

ALAKVÁLTÓ KOMPOZITOK TERVEZÉSE ÉS GYÁRTÁSA AUTOKLÁVVAL

DESIGN AND AUTOCLAVE MANUFACTURING OF SHAPE CHANGING COMPOSITES

VERMES BRÚNÓ^{1,2}
CZIGÁNY TIBOR^{1,2}

Ebben a cikkben szálerősítésű kompozitok alakváltó képességével, a felmerülő kihívásokkal, azok megoldási lehetőségeivel és a kompozit termékek autoklávus gyártástechnológiájával foglalkozunk. Bemutatjuk az alakváltó kompozitok jelentőségét és tervezésük módját. A tervezés a rétegrend analitikus optimalizációján alapul, amire MATLAB alapú algoritmust készítettünk. A legnagyobb kihívást az aszimmetrikus rétegrendekből eredő vetemedések csökkentése jelenti, aminek megoldására három lehetőséget vázolunk fel. Emellett ismertetjük a kompozit termékek legmagasabb minőségét garantáló autoklávus gyártástechnológiának a jellemzőit és előnyeit, amelyek indokolják használatát olyan esetekben, amikor kulcsfontosságú az eredmények reprodukálhatósága, a kifogástalan minőség.

In this paper we are investigating the feasibility of shape changing composites, the associated challenges and possible solutions to those, as well as the autoclave manufacturing technology of composite products. We present the significance and the design process of shape changing composites. The design process bases on the analytical optimization of the lay-up for which we have developed a MATLAB algorithm. Warping resulting from asymmetric layups poses the greatest challenge to overcome. Three possible warping mitigation methods are proposed in this paper. Furthermore, we summarize the main characteristics and advantages of the autoclave manufacturing method of composites that justify its usage in cases where reproducibility of the results is key.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű kompozitok az ipar számos területén kerülnek előtérbe. Ennek oka elsősorban a kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságaikban keresendő. A hagyományos szerkezeti anyagokhoz képest (pl. fémek, fém-ötvözetek) kisebb tömeg mellett tudják biztosítani a mechanikai követelményeket (pl. merevség és szilárdság). A tömegcsökkenés pedig jelentősen hozzájárul többek között a járművek (pl. repülőgépek) üzemanyag fogyasztásának és károsanyag kibocsátásának visszaszorulásához, a szélerőművek energiatermelési hatékonyságának növeléséhez, vagy a versenyautók köridejének csökkenéséhez. A kompozitok terjedésének és térhódításának egy jellemző példája látható

az 1. ábrán, ahol a tömegrészesedésük változását mutatjuk be személyszállító repülőgépek szerkezetében az elmúlt 60 évben. A tendencia exponenciálisan növekvő, a modern utasszállító repülőgépeknek ma már több mint 50%-a kompozitból készül. Felmerül a kérdés azonban, hogy miként biztosítható a kompozitok felhasználásának további növekedése. Ehhez az anyag további fejlesztésére van szükség. Eddig a fajlagos mechanikai tulajdonságokat használtuk ki, de a kompozitok többfunkcióssá is tehető, ami tovább növeli értéküket. Lehetséges például a kompozit szerkezetek állapotának roncsolásmentes jelzése magának az erősítőszálnak a segítségével. A legígéretesebb módszerek az üvegszálak fényvezetését [1] vagy a szénszálak elektromos vezetését [2] használják ki. A legkézenfekvőbb többletfunkció azonban, ami a kompozitok anizotrop jellegéből adódik, a nem-konvencionális alakváltások kifejlesztése és kihasználása. Nem-konvencionális az az alakváltozás, ahol az aktuáció (pl. mechanikai terhelés) módja és a deformáció módja különbözik egymástól. Például húzó terhelés hatására nem (csak) megnyúlik, de le is hajlik az anyag, vagy hajlító terhelés hatására megcsavarodik. Az ilyen fajta viselkedésnek jelentős előnye lehet például egy repülőgép vagy szélturbina aerodinamikai elemei esetében, amelyek a rájuk ható terhelés függvényében mindig az aerodinamikai szempontból optimális alakot lennének képesek felvenni, vagy legalábbis jobban megközelítenék, mint a konvencionálisan alakváltó szerkezetek.

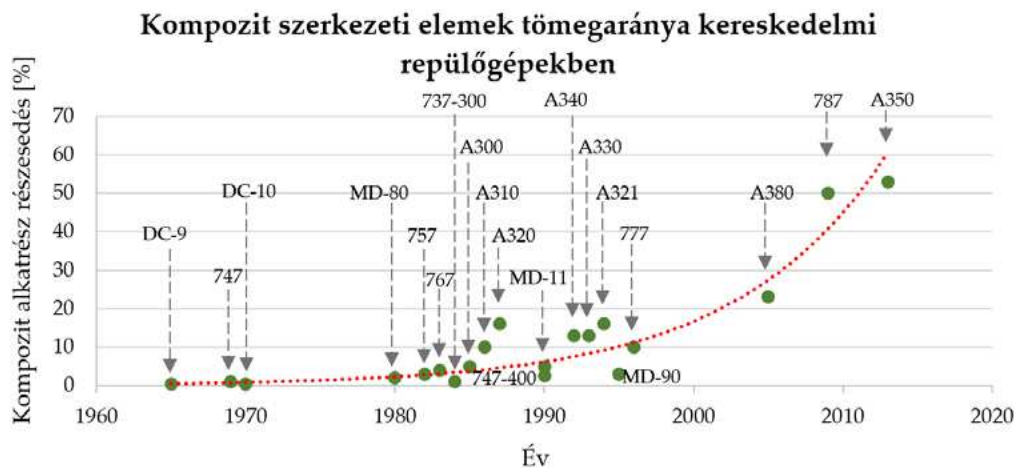
A 2. ábra a nem-konvencionálisan alakváltó (idegen szóval „morphing”) anyagokkal és szerkezetekkel foglalkozó publikációk számát mutatja az idő függvényében. Ezek a publikációk nem csak kompozitokra korlátozódnak, többek között elektromotorral [6], piezomotorosan [7] vagy alakemlékező anyagokkal [8] is el lehet érni a nem-konvencionális alakváltást. A kompozitok két nagy előnye azonban a továbbra is kiváló fajlagos mechanikai tulajdonság és az alakváltás passzív jellege. A passzív jelleg arra utal, hogy a működés közben alapvetően fellépő mechanikai terhelésen kívül nincs szükség másféle aktuációra (pl. elektromos áramra vagy hőre).

A bemutatott két tendencia alapján egyértelmű, hogy érdemes alakváltó kompozitok fejlesztésével foglalkozni. Ezt a közelmúltban többen is felismerték (pl. York [9, 10]), viszont bizonyos problémák még mindig megoldásra várnak (pl. vetemedés), mielőtt széleskörűen elterjedhetnek az iparban ezek az anyagok.

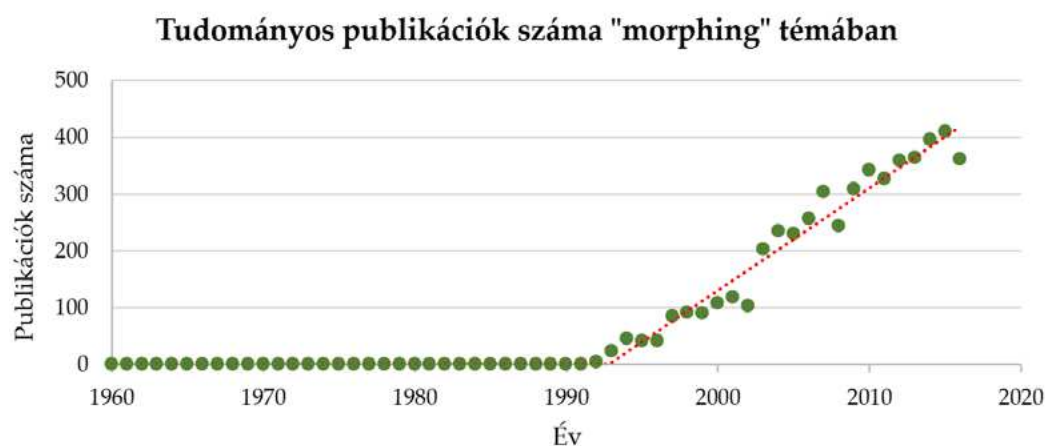
A cikkben célunk, hogy bemutassuk az alakváltó kompozitok tervezési és gyártási lehetőségeit, valamint megoldási lehetőségeket kínálunk az aszimmetrikus rétegrendekből eredő nem kívánt vetemedések csökkentésére, kiküszöbölésére.

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

² MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport



1. ábra. Kompozitok tömegrészesedése kereskedelmi repülőgépekben ([3–5] alapján)



2. ábra. Az évente közölt, nem-konvencionálisan alakváltó anyagokkal foglalkozó publikációk számának változása (forrás: Google Scholar)

2. ALAKVÁLTÓ KOMPOZITOK TERVEZÉSE

A kompozitok alakváltó képessége az azokat felépítő rétegek orientáltságában és azok egymásutániságában rejlik, röviden a rétegtrendjükben. Ahhoz tehát, hogy a kívánt alakváltást elérhesük, a rétegtrendet kell optimalizálni. Mivel egy valós kompozit általában több tíz rétegből épül fel, és minden egyes réteget számos különböző orientációban lehet lefektetni, ezért a különböző rétegtrend-lehetőségek száma hatalmas lehet. Az összes rétegtrend-lehetőség megvizsgálása kísérleti úton lehetetlen, numerikus úton pedig vagy túl hosszú időt venne igénybe, vagy bizonyos rétegszám felett szintén lehetetlen feladat, mert még egy szuperszámítógép memóriája (RAM) is gyorsan megtelik, és a szoftver megszakítja a futtatást. A megoldást a viszonylag csekély számítás kapacitást igénylő analitikus modellek és számítások jelentik.

A választott analitikus modell a klasszikus lemezelmélet (Classical Laminat Theory - CLT), amit széleskörűen használnak kompozit laminátumok rugalmas viselkedésének leírására. Tisztában kell lenni a modell egyszerűsítéseivel és elhanyagolásaival (pl. síkbeli feszültségállapot), viszont a kvalitatív optimalizálási lépéshez megfelelő módszer. Az alakváltás mértékének pontos, kvantitatív meghatározásához az analitikus módon optimálisnak talált rétegtrendet kell validálni numerikusan vagy

kísérleti úton. A CLT bemeneti paraméterei az egyes rétegek anyagi tulajdonságai (modulusok és Poisson tényező), vastagsága, orientációja és egymásutánisága. Ezek alapján eljuthatunk a teljes kompozit rugalmas viselkedését jellemző, úgynevezett ABD mátrixhoz (3. ábra). A mátrix megteremti a kapcsolatot a különböző módú terhelések (N – síkbeli terhelések, M – síkból kilépő, hajlító terhelések) és deformációk (ϵ^0 – középsík megnyúlások, κ – síkból kilépő görbületek) között. Az ABD mátrix főátlója a konvencionális alakváltásokat jellemzi, amikor a terhelés és a deformáció módja megegyezik (pl. A_{11}^* – longitudinális húzó terhelésre longitudinális megnyúlás). A színessel bekeretezett mátrix-elemek jellemzik a különféle, úgynevezett kapcsoló, vagyis nem-konvencionális viselkedési formákat (pl. B_{12}^* – longitudinális húzó terhelésre transzverzális lehajlás, vagy D_{16}^* – longitudinális hajlító terhelésre csavarodás). Az optimalizálás során azt a rétegtrendet kell megtalálni, ami a megfelelő kapcsoló ABD mátrix-elemekkel rendelkezik. Vagyis, ha a cél egy olyan kompozit fejlesztése, ami adott longitudinális hajlítóterhelés hatására a lehető legnagyobb mértékben megcsavarodik (ez hasznos lehet pl. különböző aerodinamikai elemeknél), akkor adott rétegszám esetén az összes rétegtrend-lehetőséget végigvizsgálva azt a laminátumot keressük, amelynek maximális a D_{16}^* eleme.

A hosszas számolási folyamatot minden egyes rétegtrendre

Síkbeli kapcsolások

Síkbeli-síkból kilépő kapcsolások

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} * & A_{12} * & A_{16} * & B_{11} * & B_{12} * & B_{16} * \\ A_{12} * & A_{22} * & A_{26} * & B_{12} * & B_{22} * & B_{26} * \\ A_{16} * & A_{26} * & A_{66} * & B_{16} * & B_{26} * & B_{66} * \\ B_{11} * & B_{12} * & B_{16} * & D_{11} * & D_{12} * & D_{16} * \\ B_{12} * & B_{22} * & B_{26} * & D_{12} * & D_{22} * & D_{26} * \\ B_{16} * & B_{26} * & B_{66} * & D_{16} * & D_{26} * & D_{66} * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix}$$

Síkból kilépő kapcsolások

3. ábra. Kapcsoló elemek a klasszikus lemezelmélet inverz ABD mátrixában

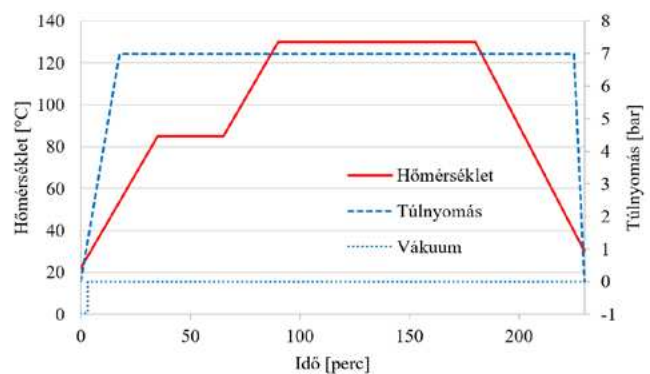
el kell végezni, ami több százezer, esetleg több millió számítás-sorozatot is jelenthet. Erre érdemes írni egy optimalizáló algoritmust, ami automatikusan elvégzi az összes számítást. Az általunk fejlesztett MATLAB algoritmusnak nagyjából 5 másodpercre van szüksége megközelítőleg 300 000 rétegrend (4 rétegű kompozit, 7,5°-os orientáció felbontással) ABD mátrixszámának kiszámolására és az optimális alakváltó rétegrend megtalálására.

3. AUTOKLÁVOS GYÁRTÁS

Az alakváltó próbatestek esetében kulcsfontosságú a lehető legmagasabb minőséget biztosító gyártástechnológia használata. A prepreges-autoklávós gyártástechnológia ideális választás ilyen esetekben. A prepreg egy gyantával előre átitatott kompozit előgyártmány, aminek nagy előnye, hogy pontosan be van állítva a szál-mátrix arány. A mátrix csekély mértékben térhálósított állapotban fogja körül a szálakat, ezért hűtve tárolandó, hogy a további – idő előtti – térhálósodást megakadályozzuk. Az autokláv egy túlnyomásos kemence, amelynek fő előnyét az az akár 10 bar-os túlnyomás jelenti, amit a kompozitra engedve a térhálósítási ciklus közben nagymértékben csökkenthető a bennmaradó légzárványok mérete és száma, amelyek hibahelyként viselkednének a kész termékben, így gyengítenék azt. A prepregből felépülő kompozit laminátumot az autoklávós térhálósítási ciklusra vákuumzsákba csomagolással kell felkészíteni. A szerszámra helyezett laminátumot alulról és felülről formaleválasztó fóliával kell letakarni a ciklus utáni eltávolíthatóság érdekében. A felső formaleválasztó fölé kerül egy olyan "lélegző anyag", ami biztosítja a vákuum szabad útját az egyik vákuumcsatlakozótól a másikig, valamint a laminátum teljes felületén is. Végül a vákuumzsák és az azt a szerszámhoz ragasztó vákuumtömítő szalag elhelyezése biztosítja a légtömörtséget.

A 4. ábra egy jellegzetes lépcsős térhálósítási ciklust mutat be. A ciklus elején vákuumot tartunk a vákuumzsák belsejében, amit leengedünk, amikor a külső (vákuumzsákon kívüli) túlnyomás eléri az 1 bar-t. A túlnyomást ebben az esetben 7 bar-ig emeljük, és egészen a teljes kitérhálósodásig, sőt a hűtési szakasznak is majdnem a végéig tartjuk a minél kompaktabb termék érdekében. A hőciklusban található lépcsős (első plató 50 perc környékén) kettős célt szolgál. Egyrészt a gyanta viszkozitását lehet vele moderálni. Amikor elkezdjük fűteni a csak csekély mértékben előtérehálósított gyantát a prepregben, annak a viszkozitása

a hő hatására jelentősen csökken, aminek hatására nem kívánt anyagáram indulhat meg. A plató egy várakozási szakasz, amikor megvárjuk, hogy az adott hőmérsékleten előrehaladjon a kovalens térhálókötések kialakulása, ez ugyanis nagyban növeli a viszkozitást. Amikor a térhálósűrűség kompenzálja a közölt hő hatására bekövetkezett viszkozitás csökkenést, ismét emelhetjük a hőmérsékletet. A plató másik célja az exoterm túlhevülés elkerülése. A gyanta a térhálósodása során – a nagy energiájú kovalens kötések kialakulása útján – egy alacsonyabb energiaszintre jut, mint ahol előtte tartózkodott. Az energiának viszont valahova távoznia kell, vagyis hő keletkezik. Ha túl gyorsan és/vagy lépcsős beiktatása nélkül fűtjük a laminátumot, előfordulhat, hogy a beállított maximális hőntartási hőmérsékleten az exoterm reakció miatt lényegesen túlfutunk, ami a termék degradációját okozhatja. Bizonyos gyantarendszerek és kisebb térfogatú termékek esetében indokolt lehet a lépcsős elhagyása, ugyanis előfordul, hogy ezek a problémák nem lépnek fel számottevő mértékben.



4. ábra. Lépcsős, autoklávós térhálósítási ciklus

4. TERVEZÉSI ÉS GYÁRTÁSI KIHÍVÁSOK

A kívánt alakváltó viselkedést gyakran aszimmetrikus rétegrendekkel lehet elérni. Ez tervezési és gyártási kihívások elé állítja a mérnököket, ugyanis az a laminátum, ami a középsíkjára nézve nem szimmetrikus, hajlamos vetemedni. A vetemedést okozhatja nedvességtartalom miatti duzzadás is, de még kritikusabb a hőtágulásból adódó vetemedés. A laminátumot alkotó egyes rétegek a különböző orientációjukból adódóan hő hatására eltérő

irányultság szerint tágulnak. Amennyiben szimmetrikus a rétegrend, a síkból kilépő feszültségek kompenzálják egymást, és így nem tapasztalunk vetemedést. Ha viszont a szimmetria nem adott, vetemedés léphet fel. Egy sík lapot autoklávba helyezve fontos, hogy a térhálósodási ciklus végén a síklapúság megmaradjon, hogy elkerüljük a megbízhatósági problémákat, vagyis a vetemedés az egyik legfontosabb megoldandó feladat.

Az autoklávós térhálósítási ciklus végső hőntartási fázisában alakulnak ki az utolsó térhálókötések, vagyis ezen a hőmérsékleten az anyag belső feszültség szempontjából viszonylagos nyugalomban van. A vetemedés a hűtési ciklus során történik. Ha a kész terméket újra felhevítjük, visszanyerjük a kiindulási, vetemedés-mentes alakot. A cél azonban az, hogy ne legyen szükség hőközlésre ahhoz, hogy a kompozit a tervezett alakban kerüljön ki az autoklávból. Három megoldási lehetőséget vázolunk a vetemedés kiküszöbölésére.

Az első lehetőség az, hogy egy olyan módon ívelt szerszámlapra laminálunk, amiről a kompozit éppen a kívánt alakúra vetemedik vissza a hűtési ciklus folyamán. Ehhez numerikus módszerrel kell megtalálni a szerszám optimális alakját a térhálósítási és a felhasználási hőmérsékleteket figyelembe véve. A módszer működik, hátránya viszont, hogy a kompozit alakjának hőmérséklet-függése megmarad, és az előre definiált működési hőmérséklettől való bármilyen irányú eltérés az alakot befolyásolni fogja. Ennek azonban előnye is van, ugyanis hő-aktuált kompozitok fejlesztését teszi lehetővé.

A második lehetőség a vetemedés csökkentésére, amikor anyagában hibrid rétegrendet alkalmazunk, vagyis az egyes rétegek anyagukban különböznek lehetnek (pl. szén és üveg). Ekkor a rétegek mechanikai és hőtágulási karakterisztikája is eltérhet egymástól. Megfelelő tervezéssel található olyan rétegrend, ahol – bár aszimmetrikus a rétegrend – a hőtágulásokból adódó feszültségek olyan módon kompenzálják egymást, hogy azok nem vezetnek síkból kilépő deformációhoz, mindemellett viszont az aszimmetriából származó alakváltó viselkedés (egy része) megmarad. Ekkor tehát az alakváltó kompozit hőközlésre sem fog vetemedni. Ezt a megközelítést analitikus optimalizálással érdemes kezelni a rétegrend-lehetőségek nagy száma miatt.

Az aszimmetrikus rétegrendek vetemedésének harmadik elkerülési módja az úgynevezett rétegrend homogenizáció (Stanford Egyetem szabadalom függőben) [11]. Ekkor a néhány rétegből álló, aszimmetrikus rétegrendű, úgynevezett szub-laminátumot többször egymásra helyezve homogenizáljuk a rétegrendet. Minél több szub-laminátumot helyezünk egymásra, annál inkább csökkentjük az aszimmetriából eredő vetemedést. Ennek a módszernek az egyszerűsége jelenti a legnagyobb előnyét, ami lehetővé teszi, hogy az ipar megszabaduljon attól az ökol szabálytól, hogy a kompozitoknak szimmetrikus rétegrendűnek kell lenniük. Az aszimmetrikus rétegrendek iparba vezetése egy eddig bezárt ajtót nyit ki, ami az eddigieknél nagyobb teljesítményű és még könnyebb kompozit termékek tervezését és alkalmazását teszi lehetővé.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kompozit anyagok további fejlődésének záloga lehet azok többfunkciósá tétele. A rétegrend megfelelő megtervezésével alakváltó viselkedéssel lehet felruházni a szálerősítésű

laminátumokat (pl. hajlító terhelésre csavarodás), aminek rendkívüli ipari jelentősége lehet. A rétegrend optimalizálásához analitikus algoritmus fejlesztése javasolt a számítási kapacitásigény kordában tartása érdekében. A gyártást a lehető legjobb termékminőséget biztosító autoklávós-prepreges gyártástechnológiával érdemes végezni, ahol ügyelni kell a térhálósítási ciklus pontos beállítására, hogy elkerüljük a nem kívánt anyagáramokat és az exoterm reakcióból eredő túlhevülést. Alakváltó kompozitok esetében gyakori az aszimmetrikus rétegrend, ami nem kívánt vetemedéshez vezethet. A vetemedés kiküszöbölésére három módszert ajánlunk: ívelt szerszámlapra laminálás, hibrid rétegrend alkalmazása, illetve a rétegrend homogenizálása. Ha sikerül az aszimmetrikus rétegrendek vetemedését kiküszöbölni, az utat nyit nemcsak az alakváltó, hanem általánosan az aszimmetrikus rétegrendeknek is, ami végső soron könnyebb és hatékonyabban működő alkatrészeket jelent annak minden előnyével, kezdve a repülőgépek károsanyag kibocsátásának visszaszorításától a szélturbinák hatékonyabb energiatermeléséig.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-19-3 számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (K 120592), valamint az NVKP (NVKP_16-1-2016-0046) pályázatai támogatták. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nanotechnológia (BME FIKP-NAT) tématerületi programja keretében.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Hegedűs, G.; Sarkadi, T.; Czirány, T.: Self-sensing polymer composite: white-light-illuminated reinforcing fibreglass bundle for deformation monitoring, *Sensors*, 19, 1745 (2019).
- [2] Forintos, N.; Czirány, T.: Reinforcing carbon fibers as sensors: The effect of temperature and humidity, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 131, 105819 (2020).
- [3] Brandt, J.: The research requirements of the transport sectors to facilitate an increased usage of composite materials, *EADS Deutschland GmbH, München* (2004).
- [4] Brinson, L. C.; Reifsnider, K. L.; Bartolotta, P. A.; Buczek, M. B.; Davis, J. W.; Johnston, N. J.; Sastry, A. M.; Sternstein, S. S.: *Going to extremes - Meeting the emerging demand for durable polymer matrix composites*, The National Academies Press, Washington, D.C. (2005).
- [5] <http://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html> (13.10.2017).
- [6] Garcia, H.; Abdulrahim, M.; Lind, R.: Roll control for a micro air vehicle using active wing morphing, in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 1–10 (2003)..
- [7] Yoon, B. S.; Park, J. H.; Yoon, K. J.: Experimental study on control fins of a small flying vehicle using piezo-composite actuators, *Advanced Composite Materials*, 26, 35–43 (2017).
- [8] Yang, Z.; Wang, Q.; Wang, T.: Dual-triggered and thermally reconfigurable shape memory graphene-vitrimer composites, *Applied Materials & Interfaces*, 8, 21691–21699 (2016).
- [9] York, C. B.: Unified approach to the characterization of coupled composite laminates: benchmark configurations and special cases, *Journal of Aerospace Engineering*, 219–243 (2010).
- [10] York, C. B.: On bending-twisting coupled laminates, *Composite Structures*, 160, 887–900 (2017).
- [11] Tsai, S.; Sharma, N.; Arteiro, A.; Roy, S.; Rainsberger, B.: Composite double-double and grid/skin structures, *International Paris Air Show 2019, Paris* (2019).