

KOMPOZITOK ALAKVÁLTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

FEASIBILITY OF SHAPE CHANGING COMPOSITES

Vermes Brúnó^{1,2}, PhD hallgató, vermesb@pt.bme.hu

Czigány Tibor^{1,2}, az MTA levelező tagja, czigany@eik.bme.hu

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

²MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

ABSTRACT

This paper aims to introduce the feasibility and challenges of using composite materials as non-conventionally shape changing structures. It is shown that by carefully designing the stacking sequence of the differently oriented layers of a composite, it can twist due to bending loads. Amongst others, aerodynamical structural parts like turbine blades or aeroplane wings could greatly benefit from such a mechanical response. To exploit the full potential of this behaviour we need to overcome some challenges identified in the paper. Layup optimization and manufacturing are the main processes that require more focus in the future to get the most out of mechanically coupled (e.g. bend-twist) composites.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű kompozitok olyan többkomponensű, többfázisú szerkezetek, ahol a merevség és szilárdság túlnyomó részét az erősítő szálak biztosítják. Az erősítő anyag és a befoglaló, általában szívós mátrixanyag között követelmény a kiváló adhézió akár tartós idejű behatás esetén is, ami lehetővé teszi az alkotók feszültségátadáson alapuló együttműködését [1]. A kompozitok legnagyobb előnye a hagyományos szerkezeti anyagokkal (pl. fémekkel) szemben az irányfüggő mechanikai viselkedésük. Az izotrop anyagokkal szemben kompozitok esetében az egyes rétegek erősítőszálainak megfelelő orientációjával kitüntetett irányokban nagyobb merevséget, illetve szilárdságot érhetünk el, mint a többi irányban. Ez jelentős tömeg-megtakarítással járhat, különösen kis sűrűségű polimer mátrixok és nagy fajlagos merevségű és szilárdságú erősítőszálak (pl. szénszál) használata esetében. Ennek következtében kompozitokat az ipar széleskörűen alkalmaz, főleg tömegkritikus alkatrészek anyagaként (pl. repülőgépipari alkatrészek).

Lehetőség van azonban az irányfüggő viselkedésnek egy másik, hasonlóan jelentős

célra való kihasználására. A kompozitot felépítő rétegek orientációjának és sorrendjének gondos megtervezésével el lehet érni, hogy a szerkezet mechanikai terhelés hatására a konvencionálístól eltérő módon váltson alakot. York [2] megmutatta, hogy megfelelően megtervezett kompozit rétegrendek esetében lehetséges többek között húzó terhelésre lehajló, vagy hajlító terhelésre csavarodó deformációs választ kapni.

Ilyen, és ezekhez hasonló módon alakváltó szerkezetek rendkívüli előnnyel járhatnak többek között a repülőgép-, az energetika, vagy a járműiparban. Egy szárnyprofil a rá ható (hajlító) felhajtóerő hatására tervezett mértékben megcsavarodva például a megváltozott aerodinamikai jellegének köszönhetően csökkentheti a repülőgép üzemanyag és károsanyag kibocsátását, vagy ehhez hasonlóan egy szélkerék növelheti a működési energiahatékonyságát.

2. ALAKVÁLTÓ SZERKEZETEK

A szerkezeti anyagok alakváltásának fontosságát már régen felismerték. Számos kutatócsoport dolgozott különböző megközelítéseken, hogy olyan szerkezeteket hozzanak létre, amelyek valamilyen külső behatásra akár működés közben tudják változtatni az alakjukat.

Az egyik legkézenfekvőbb, és leggyakrabban alkalmazott megközelítés a motoros aktuáció. Elég megnézni az utasszállító repülőgépek szárnyait, ahol a kilépő éleknél motorral vezérelt fékszárnyak találhatók. Bár ez a megközelítés némiképp távol áll az anyagában alakváltó kompozitoktól, a cél mégis hasonló: működés közben módosítani az alakot, jelen esetben az aerodinamikai viszonyok és így a repülési karakterisztika megváltoztatása érdekében. Boria és társai [3] már egy egyetlen darabból álló lemez görbületét változtatták, elektromotor segítségével. Egyszerű szerkezetük lényege, hogy a servo-motorral működtetett aktuátorukat két alátámasztási pont között helyezték el. A héjlemezt ebben az egy pontban fel-le mozgatva már kis aktuációs energiával is

nagy mértékben tudták változtatni a görbületet, ezzel állítva a szárnyprofil aerodinamikai karakterisztikáját. Bár az elektromotoros aktuáció viszonylag egyszerű, ráadásul kiválóan vezérelhető megoldás, az aktuátor (motor) miatti tömegnövekedés nem kívánatos, sőt, gyakran megengedhetetlen.

Egyik megoldási lehetőség lehet az, ha kihagyjuk a motort, mint aktuátort, és közvetlenül az anyag elektromos áramra vagy mágneses mezőre adott válaszát használjuk ki. Tabata és társai [4] olyan elektroszenzitív rendszert fejlesztettek, ami a rákapcsolt feszültség függvényében változtatta az egyes rétegek közötti adhéziós erőt. A poliimid-Ni tartalmú kompozit hajlító merevsége így reverzibilisen volt állítható, ezzel pedig a hagyományos anyagokétól eltérő, szabályozható deformációs viselkedést mutatott. Egy másik intenzíven kutatott megközelítés szerint lehetséges a piezoelektromos jelenséget kihasználva elérni az anyagok (leggyakrabban kompozitok) alakváltását. Webber és társai [5] elemezték egy olyan szerkezet deformációját, ahol elektromos áram hatására deformálódó piezo-aktuátort építettek egy kompozit lemez rétegei közé. Megállapították, hogy a modelljeik által kapott deformációs értékek jól közelítették a méréssel kapott eredményeket.

Az elektromos áram mellett külső behatásként a hőmérséklet megváltozását is ki lehet használni alakváltás elérésére. Meng és társa [6] áttekintő cikkükben különböző alakemlékező polimer kompozit koncepciókat tárgyalnak. Az irodalmi eredmények alapján leírták, hogy hőhatás és elektromos áram mellett fényhatás, illetve nedvességfelvétel is kiválthatja az alakemlékező viselkedést.

Az eddigiekben bemutatott koncepciókban közös, hogy valamilyen külső, általában ember vezérelte aktuáció szükséges az alakváltás eléréséhez. Számos esetben azonban előnyös lehet, hogyha az alakváltás a működés közben „magától” megy végbe. Amennyiben ismert a szerkezeti elem várható, működés közbeni mechanikai terhelése, érdemes lehet azt úgy megtervezni, hogy olyan módon váltson alakot, amivel a feladatát még jobb teljesítménnyel tudja ellátni. Erre jelenthetnek megoldást a speciális rétegrendű kompozitok. York [7] egy cikkében például kitért arra, hogy húzás hatására csavarodó kompozitokat kiválóan lehet hasznosítani helikopter szárnyakként. A rotor sebességének növekedésével a centrifugális erő húzó terhelést ad a szárnyakra, amelyek ennek függvényében a tervezett mértékben megcsavarodnak. Ezzel az adaptív alakváltó

rendszerrel mindenféle külső behatás nélkül növelni lehet a jármű hatékonyságát.

A kompozitok mechanikai kapcsoltságát (pl. nyújtásra lehajlás vagy hajlításra csavarodás) a gyakorlatban számos területen ki lehetne használni, azonban először meg kell érteni, hogy milyen összefüggés van a szerkezeti felépítés és a mechanikai viselkedés, illetve a gyárthatóság között.

3. ALAKVÁLTÓ KOMPOZIT FEJLESZTÉSE

A gyakorlatban bevett szokás, hogy a gyártás közbeni hővetemedések elkerülése érdekében a középsíkra szimmetrikus rétegrendű kompozitokat tervezünk. Így ugyanis az egyes rétegek különböző irányú hőtágulásai úgy egyenlítik ki egymást, hogy síkból kilépő deformáció nem jön létre. Amikor cél az alakváltó viselkedés elérése, akkor a kompozit tervezés általános ökölszabályai nem feltétlenül érvényesek, mégis, ebben a cikkben egy olyan alakváltó kompozitot mutatunk be, ahol törekedtünk rá, hogy ne lépjen fel gyártási vetemedés, ezért szimmetrikus rétegrendet alkalmaztunk. A tervezés és a kísérlet célja az volt, hogy bemutassuk és vizsgáljuk az ipari szempontból egyik legjelentősebb kapcsolási alakváltást, a hajlításra csavarodás jelenségét egy egyszerű kompozit lapon.

3.1. Tervezés

A tervezés során a legelterjedtebb analitikus kompozitmechanikai modellt, a klasszikus lemezelméletet használtuk a mechanikai viselkedés becslésére. A klasszikus lemezelmélet számos egyszerűsítő feltételezéssel él (pl. síkbeli feszültségállapot feltételezése), azonban igen vékony kompozitok esetében az egyes rétegrendeknek megfelelő mechanikai viselkedések kvalitatív összehasonlításához jól használható a módszer. Az elmélet bemeneti paramétereként néhány anyagi tulajdonságot (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}), illetve a kompozit felépítését (rétegrend orientációkkal és rétegvastagságok) igényli. Eredményként egy olyan 6x6-os mátrixhoz jutunk, melynek az egyes elemei megadják a különböző terhelések és deformációk közötti kapcsolatokat [8]. A cél jelen esetben az volt, hogy a hajlító terhelést a csavarodó deformációval összekapcsoló tényező értékét növeljük, miközben a szimmetrikus rétegrendet megtartjuk. A számolási kapacitásigény csökkentése érdekében négy rétegű kompozit esetében számoltuk ki többféle rétegrend esetében a vizsgált kapcsolási tényező (D_{12}^*) értékét, majd a legmagasabb értéket kiválasztottuk, bízva abban, hogy egységnyi

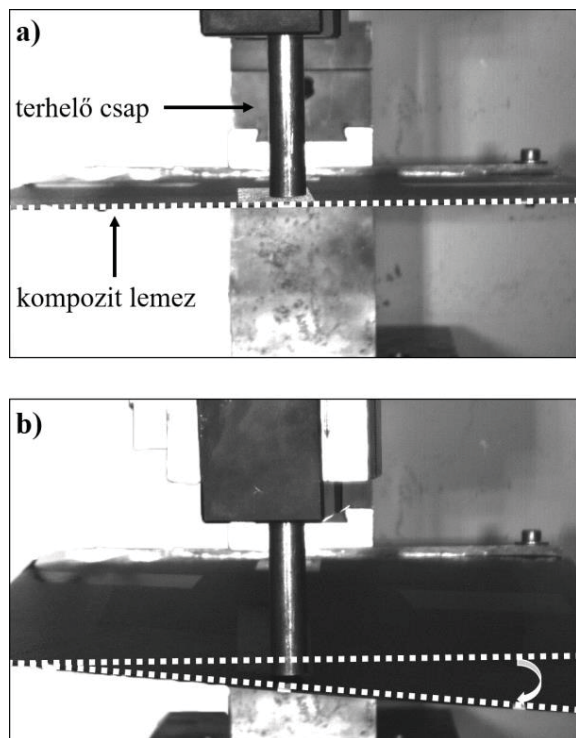
hajlításra ez fog a legnagyobb mértékben csavarodni.

3.2. Gyártás

A kompozit gyártását a lehető legmagasabb, repülőgépipari minőséget garantáló prepreg-autoklávos technológiával végeztük. A prepreg egy mátrixanyaggal előre átítatott szálerősítést tartalmazó lap, ami garantálja a pontosan beállított szál-mátrix arányt, míg az autokláv egy túlnyomásos kemence, ami a mátrix kémiai térhálósodása során csökkenti az anyag hibahelyeinek méretét, illetve számát. A gyártáshoz használt anyag unidirekcionális Hexcel IM7 szénszálal és HexPly 913 epoxi gyantát tartalmazó prepreg, míg a rétegrend $[142.5/97.5]_s$ volt.

3.3. Mechanikai vizsgálat és értékelés

Az elkészült, 180 mm x 180 mm-es síklap geometriájú kompozitot az egyik élénél befogtuk, a szemközti éle közepén pedig egy pontban hajlító terhelésnek vetettük alá. A mechanikai vizsgálat során a terhelt él két szélső pontjának elmozdulását és így a lemez csavarodásának mértékét video-nyúlásmérő segítségével rögzítettük (1. ábra).



1. ábra: Hajlításra csavarodó kompozit lap
a) terhelés előtt b) terhelés után

A kapott eredmények azt mutatták, hogy 30 mm középlehajlásra majdnem 5° -ot csavarodott a kompozit lemez. Ez olyan jelentős

mértékű csavarodás, aminek hatása jelentős például egy aerodinamikai szerkezeti elem esetében.

A kompozit geometriája és terhelési módja miatt a mért erőértékek rendkívül alacsonyok voltak (csupán 1-2 N). Ez azt jelenti, hogy tervezhető olyan kompozit, ami már kis mechanikai terhelések esetében is képes nagy mértékű nem konvencionális alakváltásra, ami pedig jelentősen befolyásolhatja a teljes szerkezet viselkedését.

3.4. Felmerülő problémák és fejlesztési irányok

A munka során több megoldandó problémát azonosítottunk és ezek alapján fejlesztési irányokat jelöltünk ki. A nem konvencionálisan alakváltó kompozitok nagy része nem szimmetrikus rétegrenddel rendelkezik. Ezek a kompozitok gyártás során a hőkezelés hatására vetemedhetnek, ami a tervezett geometriától való eltérés miatt problémát okozhat. Az egyik megoldási lehetőség, hogy csak szimmetrikus rétegrendű kompozitokkal foglalkozunk, és ezekben az esetekben igyekszünk optimalizálni az alakváltásokat. Ez azonban jelentősen korlátozhatja az elérhető alakváltások mértékét. A másik lehetőség, hogy kompenzáljuk az aszimmetrikus kompozitok hővetemedését. A kompenzációt kétféleképpen közelíthetjük meg: ívelt szerszámlapra laminálással, vagy anyagában hibrid rétegrend alkalmazásával. Az előbbi esetben a gondosan megtervezett szerszámlapra laminálva a hőprogram során éppen a kívánt geometriájúra „vetemedne” a kompozit. A hibrid megközelítés esetében pedig az az ötlet, hogy az egymástól anyagukban különböző rétegek különböző hőtágulási tulajdonságai aszimmetrikus rétegrend esetében is ki tudnák egyenlíteni egymást. Így az eredeti szerszámgeometriának megfelelő termékhez juthatunk, miközben az alakváltó képesség megmaradhat.

A gyártási nehézségek leküzdése mellett a legnagyobb kihívás a teljeskörű optimalizáció megoldása. Ha adott a kompozit felépítő különböző anyagok, rétegek és a lehetséges orientációk száma, akkor adott egy permutációs halmaz, ami tartalmazza az összes lehetséges rétegrend felépítést. Egy teljes optimalizáció során – ideális esetben – ezeket a permutációkat végig kell vizsgálni, hogy kiválaszthassuk közülük az adott célnak leginkább megfelelőt. A permutációk száma azonban olyannyira növekszik például a rétegszám növekedésével, hogy elképzelhetetlen lenne „kézzel” végigszámolni mindent. Ennek megoldására szükség lesz egy automatikus optimalizáló

algoritmus megírására, ami a bemeneti paraméterek alapján analitikus úton (klasszikus lemezelmélettel) számolva eredményezi az optimális rétegrendet. Egy ilyen algoritmus figyelembe tudná venni az egyes mechanikai kapcsoló paraméterek együttes hatását is, így pontosabb közelítéssel tudná becsülni az optimális rétegrendet egy adott viselkedési forma eléréséhez. Továbbá mind a valós deformációk pontosabb becsléséhez, mind pedig a gyártási vetemedések kiküszöbölésének megoldásához érdemes lesz végeeselemes szimulációk segítségével is vizsgálni a kompozitok alakváltását.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során megmutattuk, hogy egy szálerősített kompozit laminátum rétegrendjének gondos megtervezésével el lehet érni, hogy a termék a megszokottól eltérő módon, hajlító terhelésre csavarodással is reagáljon. A nem konvencionális deformáció mértéke elegendően nagy ahhoz, hogy jelentős előnnyel járhasson például aerodinamiai elemként használva. Ezen alakváltó koncepció fő előnye, hogy a szerkezeti elem a működése során alapvetően fellépő terheléseken kívül semmilyen külső gerjesztést nem igényel.

A tapasztaltak alapján kijelöltük a kutatás további fő irányait. Ahhoz, hogy a kompozitokban rejlő alakváltó képességet a lehető leginkább ki tudjuk használni, megoldást kell találni az aszimmetrikus rétegrendek gyártási vetemedésének kiküszöbölésére. Későbbi munkánk során ezt ívelt szerszámlapok, illetve anyagában hibrid rétegrendek alkalmazásával kíséreljük meg elérni. Emellett célunk egy automatizált algoritmus létrehozására, amelyet számítógépen lefuttatva nagyszámú lehetőséget átvizsgálva jó biztonsággal találjuk meg a kívánt alakváltó viselkedés eléréséhez szükséges optimális rétegrendet. Ezt egy analitikus, a klasszikus lemezelméletre épülő optimalizáló kód megírásával fogjuk megkísérelni.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (K 116070 and K 120592), valamint az NVKP (NVKP_16-1-2016-0046) pályázatai támogatták. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberei Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program

támogatta, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nanotechnológia (BME FIKP-NANO) tématerületi programja keretében. Segítségéért köszönet illeti Schultz Domokos MSc hallgatót.

6. IRODALOM

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ, Budapest (2007).
- [2] York C. B.: Unified approach to the characterization of coupled composite laminates : benchmark configurations and special cases. *Journal of Aerospace Engineering*, 4, 219–243 (2010).
- [3] Boria F., Stanford B., Bowman S., Ifju P.: Evolutionary optimization of a morphing wing with wind-tunnel hardware in the loop. *AIAA Journal*, 47, 399–409 (2009).
- [4] Tabata O., Konishi S., Cusin P., Ito Y., Kawai F., Hirai S., Kawamura S.: Micro fabricated tunable bending stiffness devices. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 89, 119–123 (2001).
- [5] Webber K. G., Hopkinson D. P., Lynch C. S.: Application of a classical lamination theory model to the design of piezoelectric composite unimorph actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17, 1–6 (2006).
- [6] Meng H., Li G.: A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, 54, 2199–2221 (2013).
- [7] York C. B.: Extension-twist coupled laminates for aero-elastic compliant blade design. in '53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu' (2012).
- [8] Barbero E. J.: Introduction to composite materials design. 3rd ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton (2018).