

Kompozitok hővetemedésének kihasználási lehetősége

Exploitation of the thermal warpage of composite laminates

VERMES Brúnó^{1,2}, CZIGÁNY Tibor^{1,2*}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Magyarország

² MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Magyarország
* levelező szerző: czigany@eik.bme.hu

Abstract

In order to avoid the thermal warpage of composites, almost exclusively symmetric laminates are used in practice. However, this significantly limits the exploitation of the full potential of composites (e.g. morphing capability). This work aims to demonstrate that thermal warpage can be advantageous for specific applications. We analyze the thermal deformation of laminates with a self-developed analytical algorithm and investigate the thermally induced weight lifting capability with numerical simulations.

Keywords: warpage exploitation, asymmetric layups, layup optimization, analytical algorithm, classical laminate theory

Kivonat

A kompozitok hővetemedésének elkerülése érdekében a gyakorlatban szinte kizárólag szimmetrikus rétegrendeket alkalmaznak, ez azonban nagymértékben korlátozza a kompozitokban rejlő lehetőségek kihasználását (pl. alakváltó képesség). A jelen munka célja, hogy megmutassa: a vetemedést ki is lehet használni. A laminátumok hőközlés hatására mutatott deformációját saját fejlesztésű, analitikus algoritmussal elemezzük, majd a hőaktuált teheremelő képességet végelelemes szimulációkkal vizsgáljuk.

Kulcsszavak: vetemedés kihasználás, aszimmetrikus rétegrendek, rétegrend optimalizálás, analitikus algoritmus, klasszikus lemezelmélet

1. BEVEZETÉS

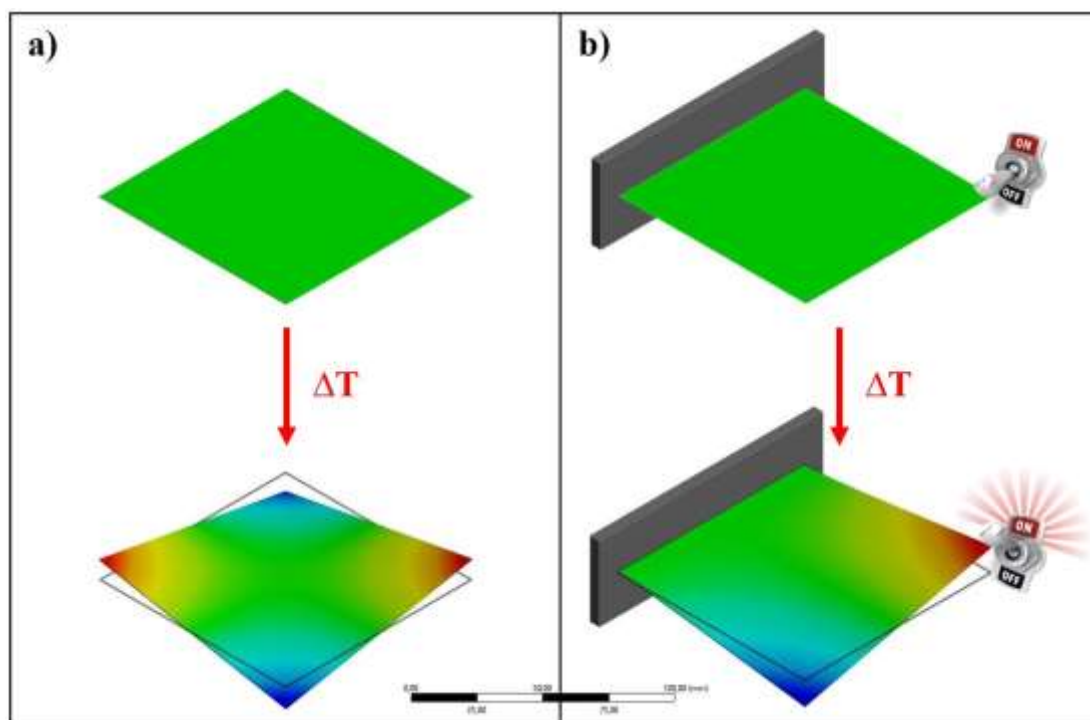
A szálerősítésű kompozitok napjaink legfontosabb szerkezeti anyagai közé tartoznak. A kompozitokat felépítő rétegek szálirányának és egymásutániségának (rétegrend) optimalizálásával olyan irányfüggő viselkedésű szerkezethez juthatunk, amelynek fajlagos mechanikai tulajdonságai túlmutatnak az izotrop szerkezeti anyagok képességein. A rétegek szálirányának változtatásával számos rétegrend permutáció állítható elő, amelyek mechanikai viselkedését analitikus és numerikus modellek segítségével meg lehet becsülni, és ezek alapján ki lehet választani az aktuális feladatra leginkább megfelelő rétegrendet. Egy adott alapanyag esetében a rétegrendek sokfélesége biztosítja az elérhető mechanikai viselkedési formák változatosságát. A gyakorlatban ez a sokféleség azonban nagymértékben korlátozódik azáltal, hogy szinte kizárólag szimmetrikus rétegrendeket használnak (a laminátum középsíkjára nézve). Ennek oka, hogy ekkor a síkbeli mechanikai terhelések és a hőterhelések nem vezetnek a laminátum síkból kilépő deformációjához, vagyis a kompozit nem vetemedik [1]. Ezzel szemben az aszimmetrikus rétegrendű laminátumok néhány ritka kivételtől eltekintve vetemednek [2, 3]. Az igazi megoldást azonban nem az aszimmetrikus rétegrendek elhagyása jelenti, hanem a vetemedés csökkentése, vagy kihasználása. Az aszimmetrikus rétegrendek ráadásul lehetővé tehetnek olyan nem-konvencionális alakváltásokat is, amelyek anyagi szinten nem megoldhatók szimmetrikus rétegrendekkel. Ilyen például egy húzó terhelésre megcsavarodó laminátum, amellyel többek között helikopter rotor-szárnyak hatásfoka növelhető [4, 5].

Ebben a cikkben a rétegrendek aszimmetriájából eredő hővetemedés vizsgálatával és a jelenség lehetséges kihasználásával foglalkozunk. Célunk, hogy rámutassunk az aszimmetrikus rétegrendű kompozit szerkezeti anyagok ipari alkalmazhatóságára.

2. A HŐVETEMEDÉS CSÖKKENTÉSE ÉS KIHASZNÁLÁSA

Aszimmetrikus rétegrendek esetében a kompozit mechanikai viselkedését jellemző ABD mátrix B rész-mátrixa nem zérus [6], így hőközlés vagy hőelvonás hatására az **1/a ábra** szerinti vetemedés lép fel. A vetemedést csökkenteni lehet a hőmérséklet változtatásával, vagy a gyártószerszám alakjának módosításával, azonban anyagi szinten a rétegrend optimalizálása jelenti a megoldást. Adott hőmérsékletváltozás hatására a klasszikus lemezelmélet segítségével számítható bármely rétegrend κ_x és κ_y lehajlási és κ_{xy} csavarodási görbülete. Ezek a görbületek a rétegrend függvényei, vagyis a vetemedés csökkentésének módja a rétegrend optimalizálása.

Érdeemes azonban fontolóra venni a vetemedés kihasználásának lehetőségét is. Ekkor a vetemedés megszüntetése helyett a cél lehet akár annak a maximalizálása is. Bár a jelenség változatlan, megkülönböztethetünk vetemedést és hőaktuált alakváltást attól függően, hogy a deformáció megszüntetendő, vagy hasznos számunkra. Az **1/b ábra** egy olyan alkalmazási lehetőségét mutatja az aszimmetrikus rétegrendű kompozitoknak, ahol a vetemedés számunkra előnyös, sőt, éppen ez jelenti a kompozit fő funkcióját. A kompozit ebben az esetben egy túlmelegedő rendszer biztonsági kapcsolójának megnyomásáért felel, amivel leállíthatja a túlmelegedést okozó folyamatot, vagy hűtési folyamatot indíthat el. A szerzők legjobb tudomása szerint a kompozitok vetemedését eddig nem használták még ki hasonló célokra. A vetemedés csökkentéséhez hasonlóan a hőaktuált alakváltó képesség optimalizálása is a rétegrend tervezésében rejlik. Példaként a következőkben egy hőterhelés hatására maximális mértékben csavarodó kompozit analitikus optimalizálását ismertetjük, majd az alakváltó képességet numerikusan értékeljük.



1. ábra. a) aszimmetrikus rétegrendű kompozitok hővetemedése b) a hővetemedés kihasználásának egy módja, amikor a vetemedő kompozit egy biztonsági kapcsolót aktivál egy túlmelegedő rendszerben

3. HŐAKTUÁLT ALAKVÁLTÓ KOMPOZIT

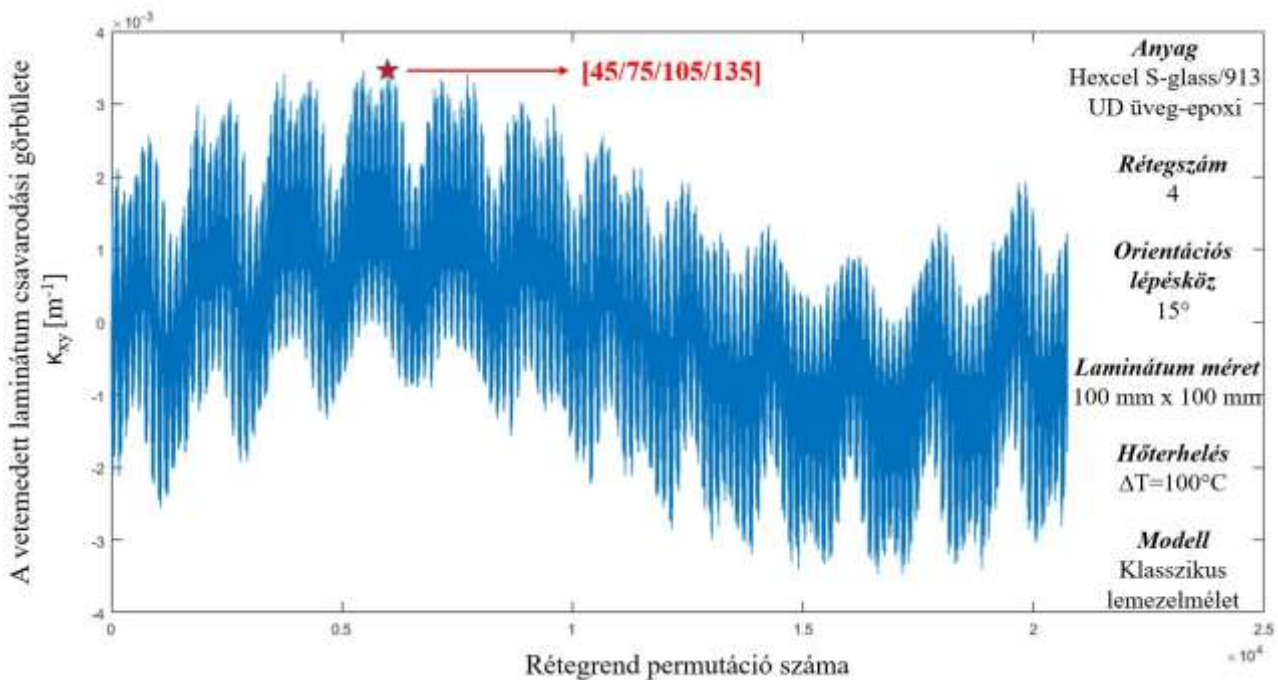
3.1. A rétegrend optimalizálása algoritmus segítségével

Az analitikus és numerikus számításokhoz egy unidirekcionális (egyirányú) üvegszál erősítésű, epoxi mátrixú prepreg alapanyag anyagtulajdonságait használtuk fel (**1. táblázat**). A merevségeket és a Poisson tényezőt a gyártói adatok alapján határoztuk meg, a többi paramétert gyártói adat hiányában kimértük.

1. táblázat – A Hexcel S-Glass/913 unidirekcionális üvegszálerősítésű epoxi mátrixú prepreg tulajdonságai

E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12} [-]	α_0 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	α_{90} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	Rétegvastagság [mm]
45,7	6,41	2,75	0,27	$8,1 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,15

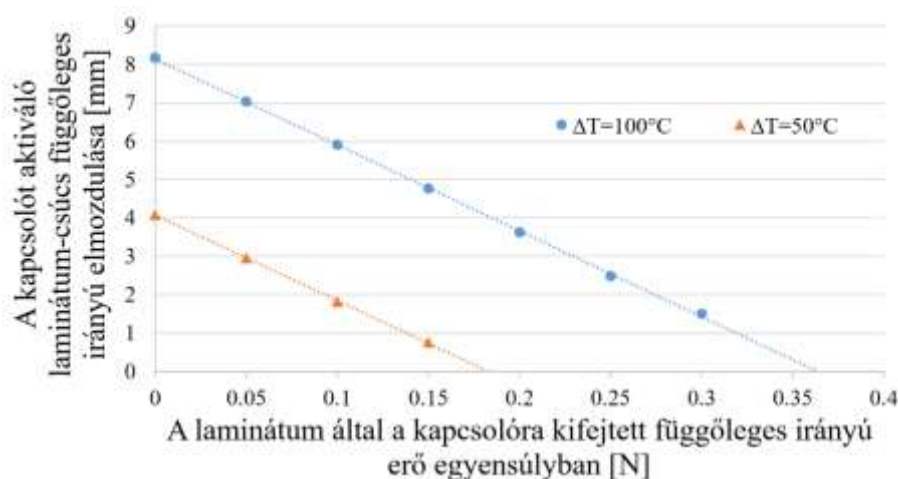
A rétegrend teljes mezős optimalizálását saját fejlesztésű, MATLAB környezetű algoritmus segítségével végeztük, $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ melegítés hatására történő csavarodásra, a klasszikus lemezelmélet szerint. A több, mint 20.000 lehetséges négyrétegű laminátum közül az analitikus számítások alapján a [45/75/105/135] rétegrend rendelkezett a legnagyobb csavarodási görbülettel (**2. ábra**), így a későbbi végeselemes szimulációkhoz ezt a rétegrendet használtuk.



2. ábra. Az analitikus rétegrend optimalizálás eredménye maximális csavarodási görbületre

3.2. A hőaktuált alakváltó viselkedés végeselemes vizsgálata

A végeselemes vizsgálathoz az **1/b ábrának** megfelelő elrendezésű, 100 mm x 100 mm-es, egyoldalon befogott, [45/75/105/135] rétegrendű kompozit lemez alakváltó képességét elemeztük $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ és $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ melegítés hatására, Ansys szoftver segítségével. A laminátum dimenziói befolyásolják az eredményeket, azonban a jelenlegi munka célja csupán a koncepció vizsgálata, ezért egyetlen méretet vizsgáltunk. A szimulációk során a kapcsolót megnyomó csúc síkhoz képesti függőleges irányú elmozdulását rögzítettük, különböző mértékű mechanikai terhelések mellett. A mechanikai terhelést minden esetben a csúcson definiáltuk, az elmozdulással ellentétes, függőleges irányban (lefele). Így az eredményekből kiolvasható, hogy a kapcsolót milyen magasságban kell elhelyezni, ha azt adott erőértékkel kívánjuk megnyomni (**3. ábra**). $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ esetében például 6 mm magasságban 0,1 N erőt képes kifejteni a kompozit a kapcsolóra, de ha a kapcsolót közelebb tesszük a sík laminátumhoz, akkor az erőhatás nagyobb lesz (pl. 1,5 mm-nél 0,3 N). Az összefüggés jó közelítéssel lineáris. Amennyiben a kapcsoló megnyomásához nagyobb deformációra van szükség, a laminátum síkbeli dimenzióinak növelése javasolt, vagy olyan anyagtulajdonságú prepreg alapanyag használata, amely a hőtágulási együtthatóinak értékéből következően nagyobb hővetemedésre képes. Nagyobb erőértékek eléréséhez pedig olyan anyagtulajdonságú alapanyag javasolt, amely nagyobb merevségi értékekkel rendelkezik. Mindkét feltétel teljesülhet az üvegszálerősítés helyett megfelelő szénszálerősítés megválasztásával.



3. ábra. Az egyoldalon befogott 100 mm x 100 mm-es [45/75/105/135] rétegrendű üveg/epoxi kompozit hővetemedésének végeselemes eredményei 50°C-os és 100°C-os hőmérsékletemelés hatására. Az eredmények értékelését az 1/b ábra segíti.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Megmutattuk, hogy érdemes változtatni azon a gyakorlaton, miszerint egy kompozitnak szimmetrikus rétegrendűnek kell lennie. Az aszimmetrikus rétegrendű laminátumok vetemednek hőterhelés hatására, de a vetemedés mértékét a rétegrend optimalizálásával csökkenteni lehet. Ezen kívül a vetemedést ki is lehet használni hőaktuált alakváltásként, amelyre a szimmetrikus kompozitok anyagi szinten nem képesek. A hőaktuált alakváltás hasznos lehet például egy túlmelegedő reaktor biztonsági kapcsolójának aktiválásánál, vagy akár egy túlmelegedő motortér hűtő/levegőztető ablakának kinyitásánál. Az irodalomban fellelhető egyéb alakváltó anyagokkal szemben (pl. bimetalok, alakemlékező polimerek) a hőaktuált alakváltó kompozitok legnagyobb előnye a fajlagos mechanikai tulajdonságaikban rejlik [7].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-20-3 számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A jelen publikációban megjelenő kutatások az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott TKP2020 Intézményi Kiválóság Alprogram támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatási okirat alapján valósultak meg (projekt azonosító: TKP2020 BME-IKA-NAT). A szerzők részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Barbero E. J.: Introduction to composite materials design. 3rd ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton (2018).
- [2] Reddy J. N.: Mechanics of laminated composite plates and shells - theory and analysis. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton (2004).
- [3] York C. B.: Unified approach to the characterization of coupled composite laminates configurations: Hygrothermally curvature-stable configurations. International Journal of Structural Integrity, 2, 406–436 (2012).
- [4] Haynes R. A.: New families of hygrothermally stable composite laminates with optimal extension-twist coupling. AIAA Journal, 48, 2954–2961 (2010).
- [5] 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' pp. 1–22 (2012).
- [6] Kollár L. P., Springer G. S.: Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, Cambridge (2003).
- [7] Vermes B., Czigan T.: Non-conventional deformations: Materials and actuation. Materials, 13, 1383 (2020).