t*, (*DECT* vagy *2X-CT*). Ennél a módszernél két különböző energiájú, azaz hullámhosszúságú sugárzással készítenek felvételeket. Így kisebb sűrűségkülönbségeket is észlelni lehet.

A röntgensugárzással dolgozó eljárásokkal észlelhetők és jelezhetők mind a háromdimenziós hibák (zárványok, üregek, lunkerek), mind a delaminációk és a repedések, sőt meghatározható a hibahelyek nagysága, formája és helyzete is. Használható a röntgenvizsgálat a ragasztások és a hegesztések ellenőrzésére is.

Termográfia

A *termográfiával* a felületről visszavert infravörös sugárzást, vagyis a felület hőmérsékletét mérik. Megkülönböztetnek passzív és aktív termográfiát. Az elsónél egyszerűen a felület hőmérsékletét mérik, amivel jól követhetők, ellenőrizhetők a hőmérséklet-változással járó folyamatok, például a fröccsöntés során a hűtés. Az aktív termográfiánál a vizsgált tárgyat néhány másodperctől néhány percre terjedően hőhatásnak teszik ki. Ez lehet villanófény, hőszugárzó vagy lézer. A hőforrás kikapcsolása után – a lehülési periódus alatt – meghatározott időközönként termikus képeket vesznek fel. A felület lehülési sajátosságai alapján lehet következtetni a felülethez közeli tartományokban a szerkezeti inhomogenitásokra, mivel a tárgy belsejében levő hibahelyek megzavarják a hőáramlást, így a belső szerkezet hibái a felületen hőmérsékletkülönbség formájában jelennek meg.

Az *aktív termográfia* egyik módszere a *lock-in termográfia*, amellyel meghatározott rezgésszámú folytonos szinuszos jelekre adott, ugyanazon frekvenciájú válaszjelek időeltolódását (fázisát) és amplitúdóját mérik. A gerjesztés itt is különböző módon történhet, pl. lámpákkal vagy akár ultrahanggal. Az elektromosan vezető műanyagokat, pl. a szénszálas kompozitokat gerjeszthetik örvényárammal is. A lock-in termográfia eredménye a frekvencia jó megválasztásától függ. A gerjesztő sugárzás behatolási mélysége ugyanis a modulációs frekvenciától függ: minél kisebb a gerjesztő frekvencia, annál nagyobb réteget lehet vizsgálni, de annál hosszabb a mérés ideje.

A *termográfia főleg a homogén, nagy felületű, kis falvastagságú egyszerű geometriájú testek vizsgálatára alkalmas*. A termográfiában mind az átvilágításos, mind a visszaverődéses mérési elrendezés alkalmazható. Így olyan esetben is használható, amikor a vizsgálandó testet csak az egyik oldalról tudják megközelíteni. Műanyagokban a termográfia a mm-es nagyságrendű vastagságoknál ad jó eredményt, mindenekelőtt a felülethez közeli háromdimenziós hibákat mutatja ki, de detektálja a síkbeli hibákat, a rétegelválást vagy az erősítő szálrétegek hibáit, aminek például a széllapátok-

nál van nagy jelentősége. A termográfias vizsgálóberendezések általában mobilak, viszonylag kompaktnak, ezért a felhasználás helyszínén is jó használhatók.

Ultrahangos vizsgálat

Az ultrahangos vizsgálat a 20–50 MHz tartományba eső mechanikai rezgéseket használja. Az *ultrahang terjedése a vizsgálandó tárgyban a sűrűségtől és a mechanikai modulustól függ*. Az anyagban levő inhomogenitások megzavarják és csillapítják a rezgéseket, határfelületükről az ultrahang visszaverődik vagy megtörik. A vizsgálat laterális felbontóképessége a műanyagokban a tipikus 10 MHz frekvenciánál 0,05–0,2 mm. A hangrezgés terjedése irányában ennél jobb felbontás érhető el. Az ultrahangos vizsgálatnál két alapvető mérési elrendezés alkalmazható, a transzmissziós és a visszaverődéses. A vizsgált anyagon áthaladó vagy visszaverődő mechanikus hullámokat a vevőfej kristálya nagyfrekvenciás elektromos rezgésekké alakítja, amelyek láthatóvá tehetők.

A hagyományos ultrahangos vizsgálatnál vizet vagy glicerint használnak a felületen, hogy az ultrahangot kibocsátó fej és a vizsgált test között tökéletes legyen a kapcsolat. Az utóbbi években terjed az ún. *levegős ultrahangvizsgálat* (Luftultraschalltechnik), amikor nem használnak közvetítő folyadékot. Ilyenkor a fellépő veszteségek miatt kisebb a felbontóképesség.

Az ultrahangos vizsgálatnál nemcsak a háromdimenziós hibák, az idegentestzárványok és az üregek detektálhatók, hanem a síkbeli hibák is észlelhetők akár nagyobb mélységben is. Alkalmazható az eljárás a repedések jelzésére is. Minél homogénebb a tárgy, annál jobban fel lehet dolgozni a kapott jeleket, és a hibákhoz hozzárendelni. Az ultrahangos vizsgálórendszerek elegendően kompaktnak és mobilnak, és így a gyakorlatban jól használhatók.

Shearográfia (Felületi deformáció mérése)

A shearográfiai vizsgálatnál *mechanikai vagy termikus terhelés hatására a tárgy felületének kismértékű deformációját mérik*. A legtöbbször periodikus hatás kiváltja a felület rezgését. Ez a rezgő mozgás a belső és külső struktúráktól és az inhomogenitásoktól függ, pl. a felület rezgése erősebb, ha alatta üreg található. A shearográfiai vizsgálat felbontóképessége viszonylag korlátozott, mivel a mérendő deformációváltozásokra más deformációk is rakódhatnak. Itt is segíthet a termográfianál említett lock-in technika. Ennél az eljárásnál a tárgyat periodikusan, például egy amplitúdó által modulált lámpával vagy ultrahanggal gerjesztik. Ezzel elnyomhatók a zavaró, nem modulált deformációk. A gerjesztés hatására kiváltott rezgéseket legtöbbször egy speciális lézinterferométerrel detektálják. A vizsgálandó felületet kiterített lézersugárral világítják meg. A felület a lézert fényt egy kamerába veri vissza. Ahhoz, hogy a detektált hibák elhelyezkedéséről, mélységéről információt kapjanak, különböző gerjesztőfrekvenciákkal kell mérést végezni. Ezért a teljes mérési idő általában néhány perc.

A shearográfiai módszer a felülethez közeli és nagy felületű hibák, például a szellapátokban a ragasztási hibák jelzésére szolgál. *Kifejezetten alkalmas a szálerősítéssű kompozitok, szendvicsszerkezetek, laminált lemezek vizsgálatára.* A mérés érintésmentes, egy oldalról is végezhető. A shearográfiai vizsgálórendszerek is mobilak.

Elektromágneses sugárzást alkalmazó vizsgálatok

A mikrohullámok tartományába eső – 300 MHz és 10 GHz közötti frekvenciájú – elektromágneses sugárzás is használható a műanyagok vizsgálatára. A mikrohullámú sugárzás hullámhossza néhány millimétertől a néhány centiméterig terjed, és ennek megfelelő az ezzel a sugárral elérhető felbontás. Ha a vizsgálandó tárgy az antenna közelében, az ún. közelhatási térben van, a felbontás javítható. Az inhomogenitások kimutatása a mikrohullámú sugárzással az anyagok különböző dielektromos állandóján alapul. Ennek következtében ugyanis a vizsgálandó anyaggal kölcsönhatásba lépő át-eresztett vagy visszavert mikrohullám vizsgálatával a minta tulajdonságaira vonhatók le következtetések. *Az elektromosan szigetelő műanyagok a mikrohullámok számára átjárhatók, az elektromosan vezető anyagok viszont visszaverik a sugárzást. A mikrohullámot használó vizsgálat különösen alkalmas a szálakat tartalmazó műanyagok vizsgálatára,* mivel a viszonylag nagy hullámhossznak köszönhetően alig lép fel csillapítás. A mikrohullámú vizsgálóeljárás érintésmentes, de a jó felbontás elérése érdekében általában a mintát az antenna közelébe kell helyezni.

Terahertz tartományban végzett vizsgálatok

A terahertzes (THz: 10^{12} Hz) frekvenciatartomány a mikrohullám és az infravörös sugárzás közé eső elektromágneses sugárzás hullámhossza és így felbontóképessége 50 μm –1 mm közé esik. *Előnye a hasonló felbontást adó röntgensugárzással végzett átvilágítással szemben, hogy ez nem ionizáló sugárzás, ezért nincs szükség a meg lehetőséskörülmenyes árnyékolásra.* Mivel a vezető anyagok, így a víz is, ezt a sugárzást visszaverik, *a terahertzes vizsgálattal jó pontossággal lehet kimutatni a víztartalmat vagy a fémes zárványokat. Ugyancsak felismerhetők a hibahelyek az alapanyagtól eltérő törésmutatójuk és abszorpciós együtthatójuk alapján.* A terahertzes vizsgálóeszközök lehetnek optikai vagy teljesen elektronikus rendszerek. Az utóbbiak jóval nagyobb berendezést igényelnek, de általában több információt is adnak. Ez azonban a mérés időszükségletét is növeli. A terahertzes vizsgálattal főleg az ragasztások, hegesztések minőségét ellenőrzik, zárványokat lehet kimutatni és rétegvastagságot is lehet mérni. Elektromosan nem vezető szálakat, így üvegszálakat tartalmazó kompaundokban ki lehet mutatni a delaminációkat is.

Örvényárammal végzett eljárások

Az örvényáramos vizsgálatot *az elektromosan vezető anyagoknál,* vagyis a műanyagok egy részénél, *pl. a szénszálak kompozitoknál alkalmazzák.* Az örvényáramos

vizsgálat az elektromágneses indukción alapszik. A vizsgálat elve az, hogy egy változó árammal táplált tekercs primer mágneses tere a vizsgálati darabban örvényáramokat indukál. Ezek az örvényáramok szekunder mágneses teret gerjesztenek, amely a tekercs primer terével ellentétes és arra szuperponálódik. Az említett két mágneses erőter által keltett eredő erőteret érzékelni, illetve mérni lehet, és ennek változásaiból következtetni az anyag hibáira vagy tulajdonságaira. Ezzel a módszerrel ki lehet mutatni a próbadarab hibahelyeit, a zárványokat és az üregeket, de észlelni lehet az erősítő szénszál szakadását is.

A felsorolt vizsgálati módszereket és azok legfontosabb jellemzőit, alkalmazási területeit foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat

Roncsolásmentes vizsgálati módszerek

		Mérési módszer										
		Röntgen		Termográfia		Ultrahang		Shearográfia	Mikrohullám	Terahertz		Örvényáram
		átvilágítás	CT	aktív	passzív	mátrix sugárnyaláb	levegős ultrahang			optikai	elektronikus	
Anyag	elektromosan vezető	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+
	habok	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-
Hibák	zárvány, üreg	+	+	+	+	+	+	o	+	+	+	+
	képsíkra merőleges repedés	+	+	-	-	o	-	o	-	o	o	+
	képsíkkal párhuzamos delamináció	-	+	+	+	+	o	+	o	+	+	o
Laterális felbontás		μm–mm	μm–mm	mm–cm	mm–cm	μm–cm	mm–cm	mm–cm	mm–cm	μm–mm	μm–mm	mm–cm
Mérési mélység		dm	dm	mm	mm	cm	cm	mm	cm	cm	cm	mm
Megközelítés		2	2	1–2	1	1	1–2	1–2	1	1–2	1–2	1
Mobilitás		o	-	+	+	+	o	+	+	-	+	-
Védelem		-	-	+	+	+	+	o	+	o	+	+
Hozzáférés		+	+	+	+	+	o	+	+	-	+	o
Távolság		dm	cm	cm–m	érintés	mm–cm	cm–m	cm–m	mm–cm	cm	cm	mm
Idő/m ²		min	h	min	min	min	min	min	min	h	min	min

Jelek magyarázata: + = jól megfelel; o = közepesen megfelel; 1 = egyoldalú vizsgálat; 2 = kétoldalú vizsgálat.

Szálerősítésű kompozitok roncsolásmentes vizsgálata

A roncsolásmentes vizsgálatok használhatósága, hatékonysága, megbízhatósága, idő- és költségigénye különösen fontos a szálerősítésű műanyag kompozitok esetében. Ezeket ugyanis az építőiparban, a repülőgépiparban, a szélerőművekben és az autópiparban egyre nagyobb arányban használják a nagy méretű, teherhordó építőelemek alapanyagaként acélötvözetek és könnyű fémek helyett. Ezek az alkalmazási területek a fenntarthatósági és környezetvédelmi követelmények teljesítése érdekében várhatóan tovább növekednek a jövőben is.

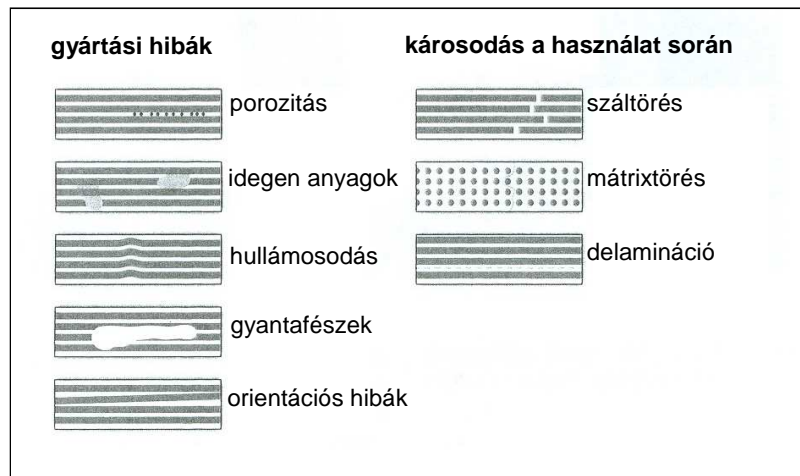
Az *Airbus A 380* repülőgép tömegének már 22%-a szálerősítésű műanyag. 2014 végén repülési engedélyt kapott – Európában és az Egyesült Államokban is – az *Airbus A350X*, az első repülőgép, amelynek a teljes teste és a szárnyai is szénszállal erősített kompozitból készülnek.

Az autókban a karosszériaelemek tömegének csökkentése az elektromos autók fejlesztésével vált megkerülhetetlenné, hiszen az akkumulátorok miatti tömegnövekedés kompenzálása éppen a műanyag karosszériákkal lehet eredményes. Az erőteljes kutatás-fejlesztés ellenére a magasabb költségek miatt a kompozit-karosszériákat egyelőre kis szériákhoz, ezen belül a versenyautókhoz alkalmazzák. Ennek a helyzetnek a változása éppen napjaink fejleménye. A BMW és az SGL Carbon 2009-ben alapította meg SGL Automotive Carbon Fibers közös vállalatát a műanyag kompozit karosszériaelemek fejlesztésére és gyártására a BMW számára. A BMW 2013-ban bemutatta első olyan elektromos szériaautóját, a *BMW i3-at*, amelynek a karosszériaelemei mind szénszállal kompozitból készültek. Az alváz anyaga még alumínium. A 125 kW-os elektromotorral rendelkező modell az akkumulátor nagy tömege mellett is jó dinamikával rendelkezik.

A szálerősítésű kompozitok másik fontos területe a szélerőművek gyártása. Ezekhez jelenleg legnagyobb mennyiségben a folytonos üvegszállal erősített műanyagokat használják, belőlük 60 méter hosszúságú rotorlapátokat is gyártanak. A lapátok gyártása mindazonáltal nagyon munkaigényes és drága. A gyártás egyelőre itt is kis sorozatokban folyik.

Jelenleg nincsenek végleges válaszok, szabványok arra, hogy milyen hibatípusok, milyen nagyságban, mennyiségben engedhetők meg az egyes alkalmazásokban. Ezért sokszor a támasztott mechanikai követelmények akár túlzottak is lehetnek a várt, de nem pontosan számítható öregedés, kifáradás figyelembevétel miatt. A téma mindenhol fontos, ahol az alkalmazásnak biztonságtechnikai kockázata van, mindenképp a légi közlekedésben, de ugyanígy az atomerőművekben vagy a nyomástartó berendezésekben (csővezetékek, tartályok). A fenti területeken legtöbbször alkalmazott végtelesen szállal erősített kompozitokban speciális hibatípusokkal is kell számolni (*1. ábra*). Keletkezhetnek hibahelyek a gyártás során – orientációs hibák, gyantasűrűsödések („gyantafészkek”), idegen testek, üregek és szálhullámok – de a használat során is, pl. szál- és mátrixszakadások vagy delaminációk (a rétegek elválása). A delamináció a leggyakoribb hiba, amely a használat során fellép. Ennek oka legtöbbször a túlzott hajlító vagy ütő igénybevétel. Ennek következtében alig változik a szakítószilárdság, de

gyakorlatilag megszűnik a nyíró igénybevétellel szembeni ellenállás a két érintett réteg között.



1. ábra Hibatípusok a szállal erősített kompozitokban a gyártás és a használat során

A szokásos roncsolásmentes vizsgálati módszerek alkalmazását a szálerősítésű kompozitoknál nagyon nehezíti a gyakran heterogén szerkezet, amely legtöbbször anizotrópiával jár együtt. A sikeres módszereknek tehát figyelemmel kell lenniük a rétegzettségre, a szálorientációra, a szál típusára, átmérőjére stb. A *delaminációk jól kimutathatók a termográfia módszerével*. A delamináció következtében ugyanis a gerjesztésre szolgáló hőáram nehezebben vagy egyáltalán nem tud lefolyni, így a felületen infravörös kamerával mérhető „hot spotok” képződnek. Gyakran használják a réteges szerkezetek vizsgálatára az interferometriás módszert, a shearográfiát is. A fenti két módszer a felület közelében levő hibákat tudja elsősorban kimutatni. Az ún. volumenmódszerek, a röntgenátvilágítás és annak fejlettebb változata, a röntgen-CT vastagabb testeket is képesek teljesen átvizsgálni és bennük a hibákat is megtalálni. Jól használható a szálerősítésű kompozitoknál az a speciális ultrahangos vizsgálat, amelyenél az ún. mátrix-ultrahangos vizsgálófejet használják, és amellyel a tomográfiához hasonló képeket lehet kapni a szerkezetről.

Összeállította: Máthé Csabáné dr.

Hochrein, T. et al.: Ich sehe, was du nicht siehst = Kunststoffe, 103. k. 11. sz. 2013. p. 70–74.
Kreutzbruck, M.: Faserkunststoffverbunde zerstörungsfrei prüfen = Kunststoffe, 104. k. 11. sz. 2014. p.67–71.